

# ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE PONTS FORESTIERS ET ROUTIERS

## PARTENAIRE FINANCIER

*Forêts, Faune  
et Parcs*

Québec 

Dieudonné Romaric Batsy, Ph. D.

---

15 juin 2022  
PROJET N° 301014779

Commissionné par :  
Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du  
Québec (MFFP)

## REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs pour soutenir le développement des connaissances sur les matériaux à faible empreinte carbone.

Québec 

### ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE PONTS FORESTIERS ET ROUTIERS

PROJET N° 301014779

### APPROBATEUR

Vincent Blanchard  
Gestionnaire  
Bioraffinage et procédés  
vincent.blanchard@fpinnovations.ca

### RÉVISEUR

M. Hugues Imbeault-Tétrault, ing., M.Sc.A  
Conseiller aux affaires scientifique  
Responsabilité entreprise  
Groupe AGECO

### INFORMATION DE L'AUTEUR

Dieudonné Romaric Batsy, Ph.D.  
Chercheur  
Bioraffinage et procédés

418-781-6745  
dieudonne.Batsy@fpinnovations.ca

### Avertissement

FPIinnovations ne donne aucune indication ni garantie à quiconque (personne ou entité) quant à l'exactitude, à la rectitude ou à l'exhaustivité de l'information, des données ou de l'analyse de l'information ou des données contenues dans le présent rapport, et ne fournit aucune recommandation, indication, ni garantie de quelque nature que ce soit concernant le présent rapport.

Suivez-nous   

## TABLE DES MATIÈRES

Abbréviations .....	1
Sommaire .....	2
1. Introduction .....	4
2. Équipe du projet.....	5
3. Étude de cas .....	5
3.1 Ponts forestiers .....	5
3.2 Ponts routiers .....	6
4. Analyse de cycle de vie (ACV).....	7
4.1 Objectifs et champ d'étude .....	8
4.1.1 Objectifs .....	8
4.1.2 But de l'étude .....	8
4.1.3 Auditoire visé .....	9
4.1.4 Applications prévues et portée de l'étude.....	9
4.2 Champ de l'étude .....	9
4.2.1 Description des systèmes.....	9
4.2.1.1 Pont forestier rivière Paradis et ses caractéristiques techniques .....	9
4.2.1.2 Pont routier Lafarge et ses caractéristiques techniques .....	11
4.2.1.3 Durée de vie des ponts .....	12
4.2.2 Fonctions et unités fonctionnelles .....	12
4.2.3 Frontières du système à l'étude.....	13
4.2.4 Critères de délimitation de l'étude .....	15
4.2.5 Sources de données .....	16
4.2.6 Qualité des données.....	17
4.2.7 Méthodes d'évaluation d'impact de cycle de vie (ÉICV) et catégories d'impacts .....	17
4.2.7.1 TRACI.....	17
4.2.8 Logiciel de modélisation.....	19
4.2.9 Interprétation des résultats .....	19
4.2.10 Analyse de la pertinence et de la robustesse des méthodes.....	19
4.2.11 Considération des limites de l'étude.....	20
4.2.12 Représentativité.....	20
4.2.13 Revue critique .....	20
4.2.14 Règles d'imputation .....	20
4.2.14.1 Produits du bois .....	21

4.2.14.2	Produits d'acier .....	21
4.2.14.3	Autres produits et processus .....	21
4.2.14.4	Matières recyclées .....	21
4.2.15	Hypothèses sur la production d'électricité .....	22
5.	Inventaires .....	24
5.1	Hypothèses et collecte de données primaires .....	24
5.2	Hypothèse et collecte de données secondaires .....	24
5.2.1	Hypothèses et collecte des données de l'étape de production .....	24
5.2.2	Hypothèses et collectes des données de l'étape de construction .....	25
5.2.2.1	Transport (A4) .....	25
5.2.2.2	Construction (A5) .....	27
5.3	Analyse de la qualité de données et modélisation des processus .....	30
5.3.1	Qualité des données primaires et analyse qualitative de l'incertitude .....	30
5.3.2	Évaluation qualitative des données primaires et secondaires .....	32
5.3.3	Effets des incertitudes sur les résultats .....	33
5.4	Analyse de sensibilité .....	34
5.5	Analyse de cohérence entre systèmes comparés et analyse de complétude à l'intérieur des frontières des systèmes étudiés .....	35
6.	Analyse d'impacts et résultats .....	35
6.1	Impacts des ponts .....	36
6.1.1	Pont Paradis – impacts .....	36
6.1.2	Pont Lafarge – impacts totaux .....	38
6.2	Analyse de contribution aux émissions de GES des ponts .....	40
6.2.1	Pont Paradis – Analyse de contribution des matériaux aux émissions GES .....	40
6.2.2	Pont Lafarge – Analyse de contribution des matériaux aux émissions GES .....	40
6.3	Analyse de sensibilité .....	41
6.3.1	Impacts totaux des ponts selon IMPACT 2002+ .....	41
6.3.2	Hypothèses, traitement des exclusions au-delà des frontières du système et analyse de sensibilité .....	42
6.3.2.1	Hypothèses et approximation des données .....	43
6.3.2.2	Module B4 – Remplacement des matériaux .....	44
6.3.2.3	Hypothèses et approximation des données de phase fin de vie .....	45
6.3.2.4	Ponts Paradis – Résultats de l'analyse de sensibilité incluant la fin de vie .....	46
6.3.2.5	Ponts Lafarge – Résultats de l'analyse de sensibilité incluant la fin de vie .....	47
6.3.3	Carbone biogénique .....	48
6.3.3.1	Informations additionnelles – Traitement du carbone biogénique .....	48

6.3.3.2	Hypothèse et analyse de sensibilité sur l'inclusion du carbone biogénique à la fin de vie des ponts.....	49
6.3.4	Analyse de sensibilité relative aux méthodes d'allocation .....	53
6.3.4.1	Pont Paradis – allocation économique vs allocation massique sur les produits du bois.....	55
6.3.4.2	Pont Lafarge – allocation économique vs allocation massique sur les produits du bois .....	56
6.3.5	Analyse de sensibilité relative aux incertitudes de ( $\pm 5\%$ et $\pm 30\%$ ) sur les données de conception .....	57
7.	Conclusion et recommandation .....	59
8.	Limites de l'étude .....	60
9.	Pistes pour futures études .....	61
10.	Références.....	62
	ANNEXE I – Phases d'analyse de cycle de vie .....	66
	ANNEXE II – Illustration de l'équivalence du poids des scénarios du pont forestier .....	68
	ANNEXE III – Inventaire des scénarios du pont routier .....	69
	ANNEXE IV – Évaluation de la qualité des données .....	72
	ANNEXE V – Résultats absolus et relatifs de l'analyse comparative des ponts forestiers .....	76
	Pont Paradis – Impacts pour « Berceau à la porte » .....	76
	Analyse de contribution des étapes de cycle de vie.....	76
	Pont Lafarge – Impacts pour « Berceau à la porte » .....	77
	Analyse de contribution des étapes de cycle de vie.....	77
	ANNEXE VI – Résultats des analyses de sensibilités.....	78
	Analyse de sensibilité – Impacts obtenus sous IMPACT 2002+.....	79
	Analyse de sensibilité – Impacts incluant la fin de vie des ponts.....	80
	Analyse de sensibilité – Impacts incluant la fin de vie des ponts.....	81
	Analyse de sensibilité – Méthodes d'allocation économique.....	81
	Analyse de sensibilité – Impacts obtenus en tenant compte des incertitudes aux bornes des intervalles d'incertitudes sur les données de conception des ponts ( $\pm 5\%$ et $\pm 30\%$ ).....	83
	ANNEXE VII – Estimation des durées de vie des matériaux constitutifs des ponts .....	87
	ANNEXE VIII – Rapport de revue critique .....	91

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Scénarios comparatifs du pont forestier Paradis.....	5
Figure 2.	Pont Paradis comme construit.....	6
Figure 3.	Scénarios comparatifs du pont routier Lafarge .....	7
Figure 4.	Pont Lafarge comme construit .....	7

Figure 5.	Étapes méthodologiques de l’analyse de cycle de vie (source : [14]) .....	8
Figure 6.	Frontières du système (du berceau à la porte).....	14
Figure 7.	Pourcentage de contribution par type de combustibles dans les réseaux d’approvisionnement en électricité [53-56].....	23
Figure 8.	Émissions des gaz à effet de serre (GES) des scénarios de pont Paradis.....	36
Figure 9.	Analyse de contribution des étapes de cycle de vie aux émissions du pont Paradis .....	37
Figure 10.	Illustration comparative des impacts totaux du pont en bois et ceux du pont en acier-bois .....	37
Figure 11.	Émissions des gaz à effet de serre (GES) des scénarios de pont Lafarge .....	38
Figure 12.	Analyse de contribution des étapes de cycle de vie aux émissions du pont Lafarge .....	39
Figure 13.	Illustration comparative des impacts du pont Lafarge hybride en bois et ceux du pont en acier-béton.....	39
Figure 14.	Analyse de contribution des matériaux aux émissions GES des scénarios du pont Paradis – Étapes (A1-A3) .....	40
Figure 15.	Analyse de contribution des matériaux aux émissions GES des scénarios du pont Lafarge – Étapes (A1-A3) .....	41
Figure 16.	Comparaison d’impacts entre ponts Paradis en bois et pont Paradis en acier-bois .....	42
Figure 17.	Impacts comparatifs des scénarios du pont Paradis – analyse de sensibilité incluant la fin de vie .....	47
Figure 18.	Impacts comparatifs des scénarios du pont Lafarge – analyse de sensibilité incluant la fin de vie .....	47
Figure 19.	Émissions des gaz à effet de serre (GES) des produits de bois selon les allocations massiques et économiques.....	55
Figure 20.	Comparaison d’impacts entre ponts Paradis en bois et pont Paradis en acier-bois en considérant l’allocation économique .....	56
Figure 21.	Comparaison des impacts du pont Lafarge hybride en bois et ceux du pont Lafarge en acier-béton en considérant l’allocation économique .....	57
Figure 22.	Résultats de l’analyse de sensibilité avec la considération des bornes d’incertitudes -5% et +30 % sur les données de conception .....	58
Figure 23.	Résultats de l’analyse de sensibilité avec la considération des bornes d’incertitudes +5% et -30 % sur les données de conception .....	58
Figure 24.	Les étapes de l’analyse de cycle de vie (source : [14]) .....	66

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Informations techniques du pont Paradis comme construit .....	10
Tableau 2.	Informations techniques du pont Paradis en acier-bois.....	10
Tableau 3.	Informations techniques du pont Lafarge hybride en bois .....	11
Tableau 4.	Informations techniques du pont Lafarge en acier-béton.....	12

Tableau 5. Éléments du bâtiment exclus des frontières du système à l'étude.....	15
Tableau 6. Indicateurs environnementaux considérés dans TRACI .....	17
Tableau 7. Composition du mix d'électricité modélisé .....	23
Tableau 8. Principaux matériaux du pont Paradis et distances parcourues .....	26
Tableau 9. Principaux matériaux du pont Lafarge et distances parcourues .....	26
Tableau 10. Transport (A4).....	27
Tableau 11. Facteur de rejet sur site [62].....	27
Tableau 12. Bilan des matériaux pour les scénarios de pont Paradis .....	28
Tableau 13. Bilan des matériaux pour le pont Lafarge et son scénario alternatif .....	28
Tableau 14. Classe de machinerie et durée d'opération pour les scénarios pont Paradis .....	30
Tableau 15. Classe de machinerie et durée d'opération pour les scénarios pont Lafarge .....	30
Tableau 16. Temps d'usage des machines par unité fonctionnelle .....	30
Tableau 17. Indicateurs de la qualité de données (adaptés de Weidema et al. [72]).....	32
Tableau 18. Critères d'évaluation qualitative de la qualité des données .....	32
Tableau 19. Écart minimal requis pour qu'une comparaison des scores d'impacts soit significative .....	34
Tableau 20. Illustration des durées de vie des matériaux – pont Paradis en bois [80].....	43
Tableau 21. Illustration des durées de vie des matériaux – pont Paradis en acier-bois [80].....	44
Tableau 22. Quantité de remplacement pour le pont Paradis.....	45
Tableau 23. Quantité de remplacement pour le pont Lafarge.....	45
Tableau 24. Transport des débris .....	45
Tableau 25. Transport des débris .....	46
Tableau 26. Émissions et absorptions de carbone biogénique associées au pont Paradis en bois .....	48
Tableau 27. Émissions et absorptions de carbone biogénique associées au pont Paradis en acier-bois .....	49
Tableau 28. Émissions et absorptions de carbone biogénique associées au pont Lafarge hybride en bois....	49
Tableau 29. Émissions et absorptions de carbone biogénique associées au pont Paradis en bois .....	51
Tableau 30. Émissions et absorptions de carbone biogénique associées au pont Paradis en acier bois .....	52
Tableau 31. Émissions et absorptions de carbone biogénique associées au pont Lafarge hybride en bois....	53
Tableau 32. Processus modélisant les produits du bois sur Ecoinvent .....	54
Tableau 33. Analyse de la qualité des données secondaires (A1-A3) .....	73
Tableau 34. Analyse de la qualité des données secondaires (A1-A3) .....	74
Tableau 35. Analyse de la qualité des données secondaires (A4-A5) .....	75
Tableau 36. Analyse de la qualité des données secondaires (A4-A5) .....	75
Tableau 37. Résultats impacts absolus comparatifs des scénarios du pont Paradis .....	76
Tableau 38. Résultats relatifs comparatifs des scénarios du pont Paradis .....	76
Tableau 39. Analyse de contribution des étapes de cycle de vie des scénarios du pont Paradis.....	76

Tableau 40. Résultats impacts absolus comparatifs des scénarios du pont Lafarge .....	77
Tableau 41. Résultats relatifs comparatifs des scénarios du pont Lafarge .....	77
Tableau 42. Analyse de contribution des étapes de cycle de vie des scénarios du pont Lafarge.....	77
Tableau 43. Impacts absolus des scénarios du pont paradis sous IMPACT 2002+ .....	79
Tableau 44. Impacts relatifs des scénarios du pont paradis sous IMPACT 2002+ .....	79
Tableau 45. Résultats des impacts absolus comparatifs des scénarios pont Paradis avec inclusion de la fin de vie.....	80
Tableau 46. Résultats relatifs comparatifs des scénarios du pont Paradis incluant l'étape de fin de vie .....	80
Tableau 47. Résultats impacts absolus comparatifs des scénarios du pont Lafarge incluant l'étape de fin de vie.....	81
Tableau 48. Résultats relatifs comparatifs des scénarios du pont Lafarge incluant l'étape de fin de vie .....	81
Tableau 49. Résultats des impacts absolus comparatifs des scénarios pont Paradis avec selon l'allocation économique .....	81
Tableau 50. Résultats relatifs comparatifs des scénarios du pont Paradis selon l'allocation économique.....	82
Tableau 51. Résultats impacts absolus comparatifs des scénarios du pont Lafarge selon l'allocation économique .....	82
Tableau 52. Résultats relatifs comparatifs des scénarios du pont Lafarge selon l'allocation économique.....	82
Tableau 53. Résultats absolus de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant -5% pour pont Paradis en bois et+30% pour pont Paradis en acier-bois .....	83
Tableau 54. Résultats relatifs de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant -5% pour pont Paradis en bois et+30% pour pont Paradis en acier-bois .....	83
Tableau 55. Résultats de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant +5% pour pont Paradis en bois et-30% pour pont Paradis en acier-bois .....	84
Tableau 56. Résultats relatifs de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant +5% pour pont Paradis en bois et-30% pour pont Paradis en acier-bois .....	84
Tableau 57. Résultats absolus de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant -5% pour pont Lafarge hybride en bois et+30% pour pont Lafarge en acier-béton.	84
Tableau 58. Résultats relatifs de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant -5% pour pont Lafarge hybride en bois et+30% pour pont Lafarge en acier-béton.	85
Tableau 59. Résultats absolus de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant +5% pour pont Lafarge hybride en bois et-30% pour pont Lafarge en acier-béton.	85
Tableau 60. Résultats relatifs de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant +5% pour pont Lafarge hybride en bois et-30% pour pont Lafarge en acier-béton.	86

## ABBREVIATIONS

ACV : Analyse du cycle de vie

DEP : Déclaration environnementale de produit, traduit de l'anglais *Environmental product declaration* ou EPD.

ÉICV : Évaluation des impacts de cycle de vie

GES : Gaz à effet de serre

ICV : Inventaire de cycle de vie

ISO : Organisation internationale de normalisation

RCP : Règles de catégorie des produits, traduit de l'anglais *Product Category Rules* ou PCR

## SOMMAIRE

Cette étude s'inscrit au chapitre des objectifs de la politique québécoise de l'intégration accrue du bois dans la construction, laquelle vise notamment à poursuivre le développement de connaissances sur le bois comme matériau à faible empreinte carbone et sur son intégration dans la construction de bâtiments et de ponts durables en bois.

Le contexte actuel est tel que le béton et l'acier sont des matériaux de construction largement utilisés dans des infrastructures civiles au Québec, mais depuis environ une décennie, les produits en bois d'ingénierie tels que le bois lamellé-croisé et le bois lamellé-collé, techniquement capables de remplacer ces derniers sont disponibles au Québec. Afin de promouvoir l'utilisation du bois dans les infrastructures publiques, il est nécessaire de confronter et d'analyser le rendement environnemental des infrastructures faites en lamellé-collé à celles faites en béton et en acier.

Cette étude a permis d'analyser les impacts de cycle de vie de « berceau à la porte » de deux types de ponts au Québec, à savoir le pont forestier (pont Paradis) et le pont routier (pont Lafarge). En mettant l'accent sur l'indicateur portant sur les émissions de gaz à effet de serre (GES), l'analyse d'impacts a permis de mettre en évidence le potentiel de réduction des émissions GES par l'inclusion accrue du bois dans la construction des infrastructures civiles telles que les ponts routiers et forestiers. Quatre systèmes ont été définis et analysés deux à deux, à savoir le pont Paradis en bois et son comparatif en acier-bois, ainsi que le pont Lafarge hybride en bois et son équivalent, pont Lafarge en acier-béton. En prenant en considération les écarts minimaux présentés au Tableau 19, une différence relative d'au moins 10 % est jugée significative pour l'indicateur de réchauffement climatique.

L'étude a montré qu'au Québec, les émissions GES du pont forestier en acier-bois sont plus importantes que celles du pont en bois fonctionnellement équivalent. L'inclusion du bois entraîne une réduction significative de 48 % des émissions de GES du « berceau à la porte ». Cependant, pour le pont routier, l'inclusion du bois entraîne une réduction de 25 % des émissions de GES du « berceau à la porte ».

De cette étude, il est ressorti que l'étape de production des matériaux est l'étape la plus contributrice aux impacts totaux des deux types de ponts étudiés. L'étape de production des matériaux représente 65 % des émissions du pont Paradis en bois, et 82 % des émissions du pont Paradis en acier-bois. Quant au pont Lafarge hybride en bois, la part de l'étape de production des matériaux s'élève à 87 %, alors qu'elle est de 89 % pour le pont Lafarge en acier-béton.

L'analyse de sensibilité sur une seconde méthode d'ÉICV a permis de valider la robustesse des résultats et des conclusions.

L'analyse de sensibilité autour des méthodes d'allocation a permis de comparer les résultats obtenus sous allocation massique pour les produits du bois et sous allocation économique pour les mêmes produits. L'analyse a montré que les réductions d'émissions GES respectives sont de 48 % et 44 % pour le pont Paradis. Alors que pour le pont Lafarge, les réductions d'émissions GES respectives sont de 25 % et 22 %.

Finalement, l'analyse de sensibilité aux bornes des intervalles d'incertitudes a permis de contraster les écarts minimaux requis pour que les réductions relatives des émissions de gaz à effet de serre (GES) entre

deux scénarios comparatifs soient considérées comme significatives. Il est ressorti que, dans le cas du pont Paradis, l'écart minimal de signifiante est de  $\pm 15,5$  %. En revanche, dans le cas du pont Lafarge, l'écart de signifiante est de  $\pm 28$  %. Les deux écarts minimaux obtenus sont supérieurs à l'écart de signifiante de 10 % présenté au Tableau 19. En considérant les écarts minimaux obtenus par analyse de sensibilité, la réduction est significative pour le pont Paradis en bois et non significative pour le pont Lafarge hybride en bois.

## 1. INTRODUCTION

Le béton serait la deuxième substance la plus utilisée sur la planète (après l'eau), et l'un des matériaux dont l'extraction et la production présentent pourtant un bilan conséquent d'un point de vue des impacts environnementaux [1]. Le ciment, ingrédient clé dans la production de béton, est responsable d'environ 8 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) [2]. L'acier, de son côté, est le matériau d'ingénierie le plus important au monde. Il est utilisé dans tous les aspects de la vie humaine [3]. La tonne d'acier produite en 2018 a émis en moyenne 1,85 t de GES, ce qui équivaut à environ 8 % des émissions mondiales de GES [4].

Le secteur de la construction est l'une des industries les plus consommatrices de béton et d'acier, consommant près de 60 % de l'ensemble de la demande mondiale en béton et plus de 50 % de la demande mondiale en acier [5, 6].

Alors que la population mondiale continue de croître, les nations du monde entier cherchent à améliorer leur niveau de vie, et il semble tout à fait inévitable que la consommation de béton et d'acier pour façonner le futur environnement bâti continuera d'augmenter avec la croissance démographique. Il existe un besoin urgent pour le secteur de la construction de trouver des matériaux alternatifs qui peuvent aider l'industrie à améliorer ou réduire son empreinte environnementale. Parmi les matériaux alternatifs potentiels, le bois pourrait être un excellent candidat.

Ce projet vise à promouvoir l'utilisation du bois dans les infrastructures publiques. Il s'inscrit bien au chapitre des objectifs de la politique québécoise de l'intégration accrue du bois dans la construction, laquelle vise notamment à « poursuivre le développement de connaissances sur le bois comme matériau à faible empreinte carbone et sur son intégration dans la construction de bâtiments et de ponts durables en bois » [7]. Celle-ci s'aligne aussi bien avec le rapport Beaulieu qu'avec la Charte du bois du gouvernement du Québec, laquelle promeut la valorisation de la ressource forestière dans la construction tout en renforçant la filière québécoise à développer et acquérir de nouvelles compétences en construction en bois [8, 9].

Étant donné que le béton et l'acier sont largement utilisés dans des infrastructures civiles au Québec et que les produits en bois d'ingénierie tels que le bois lamellé-croisé et le bois lamellé-collé, techniquement capables de remplacer ces derniers, ne sont disponibles au Québec que depuis 10 à 12 ans [10], il paraît tout à fait pertinent de confronter le rendement environnemental des infrastructures faites en lamellé-collé à celles faites en béton et en acier.

## 2. ÉQUIPE DU PROJET

FPIinnovations souhaite souligner la contribution des partenaires ayant contribué à ce projet. Ils sont répertoriés par organisation ci-dessous.

### Nordic Structures

Louis-Philippe Dumont – Ingénieur, services techniques

Julie Frappier – Directrice, services techniques

Williams Munoz – Services techniques

### Hexaki – Génie-Conseil

Denis Lefebvre – Ingénieur

### Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP)

Jean-Frédéric Grandmont – Gestionnaire

Julien Brousseau – Ingénieur

### FPIinnovations (FPI)

Dieudonné Batsy – Chercheur, Groupe bioraffinage et procédés

Vincent Blanchard – Gestionnaire, Groupe bioraffinage et procédés

## 3. ÉTUDE DE CAS

### 3.1 Ponts forestiers

Au Québec, les ponts forestiers, aussi appelés ponts sur chemins multiusages, sont des ponts situés hors du réseau routier régi par le ministère des Transports du Québec (MTQ). Ces ponts sont construits et administrés par le MFFP qui en possède plus d'une centaine, bâtie en lamellé-collé. La fonction principale d'un pont forestier est de permettre l'accès au territoire forestier québécois et à ses ressources. La fonction secondaire de ce type de pont est de servir de voies d'accès au territoire public pour diverses activités telles que l'aménagement forestier, la cueillette de produits forestiers, la chasse, la pêche et bien d'autres activités [11, 12].

Dans le cadre de cette étude, le pont Paradis en acier-bois a été identifié comme pont forestier de référence pour une analyse de cycle de vie comparative avec le pont forestier comme construit, fonctionnellement équivalent, conçu en bois (voir Figure 1).

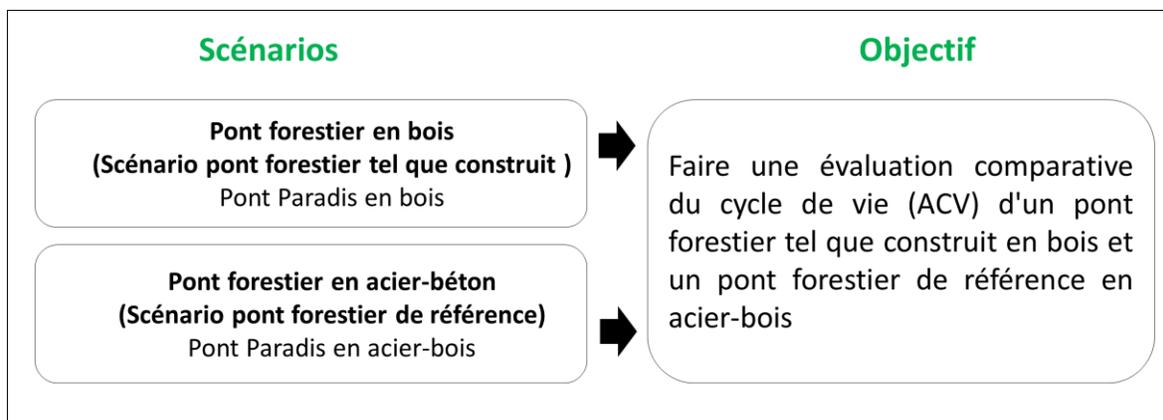


Figure 1. Scénarios comparatifs du pont forestier Paradis

La Figure 2 illustre le pont Paradis localisé aux coordonnées N 50°40'51", W 68°56'02". Le pont surplombe la rivière Paradis. Construit en 2021, le pont Paradis est conçu avec une structure en bois massif (lamellé-croisé et lamellé-collé). C'est un pont de 20,5 m de long et de 4,9 m de large, soit une superficie d'environ 100 m<sup>2</sup>.



**Pont forestier : rivière Paradis**

**Localisation : N 50°40'51", W 68°56'02"**

**Année de construction : 2021**

**Structure : pont à poutres assemblées (trois assemblages de deux poutres) en bois lamellé-collé supportant des traverses 8" x 8" en bois de sciage traité pruche-sapin n°1, espacées à 400 mm centre à centre**

**Longueur : 20,5 m et largeur : 4,9 m**

**Superficie brute : 100 m<sup>2</sup>**

Figure 2. Pont Paradis comme construit

### 3.2 Ponts routiers

À l'inverse, un pont routier est un pont supportant une route pour la traversée des automobiles. De fait, la fonction principale d'un pont routier est de permettre le franchissement d'un obstacle afin d'assurer la continuité d'une route et d'assurer aux usagers (automobiles) la possibilité de poursuivre leur route au-delà de l'obstacle. Au Québec, le MTQ considère tout pont routier comme un ouvrage d'art, ce qui en fait la fonction secondaire [11, 13]. Au Québec, les ponts routiers sont les ponts situés sur le réseau routier régi par le MTQ. D'ailleurs, le MTQ est tributaire de plusieurs ponts en bois. Il est également tributaire de nombreux ponts acier-bois repartis sur le territoire québécois [12].

Le pont Lafarge en acier-béton a été identifié comme pont routier de référence pour une analyse de cycle de vie comparative avec le pont routier hybride comme construit, fonctionnellement équivalent, conçu en bois (voir Figure 3). Le pont Lafarge en bois a été identifié comme pont hybride, car celui-ci contient une quantité considérable de béton et d'acier au niveau des fondations de l'infrastructure. Dans la suite du rapport, ce scénario de pont est identifié comme pont Lafarge hybride en bois.

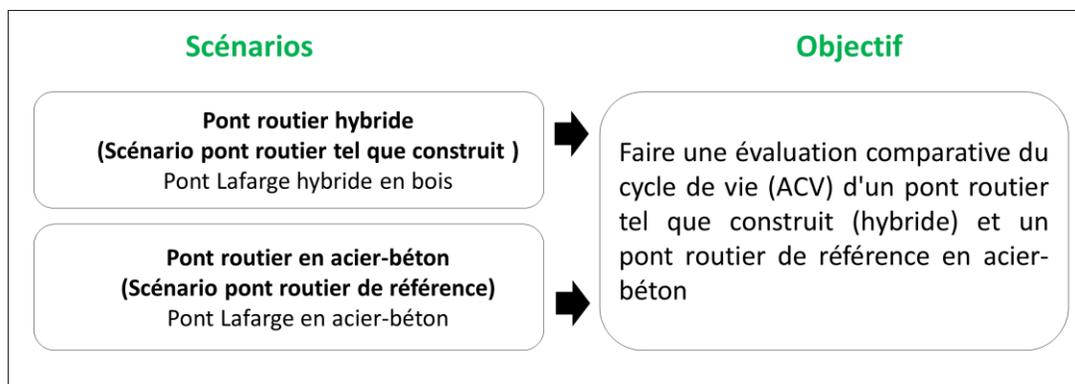


Figure 3. Scénarios comparatifs du pont routier Lafarge

La Figure 4 illustre le pont Lafarge hybride en bois. Construit en 2021, le pont Lafarge est constitué d'arches en bois lamellé-collé, de diaphragmes en bois lamellé-croisé et de culées en béton armé. C'est un pont de 29 m de long et de 12 m de large, soit une superficie de 348 m<sup>2</sup>.



**Pont routier : Lafarge**

**Localisation : près du Complexe aquatique Saint-Constant**

**Année de construction : 2021**

**Structure : pont en arche en bois lamellé-collé supportant un tablier en bois lamellé-collé et appuyé sur des culées en béton armé**

**Longueur : 29 m et largeur : 12 m**

**Superficie brute : 348 m<sup>2</sup>**

Figure 4. Pont Lafarge comme construit

## 4. ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV)

L'analyse du cycle de vie (ACV) est une méthode qui permet d'identifier et d'inventorier les flux environnementaux (intrants et extrants) d'un système de produits donné tout au long de son cycle de vie. L'ACV utilise ainsi les flux inventoriés pour évaluer les impacts environnementaux potentiels associés au système de produits. L'ACV est une méthodologie encadrée par les normes ISO 14040 et ISO 14044. Le cadre comprend quatre étapes comme présentées à la Figure 5, à savoir : objectifs et champ d'étude, inventaire du cycle de vie, évaluation de l'impact du cycle de vie (ÉICV) et interprétation. Les quatre étapes sont décrites à l'annexe I.

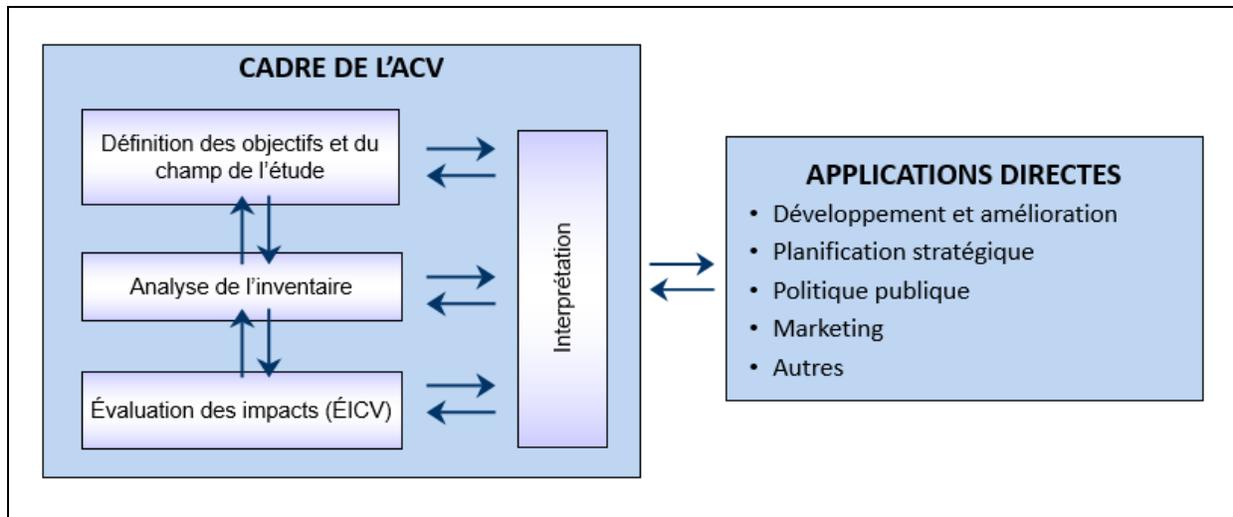


Figure 5. Étapes méthodologiques de l'analyse de cycle de vie (source : [14])

## 4.1 Objectifs et champ d'étude

### 4.1.1 Objectifs

La présente étude vise à étudier le potentiel de réduction des GES qu'il est possible d'atteindre en utilisant des structures en bois massif (p. ex., bois lamellé-croisé et bois lamellé-collé) dans la construction des ponts. L'objectif de cette étude est de comparer l'incidence environnementale de deux types de ponts utilisés en milieu urbain au Québec (ponts forestiers et ponts routiers). En effet, l'étude porte sur la quantification et la comparaison des émissions de gaz à effet de serre (GES) de chaque type de ponts faits en bois avec son équivalent fait en acier-bois ou en acier-béton. Plus précisément, cette étude vise à :

- faire une évaluation comparative du cycle de vie (ACV) d'un pont forestier en bois et un pont forestier de référence en acier-bois
- faire une évaluation comparative du cycle de vie (ACV) d'un pont routier hybride en bois et un pont de référence en acier-béton

### 4.1.2 But de l'étude

Cette étude est motivée par l'intérêt de mettre à profit les infrastructures civiles telles que les ponts, et l'industrie de la construction de manière générale, au service de la lutte aux changements climatiques et du développement durable. Le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) porte un intérêt particulier sur les études visant le développement des connaissances sur les matériaux sobres en carbone. De plus, ce projet s'inscrit bien au chapitre de la politique de l'intégration accrue du bois dans la construction. Cette politique s'étend aux infrastructures publiques et parapubliques qui incluent les infrastructures telles que les ouvrages de génie civil [7]. Étant donné que l'utilisation du bois est en croissance dans la construction, et que sa contribution à la réduction d'impacts environnementaux est de plus en plus reconnue dans la littérature [15, 16]. Vu que le béton et l'acier sont largement utilisés dans des infrastructures civiles au Québec et que les matériaux en bois (bois lamellé-croisé et bois lamellé-collé) techniquement capables de les remplacer sont de plus en plus disponibles au Québec, il semble tout à fait

pertinent de comparer les impacts environnementaux des deux types d'infrastructures : celles faites en bois avec celles faites en acier-bois et en acier-béton.

#### **4.1.3 Auditoire visé**

Cette étude est réalisée pour le MFFP. L'auditoire visé regroupe aussi bien les ingénieurs concepteurs de ponts au sein du ministère que les chercheurs impliqués dans le programme de développement des connaissances sur les matériaux à faibles empreintes carbone. Cet auditoire est considéré comme étant non technique d'un point de vue d'analyse de cycle de vie. Ce rapport ne fera pas l'objet d'une révision par un comité externe formé par les parties intéressées. Une revue critique avec panel ne sera pas réalisée non plus, mais un expert a été mandaté pour évaluer la qualité du rapport et sa conformité aux normes établies telles que la série des normes ISO 14040 et 14044 (voir section 4.2.13). Cette étude ne vise pas à appuyer des affirmations comparatives destinées à être divulguées au public.

#### **4.1.4 Applications prévues et portée de l'étude**

Les résultats de cette étude serviront à donner un aperçu des émissions potentielles de GES associées aux ponts routiers et forestiers. Les résultats de cette étude pourront aider les professionnels du domaine de la construction tels que les ingénieurs, architectes, etc., à faire des choix avisés en conception structurale (éléments structuraux) et architecturale (matériaux et finitions). En outre, cette étude s'aligne bien avec l'objectif 5 de la politique québécoise d'intégration du bois, lequel vise notamment à « poursuivre le développement de connaissances sur le bois comme matériau à faible empreinte carbone et sur son intégration dans la construction de bâtiments et de ponts durables en bois » [7].

## **4.2 Champ de l'étude**

### **4.2.1 Description des systèmes**

#### **4.2.1.1 Pont forestier rivière Paradis et ses caractéristiques techniques**

Le pont forestier en acier-bois requiert une surface de roulement avec des traverses 8 x 8 collé avec une structure d'acier, alors que le pont comme construit, quant à lui, requiert des traverses 8 x 8 espacé à 400 mm. La différence entre les types de platelages est justifiée par le fait que le pont comme construit compte six poutres de bois lesquelles contribuent à diminuer la portée transversale des platelages. La norme qui a été appliquée dans la conception est la norme relative aux ponts et aux ouvrages amovibles dans les forêts du domaine de l'État, laquelle s'appuie sur la norme CSA S6 :19. La conception des ponts a été faite avec le même critère de flèche de  $L/600$ . Les fondations des deux ponts n'ont pas été prises en considération dans la comparaison des systèmes. En effet, dans les deux cas, le poids total des édifices est pratiquement identique (voir Annexe II). Les Tableau 1 et Tableau 2 présentent les informations techniques des scénarios de ponts.

Tableau 1. Informations techniques du pont Paradis comme construit

<b>Pont Paradis en bois</b>	<b>Information sur la conception technique</b>
Charge de conception	CL3-30t; CL2-50t et CF3E-70t
Critère de flèche	L/600
Durée de vie de conception	50 ans
Longueur	20,5 m (longueur des poutres)
Largeur	4,9 m
Superficie de l'aire de travail	100 m <sup>2</sup>
Matériaux du tablier	Surface de roulement en bois de sciage traité pruche-sapin n°1/n°2 avec traverses 8" x 8" en bois de sciage traité pruche-sapin n°1, espacées à 400 mm centre à centre, plus membrane d'étanchéité
Matériaux de superstructure	Trois assemblages de deux poutres en bois lamellé-collé avec pièces d'écartement en bois lamellé-collé et entremises en bois lamellé-croisé
Matériaux de sous-structure	Culées en bois de sciage traité, fermées sur trois faces plus acier
Normes de conception	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Code canadien sur le calcul des ponts routiers, CSA S6-14</li> <li>▪ Règles de calcul des charpentes en bois, CSA O86-14 (supplément 2016)</li> <li>▪ Règles de calcul des charpentes en acier, CSA S16-14</li> <li>▪ Norme relative aux ponts et aux ouvrages amovibles dans les forêts du domaine de l'État (avril 2020)</li> <li>▪ Règlement sur l'aménagement durable des forêts du domaine de l'État</li> </ul>

Tableau 2. Informations techniques du pont Paradis en acier-bois

<b>Pont en Paradis en acier-bois</b>	<b>Information sur la conception technique</b>
Charge de conception	CL3-30t; CL2-50t and CF3E-70t
Critère de flèche	L/600
Durée de vie de conception	50 ans
Longueur	20,5 m (longueur des poutres)
Largeur	4,9 m
Superficie de l'aire de travail	100 m <sup>2</sup>
Matériaux du tablier	Surface de roulement en bois de sciage traité pruche-sapin n°1/n°2 avec traverses 8" x 8" en bois de sciage traité pruche-sapin n°1, espacées à 200 mm centre à centre (traverses collées)
Matériaux de superstructure	Trois poutres d'acier
Matériaux de sous-structure	Culées en bois de sciage traité, fermées sur trois faces plus acier
Normes de conception	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Code canadien sur le calcul des ponts routiers, CSA S6-14</li> <li>▪ Règles de calcul des charpentes en bois, CSA O86-14 (supplément 2016)</li> <li>▪ Règles de calcul des charpentes en acier, CSA S16-14</li> <li>▪ Norme relative aux ponts et aux ouvrages amovibles dans les forêts du domaine de l'État (avril 2020)</li> <li>▪ Règlement sur l'aménagement durable des forêts du domaine de l'État</li> </ul>

#### 4.2.1.2 Pont routier Lafarge et ses caractéristiques techniques

Afin de conserver des points de comparaison le plus juste, les éléments architecturaux pour les deux projets ont été conservés. Les glissières architecturales et les murs Ter-Voile sont les mêmes dans les deux inventaires. Il y a quand même une différence architecturale entre les deux solutions, puisque le pont en bois est formé d'arches et de poutres droites alors que le pont en acier-béton est formé de poutres droites seulement. L'ajout d'arches dans la solution bois demande une quantité d'acier importante pour les tourillons. La quincaillerie pour l'éclairage DEL (câblage, lampadaire, contrôle électrique) n'est pas incluse et n'apporterait pas de différence, car l'on a supposé que l'éclairage aurait été le même pour les deux ponts. Les informations et caractéristiques techniques des deux systèmes comparés sont présentées dans les Tableau 3 et Tableau 4.

Tableau 3. Informations techniques du pont Lafarge hybride en bois

Pont Lafarge hybride en bois	Information sur la conception technique
Charge légale	CL-625
Critère de flèche	1/1000 (max 28 mm)
Flèche obtenue	1/1650 (max 17 mm)
Sismique	Catégorie : autre PGA = 0,375, 2 % sur 50 ans
Durée de vie de conception	75 ans
Longueur	29 m (longueur des poutres)
Largeur	12 m
Superficie de l'aire de travail	348 m <sup>2</sup>
Matériaux du tablier	Platelage en bois lamellé-collé, membrane d'étanchéité et enrobé d'asphalte pour pavage
Matériaux de superstructure	Bois lamellé-collé (arches et poutres droites), bois lamellé-croisé (diaphragmes), contreplaqué
Matériaux de sous-structure	Gravier, béton et acier
Normes de conception	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ CAN/CSA S6-14</li> <li>▪ CCDG 2019</li> <li>▪ Manuel de conception des structures 2019 (MTQ)</li> <li>▪ CAN/CSA O86-14</li> </ul>

Tableau 4. Informations techniques du pont Lafarge en acier-béton

Pont Lafarge en acier-béton	Information sur la conception technique
Charge légale	CL-625
Critère de flèche	1/1000 (max 28 mm)
Flèche obtenue	1/1650 (max 17 mm)
Sismique	Catégorie : autre PGA = 0,375, 2 % sur 50 ans
Durée de vie de conception	75 ans
Longueur	29 m (longueur des poutres)
Largeur	12 m
Superficie de l'aire de travail	348 m <sup>2</sup>
Matériaux du tablier	Platelage en plaques d'acier, membrane, d'étanchéité et enrobé d'asphalte pour pavage
Matériaux de superstructure	Béton et acier
Matériaux de sous-structure	Gravier, béton et acier
Normes de conception	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ CAN/CSA S6-14</li> <li>▪ CCDG 2019</li> <li>▪ Manuel de conception des structures 2019 (MTQ)</li> <li>▪ CAN/CSA O86-14</li> </ul>

#### 4.2.1.3 Durée de vie des ponts

La norme S6 de l'Association canadienne de norme (CSA) est la norme qui a été appliquée dans la conception des ponts deux types de ponts [17, 18]. En effet, selon ladite norme, et ce, lors de la conception d'un pont routier, une durée de vie de 75 ans doit être prévue dans le cahier de charge [18]. En revanche, pour les ponts forestiers, aucune exigence n'est actuellement prescrite par le Règlement sur l'aménagement durable des forêts du domaine de l'État (RADF). Toutefois, l'annexe 4 dudit règlement prévoit jusqu'à 50 ans la durée d'utilisation des ponts forestiers [19]. De plus le RADF estime entre 40 ans et 50 ans la durée de vie des culées en bois, de type caisson rempli de pierres, entretenu et maintenu dans les meilleures conditions. À cet effet, 50 ans semblent être une durée de vie maximale cible pour les ponts forestiers au Québec [12].

#### 4.2.2 Fonctions et unités fonctionnelles

La fonction est l'élément essentiel dans une étude comparative d'ACV. Pour qu'une comparaison soit possible entre deux systèmes, il faut que ces derniers aient une fonction principale commune, même si les fonctions secondaires de l'un peuvent être différentes de celles de l'autre [20]. L'unité fonctionnelle établit une base de comparaison appropriée entre des systèmes fonctionnellement équivalents.

Dans le cadre de cette étude, deux fonctions principales sont analysées. La fonction principale relative au pont forestier est de permettre aux usagers d'avoir accès au territoire forestier québécois et à ses ressources. La fonction principale relative au pont routier est de permettre le franchissement d'un obstacle quelconque afin d'assurer aux usagers (automobiles) la possibilité de poursuivre leur route au-delà de l'obstacle.

Les fonctions secondaires pouvant être liées aux ponts forestiers et routiers ne sont pas prises en compte dans cette étude. La fonction secondaire du pont forestier est de servir de voies d'accès au territoire public pour diverses activités telles que l'aménagement forestier, la cueillette de produits forestiers, la chasse, la pêche et bien d'autres activités. Le pont routier ou ouvrage d'art permet aussi bien de transformer un environnement que de soutenir une paroi rocheuse, ou d'assurer la jonction entre deux rives quelconques.

Dans le cadre du pont forestier, l'unité fonctionnelle choisie pour les deux conceptions comparées est le mètre carré (1 m<sup>2</sup>) d'un pont forestier donnant accès au territoire forestier québécois et à ses ressources et ayant la capacité de supporter une gamme de charges utiles CL3-30t, CL2-50t et CF3E-70t pendant 50 ans.

Dans le cadre du pont routier, l'unité fonctionnelle choisie pour les deux conceptions comparées est le mètre carré (1 m<sup>2</sup>) d'un pont routier assurant le franchissement d'obstacles aux usagers, et capable de supporter une charge utile de CL-625 pendant 75 ans.

### **4.2.3 Frontières du système à l'étude**

La Figure 6 présente, en conformité avec les normes EN 15804 et EN 15978, les étapes du cycle de vie incluses dans les frontières du système d'une infrastructure donnée. Les étapes vont de l'étape de production des matériaux essentiels à l'érection de l'infrastructure jusqu'à l'étape de fin de vie, c'est-à-dire l'étape de démolition et démantèlement de l'infrastructure.

L'analyse du cycle de vie d'un pont est subdivisée en quatre étapes, chacune comprenant plusieurs modules d'information selon la norme EN 15978 [21]. Ainsi, l'étape de production des matériaux comprend trois modules d'information : A1, A2, et A3, lesquels réfèrent respectivement à l'extraction, au transport et à la transformation des matières premières. L'étape de construction du pont comprend deux modules d'informations A4 et A5. Le module A4 réfère au transport des matériaux du site du manufacturier vers le site d'érection, tandis que le module A5 réfère aux activités de construction proprement dites sur le site. L'étape d'utilisation du pont comprend sept modules d'informations allant de B1 à B7, lesquels réfèrent respectivement à l'utilisation, la maintenance, la réparation, le remplacement, la réhabilitation, l'utilisation de l'énergie et l'utilisation de l'eau. L'étape de fin de vie d'un pont comprend quant à elle quatre modules d'informations allant de C1 à C4, lesquels réfèrent respectivement à la démolition, le transport des déchets issus de la démolition, le traitement des déchets et l'élimination des déchets par incinération ou par enfouissement.

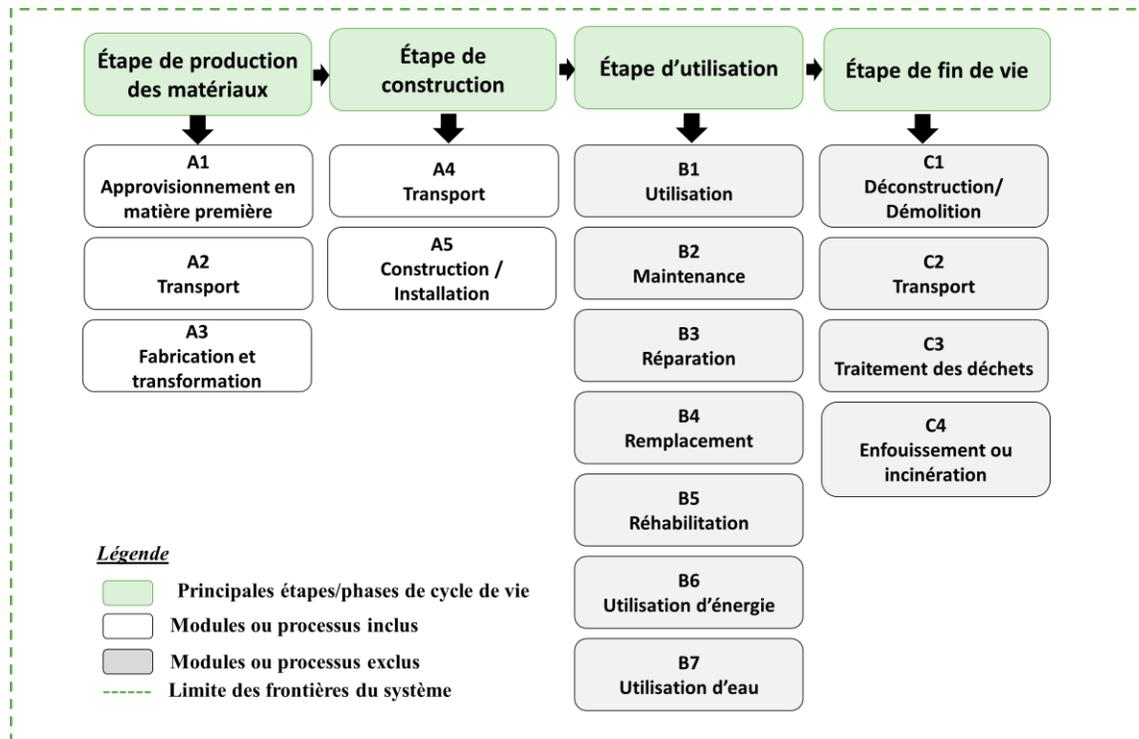


Figure 6. Frontières du système (du berceau à la porte)

Cette étude a une portée allant du « berceau à la porte », c'est-à-dire, ne couvre que les étapes du cycle de vie allant de l'étape de production des matériaux (A1) à l'étape d'érection du pont (A5). La Figure 6 illustre les modules inclus et exclus des frontières du système à l'étude. Les modules colorés en gris ont été exclus de l'analyse, car le mandat rattaché à cette étude ne couvre pas le temps et les ressources nécessaires pour collecter les données associées à ces modules d'informations. Il s'agit notamment des modules associés aux étapes d'utilisation et de fin de vie. De plus, les infrastructures de ponts en bois massif non couverts sont très récentes au Québec [11, 12]. De fait, il y a présentement un manque de données relatives aux méthodes d'entretien de ces ponts. Il y a aussi un manque de données relatives à la fréquence d'intervention et d'entretien des différents matériaux exposés aux intempéries dans ces types de ponts. C'est entre autres pour ces différentes raisons que l'auteur a choisi d'exclure ces étapes dans l'analyse. Néanmoins, il est important de reconnaître que l'exclusion de ces deux étapes de cycle de vie peut avoir une incidence non négligeable sur les conclusions de cette étude. La récente étude comparative menée par Cobut sur les ponts construits en Colombie-Britannique a révélé une faible contribution aux impacts de l'étape de fin de vie (3 % à 4 %). En revanche, l'étape de maintenance des ponts a révélé une contribution significative comprise entre 35 % et 60 % [22].

Les fondations pour les scénarios associés au pont forestier ont été exclues de l'étude, car les calculs de conception exécutés par la firme Hexaki ont révélé que les deux infrastructures ont quasiment des poids totaux égaux (34,43 tonnes contre 33,39 tonnes). De fait, une fondation ayant les mêmes caractéristiques (acier-béton) aurait été mise en place sans le moindre changement au niveau des contraintes de charge portante et contrainte de cisaillement. Ainsi, comparativement au pont Paradis comme construit, le pont de référence Paradis en acier-bois ayant la même capacité portante, même critère flèche et même total

au niveau des matériaux aurait eu une fondation similaire. En génie civil, le poids de l'édifice est le facteur déterminant dans la définition des caractéristiques de la fondation et la conception des poutres porteuses du poids de l'édifice. Le bilan détaillé des matériaux et le poids total des deux édifices qui sous-tendent l'hypothèse d'exclusion sont présentés en Annexe II.

En revanche, pour les scénarios comparables relatifs au pont routier, les fondations et les culées ont été prises en considération, car les scénarios des deux infrastructures présentent une grande variabilité au niveau du poids des matériaux.

Aussi, en vue de s'assurer de la pertinence des ponts à remplir adéquatement les fonctions secondaires d'œuvres d'art (confort et esthétisme extérieurs), un effort est censé être mis en œuvre par les services d'ingénierie et d'architecture afin d'assurer la quasi-similarité des finitions et décorations (p. ex., moulures décoratives, panneaux de signalisation, filage électrique et luminaires, peinture de finition pour bois et métaux et traitements spéciaux du bois en vue de l'exposer comme œuvres d'art).

Les processus relatifs aux services offerts par les ingénieurs et les architectes, le transport des travailleurs et professionnels ainsi que le transport de la machinerie lourde et légère vers le chantier de construction (p. ex., les grues, les véhicules, etc.) ont été exclus des limites du système pour la simple raison que les données ne sont pas disponibles. En revanche, l'usage (c.-à-d. la consommation énergétique des machines, sous toutes les formes) de quelques machineries bien identifiées sur les sites a été pris en compte dans l'analyse.

Par ailleurs, les perturbations et les impacts attribuables aux mouvements de détours et l'intensité des activités durant l'étape de construction sont jugés similaires entre les options comparées. Par exemple, la signalisation routière, la connexion routière et les travaux de terrassement ne devraient pas être différents que le pont soit construit en bois ou en acier-bois. De plus, pour un même site, si le test d'interchangeabilité des scénarios alternatifs était effectué, la connexion routière et les panneaux routiers associés ne seraient pas différents pour un scénario comme pour l'autre.

Tableau 5. Éléments du bâtiment exclus des frontières du système à l'étude

Liste des éléments exclus
Fondations : les fondations ont été exclues seulement pour l'étude de cas portant sur le pont Paradis
Finis décoratifs
Finis sur les matériaux et les traitements spéciaux (peintures sur bois et sur métaux)

#### 4.2.4 Critères de délimitation de l'étude

Les critères de délimitation du système (de l'anglais *cut-off*) sont essentiels en ACV, car ils permettent d'appliquer certaines règles de cohérence dans la définition des limites du système à l'étude. Il y a trois règles fondamentales pour définir les limites de l'étude [23]. La première règle stipule que les limites du système doivent couvrir la même réalité fonctionnelle dans les différents scénarios. Cette règle permet de vérifier si les scénarios à l'étude remplissent parfaitement la même fonction à l'intérieur des frontières du

système défini. Dans la sous-section 4.2.1.3, il a été démontré que chaque type de ponts identifiés offrait un approvisionnement adéquat des fonctions principales, et ce, à l'identique entre scénarios comparables.

La seconde règle stipule que les processus contribuant à plus d'un certain pourcentage de la masse des intrants, de la consommation énergétique ou des émissions d'un polluant sont retenus, le seuil de rétention des processus étant préalablement fixé. Cette règle détermine, lors d'une évaluation préliminaire des impacts, un ordre de grandeur et de la contribution de différents processus afin d'en éliminer ceux ne respectant pas le seuil fixé. Toutefois, il n'est pas toujours évident de fixer la valeur seuil de façon claire, car elle dépend du système étudié. Dans le cadre de cette étude, le critère seuil d'exclusion, généralement fixé autour de 1 % à 3 % sur une base massique des intrants du système, ne sera pas appliqué [23]. En effet, les ponts présentent une grande variabilité au niveau des contributions massiques des matériaux. Par exemple, le poids total de certains matériaux très légers tels que les membranes, le caoutchouc et le néoprène est généralement négligeable comparativement au poids total de l'infrastructure. Néanmoins, la contribution aux impacts de ces matériaux légers est non négligeable. Le seuil d'exclusion n'a pas été appliqué dans cette étude.

Bien que le seuil d'exclusion n'ait pas été fixé, les firmes spécialisées mandatées à produire les inventaires détaillés ont mis en œuvre un effort pour couvrir le maximum de matériaux et d'éléments constitutifs des scénarios analysés. Nonobstant l'effort mis par ces firmes, il est impossible d'affirmer avec certitude que tous les matériaux ont été couverts par l'inventaire. En revanche, il n'y a aucune raison de penser que la somme totale des matériaux ou d'éléments qui n'a pas été couverte par les inventaires de chaque scénario a une contribution massique, énergétique ou une pertinence environnementale significative ou supérieure à 5 %.

Au lieu de s'appuyer sur un critère de coupure seuil en particulier, les procédures utilisées pour développer les inventaires du cycle de vie dans cette étude fournissent un niveau de détail assez élevé pour 1) assurer la transparence de l'étude et 2) permettre un examen critique plus approfondi par les lecteurs intéressés. Tous les efforts ont été faits pour 1) inclure des matériaux qui ne sont pas exclus pour des raisons d'équivalence entre systèmes et 2) atteindre les objectifs de l'étude, lesquels consistent à identifier les différences relatives du rendement du cycle de vie entre les systèmes comparés.

La troisième règle stipule que les étapes de cycle de vie, ainsi que les processus jugés identiques dans les différents scénarios, peuvent être exclues dans la mesure où les flux de référence affectés par ces étapes sont considérés comme équivalents. Cette règle est celle qui a été appliquée à la sous-section 4.2.1.3. En effet, l'extension de cette règle aux ponts forestiers a permis d'exclure les fondations et autres éléments illustrés au Tableau 5.

#### **4.2.5 Sources de données**

Cette étude a eu recours à plusieurs sources ou base de données. Il existe deux sources de données utilisées en ACV : les données primaires et les données secondaires.

Les données primaires sont les données spécifiques utilisées pour décrire et modéliser l'avant-plan. Dans le cadre de cette étude, l'avant-plan fait référence aux étapes de construction. Ces données sont obtenues par l'analyse des bilans de matières, la lecture des plans, les échanges et communications avec les

ingénieurs et architectes. Toutefois, lorsque la quête des données primaires n'est pas concluante, les données secondaires sont utilisées.

Les données secondaires, quant à elles, sont généralement celles utilisées pour décrire et modéliser l'arrière-plan. Dans cette étude, l'arrière-plan (de l'anglais *upstream*) fait référence à l'étape de production et de fabrication des matériaux. Les données secondaires sont des données génériques, disponibles et accessibles à travers différentes bases de données spécialisées développées par des experts. Les principales sources de données secondaires utilisées dans cette étude sont principalement la base de données ecoinvent v3.5 et la base de données DATASMART [24-27].

#### 4.2.6 Qualité des données

La qualité des données est intrinsèquement liée à la qualité des bases de données utilisées pour modéliser l'avant-plan et l'arrière-plan. La qualité des données collectées est présentée dans la section collecte de données primaires (section 5.1) et la section analyse de la qualité des données (section 0).

#### 4.2.7 Méthodes d'évaluation d'impact de cycle de vie (ÉICV) et catégories d'impacts

Cette section présente sommairement la méthode ÉICV utilisée pour l'évaluation des impacts environnementaux potentiels des scénarios.

##### 4.2.7.1 TRACI

La méthode utilisée pour cette évaluation est TRACI (*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts*), développée par l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA). TRACI permet de caractériser les flux d'inventaires en utilisant des facteurs de caractérisation spécifiques à l'Amérique du Nord [28]. La version 2.1 de TRACI a été utilisée pour caractériser les flux d'inventaires. Les catégories d'impacts ci-dessous ont été choisies pour décrire l'ensemble des impacts potentiels sur l'environnement du cycle de vie du système étudié (Tableau 6).

Tableau 6. Indicateurs environnementaux considérés dans TRACI

Catégorie d'impacts	Unité
Réchauffement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11
Formation de smog photochimique	kg éq. O <sub>3</sub>
Acidification	kg éq. SO <sub>2</sub> eq
Eutrophisation	kg éq. N
Effets respiratoires	kg éq. PM 2.5
Écotoxicité	CTUe
Épuisement des ressources fossiles	MJ surplus

#### 4.2.7.1.1 Réchauffement climatique

Le réchauffement climatique correspond à l'augmentation de la température moyenne de la surface de la Terre résultant de l'augmentation des émissions de GES telles que le dioxyde de carbone, le méthane, les oxydes nitreux, etc. Les GES captent la chaleur qui autrement s'échapperait de la Terre. Le réchauffement climatique est exprimé en kg d'équivalent CO<sub>2</sub> (kg éq. CO<sub>2</sub>).

#### 4.2.7.1.2 Appauvrissement de la couche d'ozone

Les substances qui appauvrissent la couche d'ozone, telles que les chlorofluorocarbones (CFC) et (CFC-11), entraînent une réduction de la couche d'ozone protectrice dans l'atmosphère. La réduction de l'ozone dans la stratosphère entraîne une augmentation du rayonnement ultraviolet-B atteignant la Terre, ce qui peut avoir des effets sur la santé humaine et endommager les cultures, les matériaux et la vie marine. Le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone est indiqué en kg équivalent de CFC-11.

#### 4.2.7.1.3 Formation de smog photochimique

Dans certaines conditions climatiques, les émissions atmosphériques (oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et les composés organiques volatils (COV)) provenant de l'industrie et du transport peuvent être piégées au niveau du sol. En présence de lumière solaire, ils produisent de l'ozone proche de la surface du sol (troposphère) appelée *smog photochimique*, symptôme du potentiel de création photochimique de l'ozone. L'indicateur *smog* est exprimé en kg équivalent d'ozone (kg éq. O<sub>3</sub>).

#### 4.2.7.1.4 Acidification

L'acidification a une incidence plus régionale que mondiale qui affecte la qualité des sources et la santé des humains lorsque de fortes concentrations de SO<sub>2</sub> sont atteintes. L'acidification est le résultat de processus qui contribue à augmenter l'acidité de l'eau. Les pluies acides réduisent généralement l'alcalinité des lacs.

Le terme *pluie acide* est un terme général désignant un mélange de dépôts secs et humides (matériaux déposés) de l'atmosphère contenant des quantités supérieures à la normale d'acides nitrique et sulfurique. Les précurseurs, ou précurseurs chimiques, de la formation de pluies acides résultent à la fois de sources naturelles, telles que les volcans et la végétation en décomposition, et de sources synthétiques, principalement des émissions de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) et d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) résultant de la combustion de combustibles fossiles. Les pluies acides se produisent lorsque ces gaz réagissent dans l'atmosphère avec de l'eau, de l'oxygène et d'autres produits chimiques pour former divers composés acides. Le résultat est une solution douce d'acide sulfurique et d'acide nitrique. Lorsque du dioxyde de soufre et des oxydes d'azote sont libérés par les centrales électriques et d'autres sources, les vents dominants déplacent ces composés au-delà des frontières provinciales et nationales, parfois sur des centaines de kilomètres. Les émissions dans l'air et dans l'eau sont calculées sur la base de son équivalent en SO<sub>2</sub>.

#### 4.2.7.1.5 Eutrophisation

L'eutrophisation est la fertilisation des eaux de surface par des nutriments qui étaient auparavant rares. Lorsqu'un nutriment limitant ou auparavant limité est ajouté à un plan d'eau, cela entraîne la prolifération de la vie végétale photosynthétique aquatique. Cela peut déclencher toute une série de conséquences

allant des mauvaises odeurs à la mort des poissons. Le résultat calculé est exprimé sur la base d'une masse équivalente d'azote (N).

#### 4.2.7.1.6 Écotoxicité

L'exposition de la faune et de la flore à des substances chimiques libérées au cours du cycle de vie des matériaux utilisés dans le pont peut avoir des effets néfastes. Les facteurs de caractérisation intègrent le devenir des substances chimiques dans l'environnement, ainsi que leurs effets sur les organismes, quels que soient le lieu et le moment où ces substances sont rejetées.

#### 4.2.7.1.7 Effets respiratoires

Les émissions de particules primaires (PM) et de particules secondaires (provenant des émissions de SO<sub>2</sub> et de NO<sub>x</sub> qui créent des aérosols de sulfate et de nitrate) peuvent créer des problèmes respiratoires chez l'homme. Chaque facteur de caractérisation intègre le devenir dans l'environnement, l'exposition et la relation dose-réponse tirés d'études épidémiologiques du polluant.

#### 4.2.7.1.8 Épuisement des ressources fossiles

L'utilisation des énergies non renouvelables et de minerais limite leur disponibilité pour les générations futures. Pour les énergies non renouvelables, telles que les combustibles fossiles, l'épuisement correspond à l'augmentation des besoins en énergie par unité de consommation de carburant. Pour l'extraction minière, l'épuisement est mesuré comme le surplus d'énergie nécessaire pour extraire une ressource de concentration ou de valeur inférieure et la concentrer au niveau du minerai actuellement extrait du sol.

### 4.2.8 **Logiciel de modélisation**

Le logiciel d'ACV SimaPro 9.0.0.48 de Pré Consultants est utilisé pour modéliser et calculer les impacts environnementaux potentiels des systèmes à l'étude [29].

### 4.2.9 **Interprétation des résultats**

L'interprétation des résultats est une phase qui comprend aussi bien l'identification des points chauds et des contributions aux impacts des intrants du système que la vérification d'hypothèses et de données d'inventaire. Il s'agit par exemple d'évaluer la sensibilité des résultats par rapport aux hypothèses et incertitudes des données, ou encore, de faire des ajustements cohérents sur la validité des hypothèses et des données en fonction de la sensibilité des résultats. L'interprétation permet d'analyser les résultats, d'en tirer des conclusions justifiées à la lumière des limites pratiques de l'étude et de formuler les recommandations claires qui permettent aux décideurs de prendre des décisions plus avisées [20, 30].

### 4.2.10 **Analyse de la pertinence et de la robustesse des méthodes**

L'analyse de la pertinence et de la robustesse des méthodes est une analyse de sensibilité orientée autour des méthodes d'analyse des impacts. Cette analyse permet de valider la pertinence du choix de la méthode utilisée dans cette étude, en l'occurrence TRACI version 2.1. Afin d'assurer la robustesse des conclusions, une autre méthode d'ÉICV ont été utilisées en guise d'analyse de sensibilité à savoir IMPACT 2002+.

#### **4.2.11 Considération des limites de l'étude**

Toute analyse de cycle de vie (ACV) présente des limites qu'il importe de souligner. Certaines sont des limites pratiques telles que le manque de données, l'inaccessibilité ou l'accès limité à certaines informations confidentielles associées à certains brevets ou autres propriétés intellectuelles. D'autres limites conceptuelles telles que les niveaux de détails et le temps à consacrer pour collecter les données de certains scénarios (p. ex., les possibles scénarios de fin de vie des produits ou matériaux). De plus, la fiabilité des résultats de l'ACV peut être influencée par le choix des hypothèses et le choix des données. D'où la nécessité pour les analystes de s'assurer d'appliquer rigoureusement les règles de bonne pratique en se conformant aux normes ISO 14040/44. Nonobstant ces limites inhérentes à l'ACV, cette étude est réalisée dans un effort de conformité aux normes ISO 14040/44 [31]. Les limites spécifiques associées à cette étude sont présentées dans la section appropriée section 8.

#### **4.2.12 Représentativité**

Les deux conceptions de pont étudiées ont été sélectionnées avec l'aide d'experts de Nordic Structures, du MFFP, de Hexaki et de FPInnovations. Les techniques de conception, les paramètres de conception ainsi que les normes de conceptions appliquées sont considérés comme représentatifs des conceptions actuelles des ponts routiers et des ponts forestiers au Québec (représentativité contextuelle, temporelle, géographique et technologique). Les scénarios de référence, quoiqu'hypothétiques, ont été conçus par la firme spécialisée Hexaki avec le même degré de conformité aux techniques, paramètres et normes de conception en vigueur au Québec.

#### **4.2.13 Revue critique**

Cette étude n'est pas destinée à être divulguée au public. Toutefois, il serait possible qu'elle le soit, compte tenu de l'importance de l'étude (développement des connaissances) et de la nature comparative de celle-ci. Pour ce faire, un reviseur externe, M. Hugues Imbeault-Tétreault, Ing., M.Sc.A, Conseiller aux affaires scientifiques des services – Responsabilité entreprise chez Groupe AGECO a reçu le mandat d'examiner le rapport afin de garantir la qualité de celui-ci et sa conformité aux normes ISO 14040/14044 [31, 32]. La revue critique s'est déroulée en deux temps, la portée et le champ de l'étude d'abord, et ensuite le rapport complet. Quelques itérations ont été nécessaires pour effectuer la revue complète du rapport.

#### **4.2.14 Règles d'imputation**

Il arrive souvent qu'un procédé ou processus génère de multiples produits ayant différentes fonctionnalités. La situation de multiple fonctionnalité est une problématique assez complexe en matière d'imputation. La méthode comparative exige qu'une fonctionnalité commune à tous les produits soit identifiée pour permettre une comparaison juste et équitable, dite « comparaison fonctionnellement équivalente ». La norme ISO recommande de ramener le problème de multiple fonctionnalité à un problème de fonctionnalité unique et commune à tous les produits. Malheureusement, cela n'est pas toujours possible. En effet, le but de cette démarche est dû au fait qu'ISO recommande d'éviter autant que possible d'imputer systématiquement les impacts entre les produits d'un même processus [31, 32]. Pourquoi? —Parce que les impacts environnementaux des processus multifonctionnels doivent être

attribués à des fonctions uniques selon la norme ISO. D'ailleurs, la norme fournit un cadre de pratique général en trois étapes et souligne l'importance d'éviter la méthode d'allocation d'impacts entre les produits. La première étape, qui comprend deux sous-étapes, se définit comme suit: 1) diviser le processus principal en sous-procédé de manière à distinguer quel est le sous-processus responsable de quel produit; et 2) développer l'unité fonctionnelle pour inclure des fonctions supplémentaires (c'est-à-dire faire de l'extension des frontières du système) afin d'éviter de faire de l'allocation d'impacts.

Toutefois, il arrive des cas pour lesquels l'allocation ne peut être évitée. Dans de telles circonstances, la norme suggère les deux autres étapes. Dans cette deuxième étape 2, elle recommande de choisir une « allocation convenable » qui devrait préférentiellement représenter une relation physique sous-jacente entre les fonctions et les impacts environnementaux. En revanche, « si la relation sous-jacente ne peut pas être démontrée clairement, alors la norme suggère (à l'étape 3), une autre allocation basée sur d'autres relations entre les fonctions (relation économique, relation énergétique, relation massique ou physicochimique entre les fonctions des produits du même portefeuille). » [31-34]. En conclusion, ISO recommande coûte que coûte d'éviter autant que possible de recourir à la méthode d'allocation des impacts.

#### 4.2.14.1 Produits du bois

Les données utilisées pour modéliser l'inventaire des ponts en bois proviennent essentiellement des déclarations environnementales de produit (DEP) qui ont été produites en Amérique du Nord. Il s'agit principalement des produits tels que le bois lamellé-collé, le bois lamellé-croisé, le bois de sciage et le contreplaqué [35-38]. Ces DEP sont produits selon les règles des catégories de produits qui priorisent l'allocation massique pour les produits du bois [39, 40]. Les données secondaires des DEP ont été dérivées pour la plupart à partir des bases de données représentatives telles que US LCI [41], ecoinvent v3.5[42], DATASMART [43], CORRIM [44] et Athena [45].

#### 4.2.14.2 Produits d'acier

Dans le cas de l'acier, plusieurs méthodes d'allocation existent pour le réemploi et le recyclage [46, 47]. Les règles d'allocation donnent la priorité à la méthode d'allocation massique, qui est conforme à la règle nord-américaine des catégories de produits pour les produits de construction en acier [48]. Les produits d'acier sont modélisés à l'aide des données d'ecoinvent v3.5, lesquelles priorisent l'allocation économique.

#### 4.2.14.3 Autres produits et processus

En ce qui concerne les produits de cimenterie, de béton et d'autres données de produits essentiels à cette étude, elles ont été modélisées principalement à partir d'ecoinvent v3.5, une base de données dont la plupart des données sont issues de l'allocation économique (voir section 4.2.5).

#### 4.2.14.4 Matières recyclées

Un procédé de recyclage tel que celui de la production du ciment (utilisé pour produire du béton) peut être traité comme un procédé de recyclage en boucle fermée, lorsque le ciment recyclé est utilisé comme substitut du ciment vierge. Dans de tels cas, et ce, en conformité avec la règle de catégorie de produits de cimenterie, seuls les flux et les impacts associés à la valorisation du ciment recyclé seront pris en compte [49]. De fait, la nécessité d'une allocation est évitée, car l'utilisation de matériaux recyclés

(secondaires) remplace l'utilisation de matériaux vierges (primaires). La règle d'exclusion stipule que le transport des matières jusqu'au centre de traitement pour le recyclage est la seule activité considérée lorsque les matières sont recyclées au cours de l'étape de fin de vie [50]. En d'autres mots, les impacts liés au processus de recyclage sont totalement imputés à l'entité qui en fait l'usage. L'inverse aussi est vrai, c'est-à-dire les avantages liés au processus de recyclage sont alloués à l'utilisateur de la matière qui a été recyclée. De fait, ni les impacts ni les avantages associés au processus de recyclage d'un matériau ne sont donc pas pris en considération dans les étapes de fin de vie de cette étude [51]. De ce fait, lors du traitement des données en fin de vie des ponts, si un contenu est destiné au recyclage, ce contenu devient un contenu hors du système de frontière à l'étude, et devient par conséquent, partie intégrante d'un autre système de produits.

#### **4.2.15 Hypothèses sur la production d'électricité**

L'étude de cas présenté à la section 3 est réalisée dans la province du Québec. Or, en matière d'électricité, le Québec est dans un contexte particulier, où la principale énergie alimentant les manufacturiers est de l'hydroélectricité, reconnue comme étant une source d'énergie à très faible empreinte environnementale [52]. En partant du principe que le Québec engorge beaucoup de manufacturiers établis sur son territoire, une hypothèse est formulée en lien avec la capacité du Québec à répondre à la demande en produits et matériaux pour la construction des ponts. La conséquence d'une telle hypothèse est telle que le rayon de transport de tous les matériaux a été délimité au territoire Québécois en particulier (et au Canada en général) en usant de l'hypothèse selon laquelle : le Québec est en mesure de produire et d'assurer l'approvisionnement de tous les matériaux essentiels à de construction des ponts. De cette hypothèse découle l'approche de modélisation adoptée dans cette étude. En effet, la base de données ecoinvent v3.5 est une base de données conçue essentiellement à partir des données européennes. La base donnée DATASMART, quant à elle est conçue essentiellement en usant des données nord-américaines.

L'usage de ces bases de données selon le contexte géographique Québécois exige que les modèles « proxy » soient calibrés en remplaçant la production d'électricité européenne et nord-américaine par le modèle de production d'électricité propre à la province du Québec, aussi appelé bouquet énergétique du Québec ou encore mix électricité du Québec.

Advenant le cas où le manufacturier d'un matériau utilisé dans des ponts se trouve hors du Québec, alors la production d'électricité qui modélise l'arrière-plan utilisera le bouquet énergétique moyen canadien aussi appelé « mix » canadien.

Le Québec avec sa production électrique dominée par de l'hydroélectricité fait partie des provinces en tête de fil au Canada. Depuis 2005, le Québec s'est démarqué des autres provinces en s'imposant au fil des années des mesures énergétiques plus contraignantes pour améliorer son profil énergétique. La Figure 7 illustre les bouquets énergétiques du Canada et du Québec [53-56]. Cependant, le mix d'électricité actuellement modélisé dans SimaPro 9.0.0.48 est présenté dans le Tableau 7.

Tableau 7. Composition du mix d'électricité modélisé

Production d'électricité au Québec			
Production totale par source	1	kWh	(100 %)
Hydroélectricité	0,95	kWh	95 %
Cogénération	0,005	kWh	0,5 %
Géothermie	0,005	kWh	0,5 %
Éolien	0,04	kWh	4 %

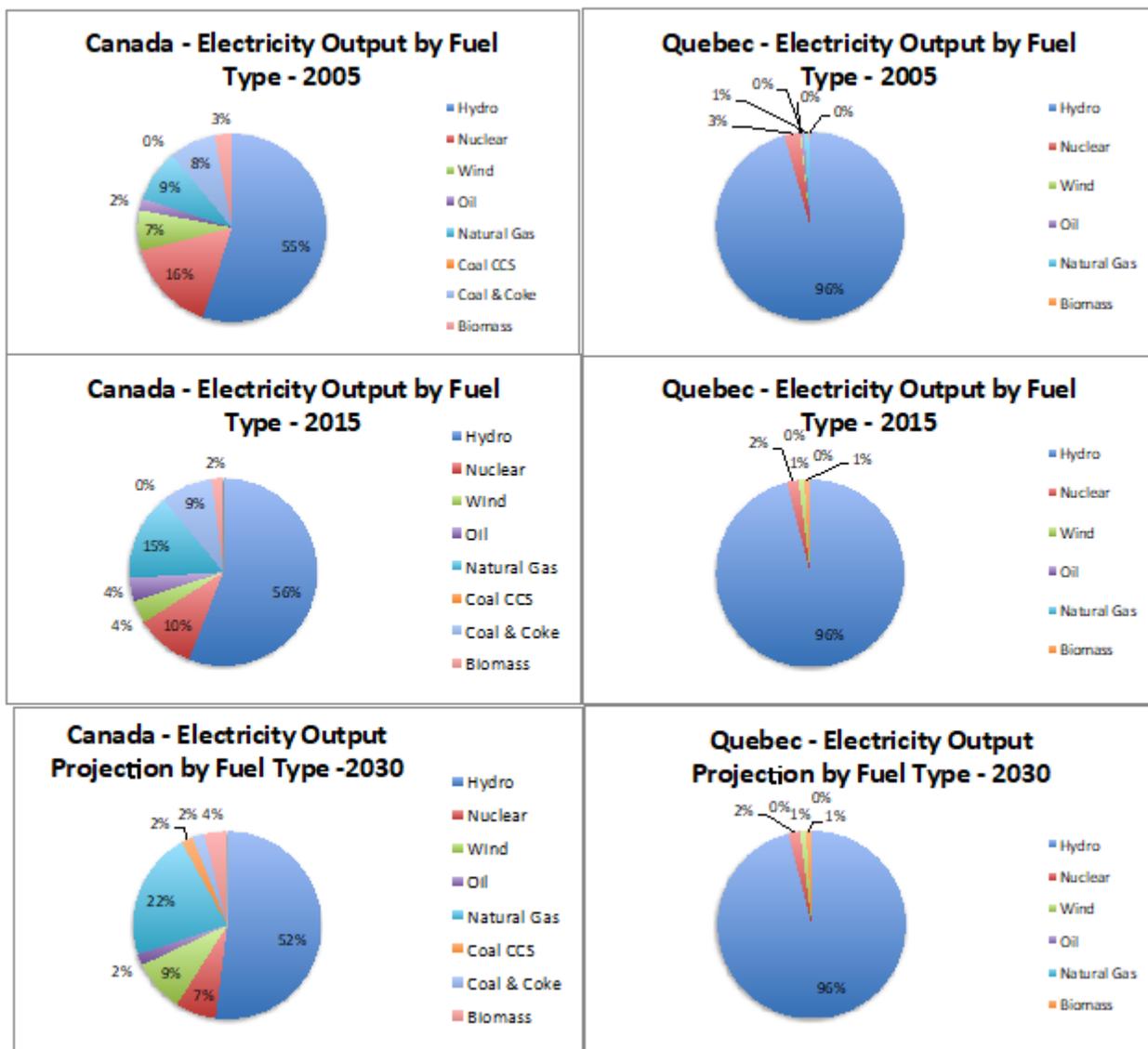


Figure 7. Pourcentage de contribution par type de combustibles dans les réseaux d'approvisionnement en électricité [53-56]

## 5. INVENTAIRES

Cette section présente l'inventaire des flux des systèmes analysés. Les inventaires permettent de faire le bilan des flux entrants (intrants) et sortants (extrants) des frontières du système. Dans le cadre de cette étude relative à l'analyse de cycle de vie des ponts, les inventaires sont compilés et classés selon les modules définis par les normes européennes EN 15804/15978 [21] (Figure 6). Les frontières du système incluent l'étape de production des matériaux (modules A1-A3) et l'étape de construction (modules A4-A5). Les étapes d'utilisation des ponts (modules B1-B7) et les étapes de fin de vie (modules C1-C4) ont été exclues de l'étude (section 4.2.3).

### 5.1 Hypothèses et collecte de données primaires

Les données primaires ont été recueillies avec la collaboration de deux firmes spécialisées à savoir Nordic Structures et Hexaki. Plusieurs sessions de travail ont été organisées entre FPInnovations et les firmes collaboratrices. Les premières réunions ont permis aux experts de proposer la liste des ponts forestiers et routiers pouvant potentiellement faire l'objet d'une étude de cas. Le choix s'est porté sur le pont Paradis et le pont Lafarge. Aux termes des sessions de travail, la firme Nordic Structures a reçu le mandat de produire l'inventaire des matériaux utilisés pour le pont Paradis comme construit. En revanche, la firme Hexaki a reçu le mandat de produire l'inventaire du pont Lafarge comme construit. La firme Hexaki a aussi reçu le mandat de produire les inventaires des scénarios de référence ponts Paradis et Lafarge.

### 5.2 Hypothèse et collecte de données secondaires

La base de données ecoinvent v3.5 a été utilisée comme source de données secondaires. La base de données ecoinvent est internationalement réputée pour sa fiabilité en matière de complétude, équivalence, disponibilité et adaptabilité géographique. Outre la base de données ecoinvent v3.5 [57], l'étude a eu recours à d'autres données secondaires issues d'autres types de bases de données telles que DATASMART 2020 [43, 58], European Life Cycle Database (ELCD) v3.2 [59] et des rapports ACV publiés par Athena Sustainable Materials Institute [60, 61].

#### 5.2.1 Hypothèses et collecte des données de l'étape de production

L'étape de production comprend trois modules d'informations référant respectivement à l'extraction de la matière première (A1), le transport de celle-ci vers le site de transformation (A2) et la transformation de celle-ci chez le manufacturier (A3). C'est une étape fondamentale du cycle de vie des ponts.

Ecoinvent a été utilisée comme étant la base de données principale pour configurer, modéliser, adapter les processus unitaires et les inventaires associés à chaque matériau utilisé. D'autres bases de données telles que les bases de données US LCI et Athena Sustainable Material Institute (ASMI) ont été utilisées pour compléter les inventaires de quelques matériaux pour lesquels les processus unitaires ne sont pas disponibles dans ecoinvent. Par exemple, les données d'inventaire relatives au bois lamellé-croisé et au bois lamellé-collé ont été extraites à partir des déclarations environnementales de produit (DEP). Les énergies consommées relativement à l'étape de production de la plupart des matériaux ont été modélisées et réajustées en tenant compte du bouquet énergétique (mix électrique) de la province du Québec. Par contre, les énergies relatives à l'étape de transport des matériaux du site d'extraction vers le

site de transformation (fabrication) ont été modélisées en utilisant la base de données nord-américaine DATASMART [41].

## **5.2.2 Hypothèses et collectes des données de l'étape de construction**

L'étape de construction comprend deux modules d'informations à savoir le module transport des matériaux vers le chantier de construction (A4) et le module d'érection des ponts sur site (A5).

### **5.2.2.1 Transport (A4)**

Le module A4 fait référence au transport des matériaux du site de production vers le chantier de construction. Ce module permet de quantifier le poids de chaque matériau transporté sur une distance (en km) bien précise entre le manufacturier (ou fournisseur) et le chantier de construction. L'information recueillie est ensuite convertie en unité de transport exprimée en tonne-kilomètre (tkm). Le rayon de transport de tous les matériaux essentiels a été délimité au territoire du Québec en usant de l'hypothèse selon laquelle : le Québec est en mesure de produire et d'assurer l'approvisionnement de tous les matériaux essentiels à la construction des ponts. Ainsi, en faisant abstraction des enjeux relatifs à la compétitivité des prix/coûts d'achat des matériaux et des coûts d'acquisitions des équipements, le critère de proximité au chantier de construction (courtes distances) a prévalu dans la sélection des fournisseurs potentiels. Sauf indications contraires relatives aux spécificités de sécurité entourant le transport de certains matériaux délicats, le moyen de transport privilégié est le transport routier. Les distances parcourues à vide, entre le site et les fournisseurs, sont exclues de l'inventaire. En effet, il a été supposé que les manufacturiers utilisent les services des entreprises de logistique qui ont une certaine expertise dans l'optimisation des transports et dans l'usage optimal des ressources disponibles, réduisant ainsi les possibilités de voyages retour à vide sur de longues distances. Le Tableau 8 et le Tableau 9 présentent les distances moyennes parcourues par les fournisseurs pour acheminer les principaux matériaux vers les chantiers de construction. Le Tableau 10 présente en tonne-kilomètre les inventaires relatifs au transport des matériaux pour les quatre systèmes étudiés.

Tableau 8. Principaux matériaux du pont Paradis et distances parcourues

Principaux matériaux	Principaux fournisseurs	Distance par rapport au site Paradis calculée en utilisant de Google Map (Km)
Acier galvanisé à chaud	ArcelorMittal	863
Acier zingué	ArcelorMittal	863
Bois de sciage traité	Goodfellow Inc.	631
Bois lamellé-collé (Glulam)	Nordic Structures	880
Bois lamellé-croisé ( <i>Cross Laminated Timber</i> (CLT))	Nordic Structures	880
Contreplaqué traité	Husky Plywood	892
Membrane d'étanchéité	Soprema	731
Plaque de plastique UHMW	PolyAlto	388
Innoprep (traitement de surface Glulam et CLT)	Laurentide inc.	450
Innocryl (traitement de surface Glulam et CLT)	Laurentide inc.	450
Arséniate de cuivre chromaté (ACC) (traitement en profondeur du bois de sciage)	Parchem	823

Tableau 9. Principaux matériaux du pont Lafarge et distances parcourues

Principaux matériaux	Principaux fournisseurs	Distance par rapport au site Paradis calculée en utilisant de Google Map (Km)
Béton	Unibéton	269
Acier	ArcelorMittal	67
Bois lamellé-croisé (CLT)	Nordic Structures	741
Bois lamellé-collé (Glulam)	Nordic Structures	741
Membrane	Duraseal	25
Caoutchouc	ERO Rubber company INC	259
Éponge	AERO Rubber company INC	259
Contreplaqué	Husky Plywood	45
Gravier MG-112	BauVal Inc.	32
Gravier MG-20	BauVal Inc.	32
Asphalte	Béton provincial	264
Innoprep (traitement de surface Glulam et CLT)	Laurentide inc.	450
Innocryl (traitement de surface Glulam et CLT)	Laurentide inc.	450
Peinture (traitement de surface poutre et glissière)	Laurentide Inc	450

Tableau 10. Transport (A4)

Transport (A4)	Unité	Paradis en bois	Paradis en acier-bois	Lafarge hybride en bois	Lafarge en acier-béton
Transport*	tkm/m <sup>2</sup>	263	247	1259.84	1336

\*Transport des quantités brutes avant rejet sur site présenté au Tableau 12 et Tableau 13

### 5.2.2.2 Construction (A5)

#### 5.2.2.2.1 Bilan de matériaux et analyse des compositions massiques

Le module d'informations A5 permet d'estimer à la fois la quantité exacte ou quantité nette ( $Q_N$ ) de matériaux consommés par chaque scénario de pont lors de l'érection, et la fraction ( $F$ ) de rejet généré sur site lors des travaux sur le terrain (p. ex., bris ou débris issus des travaux de redimensionnement du bois, des membranes, etc.). Pour ce faire, une certaine fraction de rejet a été prise en compte pour refléter la quantité totale réelle ( $Q_T$ ) des matériaux ayant été transportés sur site et qui ont servi à l'érection de chaque scénario de pont. Le Tableau 11 présente les facteurs de rejet ( $1+F$ ) comme documentés par Athena [62]. Le Tableau 12 et Tableau 13 présentent les bilans d'inventaire des matériaux consommés par différents scénarios de pont à l'étape A5. La quantité totale brute ayant été transportée au chantier de construction est estimée selon l'équation ci-dessous.

$$Q_T = Q_N(1 + F)$$

Tableau 11. Facteur de rejet sur site [62]

Liste des matériaux	Facteurs de rejet (1+F)
Acier	1,05
Asphalte	1,01
Béton	1,05
Bois de sciage traité	1,05
Contreplaqué	1,05
Gravier	1
Bois lamellé-croisé avec traitement de surface	1,01
Bois lamellé-collé avec traitement de surface	1,01
Membranes	1,05

Tableau 12. Bilan des matériaux pour les scénarios de pont Paradis

Matériaux	Pont Paradis en bois		Pont Paradis en acier-bois	
	kg/m <sup>2</sup>	(%)	kg/m <sup>2</sup>	(%)
Acier galvanisé à chaud	7,33	2 %	159,77	48 %
Acier zingué	0,16	0 %	0	0 %
Bois de sciage traité	146,01	42 %	172,67	52 %
Bois lamellé-collé (glulam)	178,91	52 %	0	0 %
Bois lamellé-croisé (CLT)	4,49	1 %	0	0 %
Contreplaqué traité	4,00	1 %	0	0 %
Membrane d'étanchéité	1,36	0 %	0	0 %
Plaque de plastique UHMW	0,40	0 %	0	0 %
Innoprep (traitement de surface du glulam et CLT)	0,35	0 %	0	0 %
Innocryl (traitement de surface du glulam et CLT)	1,08	0 %	0	0 %
Arséniate de cuivre chromaté (ACC) (traitement en profondeur du bois de sciage)	1,67	0 %	1,97	1 %
<b>Quantité nette (Q<sub>N</sub>) totale*</b>	<b>345.84</b>	<b>100 %</b>	<b>334.4</b>	<b>100 %</b>

\* Les sommes ne correspondent pas aux totaux à cause des arrondis

Tableau 13. Bilan des matériaux pour le pont Lafarge et son scénario alternatif

Matériaux	Pont Lafarge hydride en bois		Pont Lafarge en acier-béton	
	kg/m <sup>2</sup>	(%)	kg/m <sup>2</sup>	(%)
Béton	2804,5	35 %	4025,5	51 %
Acier	0,0	0 %	1,03	0 %
Acier galvanisé et peinturé	161,27	2 %	281,18	2 %
Bois lamellé-croisé (CLT)	30,90	0 %	0,00	0 %
Bois lamellé-collé (glulam)	334,90	4 %	0,00	0 %
Membrane	14,94	0 %	8,62	0 %
Caoutchouc	1,87	0 %	0,00	0 %
Éponge	0,41	0 %	0,27	0 %
Contreplaqué	17,91	0 %	0,00	0 %
Gravier MG-112	4008,05	50 %	4008,05	40 %
Gravier MG-20	248,28	3 %	248,28	3 %
Asphalte	362,07	5 %	362,07	4 %
Innoprep (traitement de surface du glulam et CLT)	0,72	0 %	0	0 %
Innocryl (traitement de surface du glulam et CLT)	2,23	0 %	∅	0 %
Peinture (traitement de surface poutre et glissière)	0	0 %	4,98	0 %
<b>Quantité nette (Q<sub>N</sub>) totale*</b>	<b>7988,04</b>	<b>100 %</b>	<b>8939,95</b>	<b>100 %</b>

\* Les sommes ne correspondent pas aux totaux à cause des arrondis

Le Tableau 12 illustre aussi les contributions des matériaux sur une base massique. Dans le cas du scénario pont en bois, les matériaux qui dominent en quantité sont le lamellé-collé et le bois de sciage contribuant respectivement à hauteur de 53 % et 41 %. Dans le cas du scénario pont en acier-bois, le bois de sciage traité et l'acier galvanisé à chaud sont les deux matériaux qui dominent en quantité, contribuant respectivement à hauteur de 51 % et 48 % du poids total de l'infrastructure.

Le Tableau 13 présente l'inventaire des matériaux entrant dans la composition des scénarios de pont Lafarge. Le Tableau 13 illustre aussi les contributions des matériaux sur une base massique. Dans le cas du scénario hybride en bois, les matériaux qui dominent en quantité sont le béton et le gravier de la fondation. La contribution massique des matériaux en bois est comprise entre 1 % et 3 % du poids total de l'infrastructure. De fait, plutôt que d'appeler ce scénario comme étant un scénario bois, il serait prudent de le considérer comme une solution hybride en bois, vue la supériorité en composition des matériaux tels que le béton, gravier et asphalté. Le pont Lafarge hybride en bois est donc un scénario dont le qualificatif « hybride » est justifié par une telle composition en matériaux. Dans le cas du scénario Lafarge en acier-béton, la même analyse s'applique. En effet, le béton et le gravier sont aussi dominants dans ce cas-ci qu'ils le sont dans le scénario hybride. La contribution massique de l'acier s'élève à environ 2 % du poids total de l'édifice.

Dans les deux types de ponts, les matériaux (bois lamellé-croisé, bois lamellé-collé et bois de sciage) ont subi des traitements spéciaux. Dans les deux cas, le bois lamellé-croisé et le bois lamellé-collé fournis par Nordic Structures ont tous les deux subi un traitement de surface avec de l'Innoprep comme couche d'imprégnation et de l'Innocryl étalé en couche protectrice. En revanche, le bois de sciage a été traité avec de l'arséniate de cuivre chromaté (ACC) [63]. Les données relatives au traitement de surface du bois ont été fournies par Nordic Structures [64, 65]. Le traitement à l'Innocryl permet de superposer une couche protectrice (film) d'environ 100 µm d'épaisseur à l'état sec [66]. Le traitement à l'ACC s'est fait avec un taux de rétention de 6,4 kg de ACC par mètre de cube de bois traité [63].

Dans le cas du pont Lafarge, l'acier galvanisé des glissières et des poutres a été peint avec une couche de peinture protectrice. La couche de revêtement a été estimée à partir des travaux de Cobut [22].

#### 5.2.2.2 Bilan d'énergie

Le module A5 fournit aussi de l'information sur l'énergie consommée sur site par la machinerie. La machinerie est répertoriée par classe de puissance, la durée d'utilisation de ces différentes machines varie d'un système de pont à l'autre (p. ex., système en bois, système en acier-bois, système en acier-béton et le système hybride en bois). Les hypothèses concernant l'estimation des durées respectives des travaux d'érection de chaque système de pont, selon la classe des machines, sont basées sur les travaux de Pedneault et al. [67], ainsi que sur les travaux de Tingley [68]. La durée moyenne de construction de chaque système ainsi que la durée moyenne d'utilisation des machines sont présentées dans les tableaux ci-dessous (Tableau 14, Tableau 15 et Tableau 16).

Tableau 14. Classe de machinerie et durée d'opération pour les scénarios pont Paradis

Classe de machinerie	Durée d'usage par jour (heures/jour)	Pont Paradis – Nombre de jours d'utilisation	
		Pont en bois	Pont en acier-béton
Machinerie <18.64 kW	12	6	7
18.64 kW ≤ Machinerie < 74.57 kW	6		
Machinerie ≥ 74.57 kW	2		

Tableau 15. Classe de machinerie et durée d'opération pour les scénarios pont Lafarge

Classe de machinerie	Durée d'usage (heures/jour)	Pont Lafarge – Nombre de jours d'utilisation	
		Lafarge hybride en bois	Lafarge en acier-béton
Machinerie <18.64 kW	12	8,7	9
18.64 kW ≤ Machinerie < 74.57 kW	6		
Machinerie ≥ 74.57 kW	2		

Tableau 16. Temps d'usage des machines par unité fonctionnelle

Classe de machinerie	Temps d'usage de la machinerie (heures/m <sup>2</sup> )			
	Paradis en bois	Paradis en acier-bois	Lafarge hybride en bois	Lafarge en acier-béton
Machinerie <18.64 kW	0,7	0,8	0,3	0,3
18.64 kW ≤ Machinerie < 74.57 kW	0,4	0,4	0,2	0,2
Machinerie ≥ 74.57 kW	0,1	0,1	0,1	0,1

## 5.3 Analyse de la qualité de données et modélisation des processus

### 5.3.1 Qualité des données primaires et analyse qualitative de l'incertitude

Étant donné que toutes les données essentielles ont été collectées et présentées, il est important de s'attarder sur la qualité de celles-ci avant de procéder à la modélisation des impacts. En effet, la qualité des résultats repose essentiellement sur la qualité des données utilisées comme intrants aux modèles. Les données primaires ont été collectées avec l'aide des professionnels et experts dans leurs domaines de la construction des ponts.

### Données des étapes A1-A3

Les bilans des matériaux ont été réalisés grâce au travail des ingénieurs et experts. Ils ont utilisé des outils et technologies appropriés (p. ex., outils de simulation de contraintes et de forces de cisaillement, outils de conception et de dimensionnement, outils de modélisation par éléments finis, etc.), et ce, dans le respect du code de pont et des normes en vigueur au Canada et au Québec. Que ce soit pour la conception des ponts comme érigés ou pour la conception des scénarios hypothétiques, le niveau de technicité (détails), les hypothèses et contraintes appliquées sont quasiment les mêmes. Cela étant dit, les données d'inventaires utilisées et comparées ont été collectées avec une même approche et un même degré de précision. Autrement dit, s'il y a de l'incertitude liée à chaque donnée de cette catégorie, la propagation de l'incertitude ou l'effet de celle-ci s'amenuit dans la mesure où la comparaison est faite sur les données de même origine.

Toutefois, il est important de reconnaître que les travaux de conception, de dimensionnement et d'estimation qui ont été faits sur les scénarios hypothétiques se situent entre l'étape de conception d'un projet et l'étape de réalisation d'un projet. Ainsi, l'incertitude sur la précision des estimations varie entre l'ingénierie préliminaire (ou étude de faisabilité d'un projet) et l'ingénierie détaillée (étape d'exécution) [69, 70]. Selon le cône d'incertitudes à trois niveaux (élevé, moyen et faible) défini par McConnell, le niveau d'incertitudes d'une conception théorique se situe dans la zone moyenne ( $\pm 50\%$ ) [69]. Or, les estimations et les adaptations, réalisées par les ingénieurs et experts au cours de cette étude, ont été faites sur la base des plans et devis des ponts déjà construits. En prenant en compte cet aspect, le niveau d'incertitudes lié aux données collectées est moins important que dans un cas purement théorique. Le niveau d'incertitudes relatif aux données peut être classé dans la zone de faible incertitude ( $\pm 30\%$ ).

Aussi, faut-il le préciser, les scénarios de ponts en bois (Paradis en bois et Lafarge hybride en bois) ne sont pas des scénarios théoriques ou hypothétiques. En effet, ces scénarios représentent les projets de ponts finis ou ponts tels que (comme) construits. Selon le guide et lexique de gestion des services d'ingénierie, la marge d'erreur rattachée aux projets ponts Paradis et Lafarge, projets pour lesquels les ingénieurs ont eu recours à de l'ingénierie détaillée est de 5% [71]. En d'autres mots, dans une approche plus conservatrice la marge d'incertitudes de  $\pm 30\%$  ne s'applique qu'aux scénarios de ponts hypothétiques.

### Données des étapes de transport (A4)

Les données recueillies à cette étape sont obtenues par une simple multiplication entre la distance parcourue et la quantité de matériaux estimée. La fiabilité de la donnée et l'incertitude sur celle-ci dépendent des calculs faits en amont de l'étape (bilan des matériaux).

### Données de l'étape A5

Les données de cette étape se limitent essentiellement à la collecte des pourcentages de déchets générés pendant la construction et aux nombres d'heures d'utilisation des machines spéciales. Les facteurs de rejet sont fournis par Athena [62], et les données relatives à l'usage de la machinerie sont basées sur les travaux de Pedneault et al. [67] et Tingley [68]. De fait, la qualité des données dépend des trois sources.

### 5.3.2 Évaluation qualitative des données primaires et secondaires

Les données primaires et secondaires ont été évaluées qualitativement selon la matrice d'évaluation proposée par Weidema et al. [72]. Le Tableau 17 et le Tableau 18 présentent respectivement les indicateurs de qualité de données et les critères d'évaluation.

Étant donné que les données des quatre systèmes ont les mêmes sources, seules les données des scénarios de base (scénarios de référence) ont été reportées à titre d'exemple pour illustrer l'application de la matrice d'évaluation de la qualité des données.

Tableau 17. Indicateurs de la qualité de données (adaptés de Weidema et al. [72])

Indicateurs	Description
Technologie	Mesure dans laquelle la donnée reflète la technologie réelle utilisée
Temps	Mesure dans laquelle la donnée reflète le temps (p. ex., l'année) ou l'âge de l'activité
Géographie	Mesure dans laquelle la donnée reflète la localisation géographique de l'activité (p. ex., pays ou site)
Complétude	Mesure dans laquelle la donnée est statistiquement représentative de l'activité : <ul style="list-style-type: none"> <li>comprend le pourcentage des emplacements où des données sont disponibles et utilisées par rapport au nombre total où cette activité a lieu</li> <li>inclut également les fluctuations saisonnières et les variations normales de la donnée</li> </ul>
Fiabilité	Mesure de la fiabilité de la source, des méthodes de collecte et des procédures de vérification utilisées

Tableau 18. Critères d'évaluation qualitative de la qualité des données (Adaptés de Weidema et al. [72])

Évaluation	Technologie	Temps (T)	Géographie	Complétude	Fiabilité
Très bonne (Rang 1)	Même technologie utilisée	T < 3 ans	Même région	Provient de tous les sites pertinents et pour une durée permettant d'éliminer les variations normales	Vérifiée et basée sur des mesures
Bonne (Rang 2)	Technologie utilisée similaire	T < 6 ans	Région similaire	Provient de 50 % des sites et pour une durée permettant d'éliminer les variations normales	Vérifiée, partiellement basée sur des hypothèses ou non vérifiées, basée sur des mesures
Convenable (Rang 3)	Technologie utilisée différente	T < 10 ans	Région différente	Provient de moins de 50 % des sites et pour une durée permettant d'éliminer les variations normales ou provient de plus de 50 % des sites mais pour une durée plus courte	Non vérifiée, partiellement basée sur des hypothèses ou estimations qualifiées
Faible (Rang 4)	Technologie utilisée inconnue	T > 10 ans	Région inconnue	Provient de moins de 50 % des sites et pour une durée plus courte ou de représentation inconnue	Estimation non qualifiée

L'Annexe III présente quelques tableaux se rapportant à l'évaluation de la qualité des données primaires et secondaires selon les indicateurs et critères présentés ci-dessus. Les évaluations de chaque donnée individuelle (voir Annexe III) montrent qu'aucune d'elles ne présente la qualité optimale désirée (1, 1, 1, 1, 1), et aucune d'elles non plus ne présente la pire qualité redoutée (4, 4, 4, 4, 4). La qualité globale de chaque donnée traitée dans cette étude n'est ni excellente, ni très mauvaise non plus. Néanmoins, il faut reconnaître qu'il y a de l'incertitude sur chaque donnée collectée. Toutefois, sans une analyse approfondie de ces incertitudes, il est impossible de dire à quel point celles-ci affectent la qualité des résultats. Il aurait été souhaitable, si le temps le permettait, de recourir à la simulation Monte-Carlo incorporée dans SimaPro.

En effet, Monte-Carlo est une approche qui consiste à attribuer à chaque donnée collectée une valeur minimale (p. ex., -30 %) et une valeur maximale (p. ex., +30 %). Cette attribution permet à SimaPro d'assigner à chaque variable d'entrée (donnée collectée) une fonction de densité de probabilité (p. ex., une distribution ou une loi triangulaire). Ainsi, la simulation Monte-Carlo sous SimaPro permet d'obtenir ultimement une distribution normale pour chaque indicateur environnemental (p. ex., réchauffement climatique). À défaut d'utiliser de la simulation Monte-Carlo sous SimaPro, l'étude réalisée par Humbert et al. a été utilisée comme base de référence pour prendre en compte l'affectation des résultats par l'incertitude [73] (voir section suivante 5.3.3).

### **5.3.3 Effets des incertitudes sur les résultats**

Compte tenu des incertitudes associées aux données collectées, et les incertitudes intrinsèquement liées aux modèles utilisés pour évaluer les impacts, les réductions d'impacts occasionnées par une comparaison relative de deux scénarios donnés ne peuvent être considérées comme significatives qu'à partir d'un certain degré d'écart de signifiante. Autrement dit, pour qu'un écart relatif entre deux scénarios soit considéré comme étant important, il doit être supérieur à un certain intervalle minimal seuil. Les écarts minimaux (ou seuils) requis sont illustrés dans le Tableau 19 [73-75].

Ces écarts sont le résultat d'une étude portant sur l'évaluation des différences minimales requises entre les processus non corrélés pour observer une différence significative selon la méthode IMPACT2002+ [73-75]. Ces valeurs ont été déterminées à partir de la classification des incertitudes dans le guide de l'utilisateur IMPACT 2002+ [73]. La quantification de ces incertitudes a été faite suite à une communication avec Sébastien Humbert, PhD et en supposant que les résultats ont la même probabilité d'être x fois trop grandes ou x fois trop petites [76, 77].

Ces écarts minimaux varient d'une catégorie d'impact à l'autre en raison des incertitudes dans la modélisation interne du devenir et de l'effet des contaminants. Par exemple, une différence de 20 % de réchauffement climatique est une différence plus convaincante qu'une différence de 50 % d'écotoxicité lorsque celle-ci provient de différents contaminants émis dans différentes régions [76, 77].

TRACI et IMPACT 2002+ sont deux méthodes qui peuvent produire des résultats dont les ordres de grandeur des valeurs absolues peuvent être différents, mais en valeurs relatives, c.-à-d. en pourcentage (%), les écarts produits par les deux méthodes demeurent consistants entre les scénarios comparés [78, 79]. Bien qu'une classification similaire des écarts n'ait pas encore été produite sous TRACI, l'utilisation de ces différences minimales peut être transposée et utilisée pour les indicateurs similaires

générés sous la méthode TRACI. Le tableau ci-dessous présente les catégories d'impacts similaires entre TRACI et IMPACT 2002+, ainsi que les écarts minimaux affectés à chaque catégorie [73-75].

Tableau 19. Écart minimal requis pour qu'une comparaison des scores d'impacts soit significative

<b>Incertitudes liées à la modélisation d'impact</b>			
<b>IMPACT 2002+</b>	<b>TRACI</b>	<b>Niveau d'incertitudes</b>	<b>Écart minimal requis pour être significatif</b>
Effets cancérigènes	Effets cancérigènes	Élevé	± 90 %
Effets non cancérigènes	Effets non cancérigènes	Élevé	± 90 %
Effets respiratoires (volatiles)	Effets respiratoires	Faible	± 30 %
Effets respiratoires (particules)		Moyen	± 50 %
Rayonnement ionisant	-	Élevé	± 80 %
Destruction de la couche d'ozone	Appauvrissement de la couche d'ozone	Moyen	± 50 %
Écotoxicité aquatique	Écotoxicité	Élevé	± 90 %
Écotoxicité terrestre		Très élevé	± 90 %
Acidification terrestre / nutriment	-	Élevé	± 80 %
Occupation de la terre	-	Élevé	± 80 %
Acidification aquatique	Acidification	Faible	± 30 %
Eutrophisation aquatique	Eutrophisation	Faible	± 30 %
Changement climatique	Réchauffement climatique	Faible	± 10 %
Énergie non renouvelable	Épuisement des ressources fossiles	Faible	± 10 %
Extraction des minerais	-	Moyen	± 50 %

## 5.4 Analyse de sensibilité

Quelques analyses de sensibilité ont été réalisées afin de nuancer les résultats et les conclusions de cette étude.

Par exemple, afin de s'assurer de la pertinence et de la robustesse des méthodes utilisées, une analyse de sensibilité a été réalisée en usant de la méthode IMPACT 2002+.

Bien que la portée de cette étude soit définie du « berceau à la porte », une analyse de sensibilité autour des scénarios de fin de vie a été réalisée pour permettre de contraster les résultats obtenus selon la portée « berceau à la porte » et ceux obtenus en considérant la portée « berceau au tombeau ».

L'analyse de sensibilité au tour des scénarios de fin de vie a aussi permis d'inclure l'analyse de sensibilité sur carbone biogénique. Cette analyse a été réalisée pour permettre de nuancer davantage les résultats de l'étude.

Une analyse de sensibilité autour des méthodes d'allocation a été réalisée afin de comparer les résultats obtenus selon la méthode d'allocation massique et ceux obtenus selon la méthode d'allocation économique.

L'analyse des flux massiques des matériaux de l'étape A1-A3 a révélé que certains matériaux ont des compositions quasi nulles comparativement aux autres matériaux prépondérants. L'incertitude potentielle dans l'estimation de ces quantités est soulignée dans la section analyse des qualités des données. Pour ce faire, une analyse de sensibilité autour des bornes supérieures (+5 % et +30 %) et bornes inférieures (-5 % et -30 %) a été réalisée sur l'ensemble des données estimées par les experts.

### **5.5 Analyse de cohérence entre systèmes comparés et analyse de complétude à l'intérieur des frontières des systèmes étudiés**

De la définition des frontières de système à la collecte des données en passant par la conception des scénarios comparatifs au moyen des plans et outils de conception utilisés par les ingénieurs en conception et les experts, l'étude de cas a été menée de manière à s'assurer que les systèmes comparatifs soient représentés de manière conforme à la définition des objectifs et du champ de l'étude.

De plus, au niveau de la collecte des données, les ingénieurs en conception de ponts se sont assurés que les méthodes de modélisation des maquettes, les hypothèses de calculs et les normes CSA soient appliquées de manière similaire à tous les systèmes comparables. Cela revient à dire qu'il y a cohérence entre les systèmes comparés, et ce, au regard des données collectées, de leur source, de leur précision, de leur marge d'incertitudes et de leur représentativité technologique, temporelle et géographique.

En ce qui concerne les données manquantes et les exclusions, une analyse de sensibilité a été effectuée pour nuancer les hypothèses formulées et leur effet sur les résultats. Les analyses de sensibilité autour des étapes de cycle de vie exclues « les exclusions » ont été réalisées. De plus, la robustesse des résultats de l'évaluation des impacts a été validée par une seconde méthode d'évaluation d'impacts. Au regard de ce qui précède, et au regard du champ et des objectifs de l'étude, la complétude de l'étude a bien été assurée à l'intérieur des frontières du système « berceau à la porte ».

## **6. ANALYSE D'IMPACTS ET RÉSULTATS**

Les impacts ont été évalués à l'aide de TRACI 2.1. TRACI est un outil d'évaluation d'impacts adapté au contexte nord-américain. De plus, puisque cette étude s'inscrit au chapitre du développement de connaissances sur le bois comme matériau à faible empreinte carbone, l'interprétation des résultats mettra l'accent sur l'indicateur de réchauffement climatique et sur l'analyse de l'empreinte carbone du bois. En d'autres mots, une attention particulière sera portée aux émissions de gaz à effet de serre (GES). En prenant en considération les écarts minimaux présentés au Tableau 19, les différences relatives d'au moins 10 % seront jugées significatives pour l'indicateur de réchauffement climatique.

Les résultats d'impacts environnementaux des deux types de ponts sont présentés selon les objectifs de l'étude énumérés plus haut. L'analyse d'impacts permet d'effectuer non seulement une analyse comparative d'un scénario donné par rapport à un autre selon les objectifs de l'étude initialement définis,

mais elle permet aussi de faire une analyse de la contribution des étapes de cycle de vie (production, transport, et construction) et bien d'autres processus.

Par conséquent, la présentation des résultats est divisée en trois parties. La première analyse les impacts selon les objectifs principaux associés à chaque scénario (voir Figure 1 et Figure 3). La seconde pousse un peu plus loin l'analyse des impacts en analysant aussi bien la contribution aux impacts des différentes étapes de cycle de vie que la part de contribution des matériaux aux impacts totaux des ponts étudiés. La troisième quant à elle analyse la sensibilité des résultats par rapport à différentes méthodes et paramètres afin de contraster les résultats et les conclusions obtenus.

## 6.1 Impacts des ponts

### 6.1.1 Pont Paradis – impacts

Cette section traite des résultats du « berceau à la porte » associés au pont Paradis. La Figure 8 présente la comparaison des résultats des deux scénarios du pont Paradis (en bois versus en acier-bois). Les résultats montrent que le pont Paradis en bois présente une plus faible empreinte carbone par rapport au pont en acier-bois. La conception du pont en bois entraîne une réduction d'environ 48 % des émissions de GES comparativement au pont en acier-bois. C'est une réduction significative considérant les incertitudes associées aux modèles et les écarts minimaux présentés au Tableau 19, soit une réduction d'environ 284 kg éq. CO<sub>2</sub> par mètre carré de ponts comparés. Les émissions au mètre carré des ponts sont respectivement de 303 kg éq. CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> et 586 kg éq. CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> pour le pont Paradis en bois et le pont Paradis en acier-bois. Les résultats détaillés et les valeurs absolues des impacts de tous les indicateurs sont présentés en annexe (voir Annexe V).

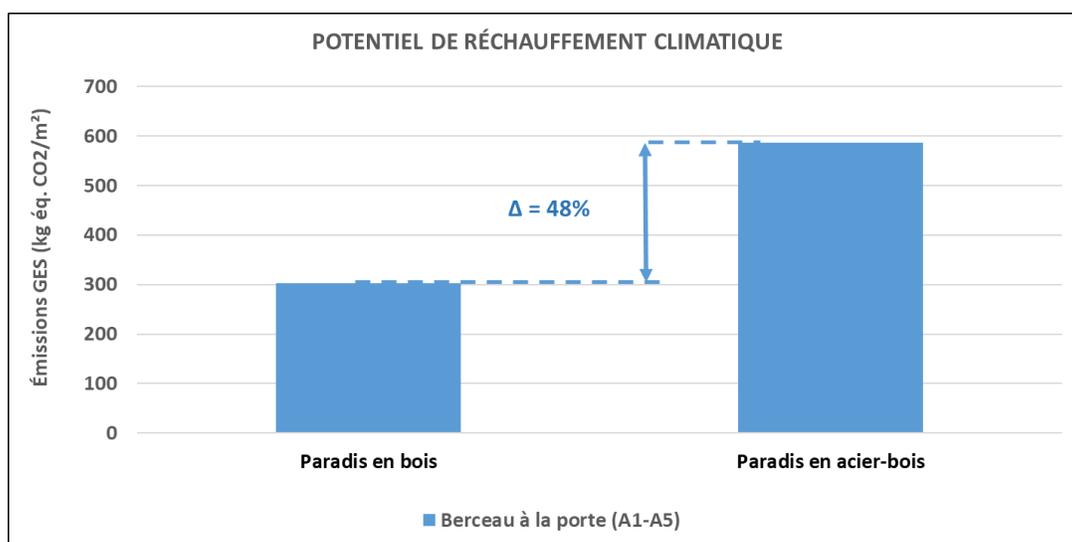


Figure 8. Émissions des gaz à effet de serre (GES) des scénarios de pont Paradis

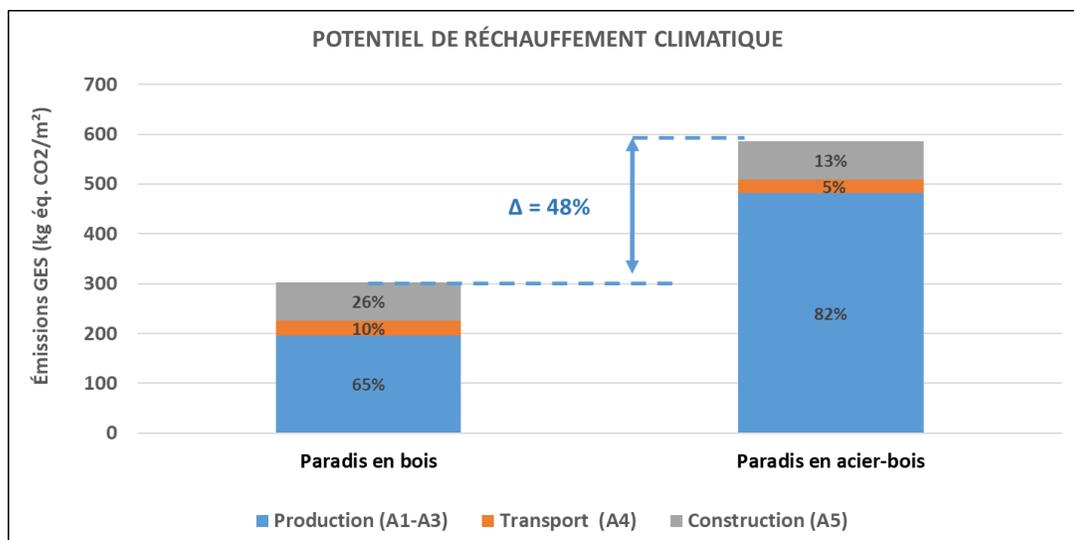


Figure 9. Analyse de contribution des étapes de cycle de vie aux émissions du pont Paradis

La Figure 9 présente la contribution aux impacts de chaque étape de cycle de vie. Les émissions attribuables à la production des matériaux représentent 82 % des impacts du pont en acier-bois, alors qu'elles représentent 65 % des impacts du pont en bois. De fait, dans l'un ou l'autre des systèmes, l'étape de production est l'étape la plus contributrice aux émissions GES. Dans les deux scénarios, pont en bois et pont en acier-bois, l'étape de construction contribue respectivement à hauteur de 26 % et 13 % des émissions. Dans les deux cas, cette étape est la deuxième étape la plus contributrice aux impacts des scénarios (en bois et en acier-bois). Finalement, l'étape de transport est, dans les deux scénarios, l'étape la moins contributrice aux émissions des deux scénarios, sa contribution est de 10 % dans le scénario Paradis bois et de 5 % dans le scénario paradis en acier-bois.

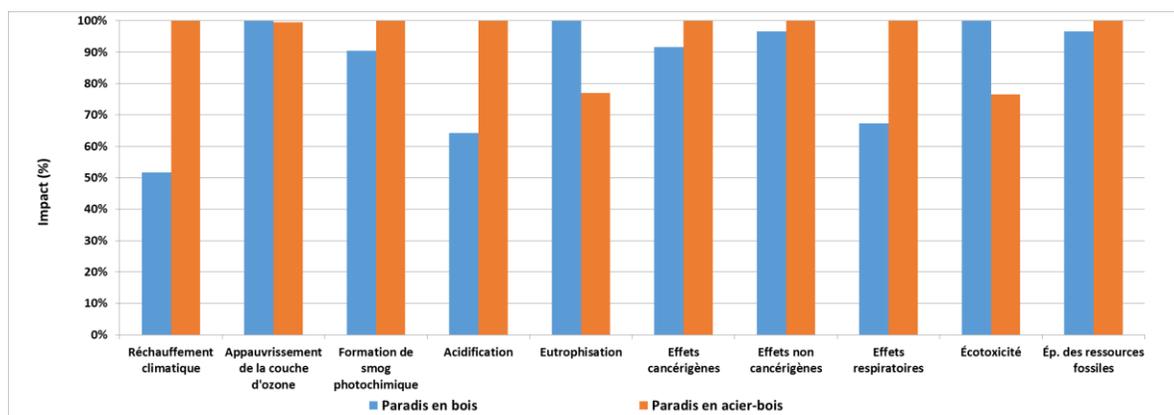


Figure 10. Illustration comparative des impacts totaux du pont en bois et ceux du pont en acier-bois

Outre les émissions de GES, la Figure 10 montre que le pont Paradis en bois présente des impacts plus faibles que le pont Paradis en acier-bois, et ce, dans six autres indicateurs, incluant la formation de smog photochimique, l'acidification, les effets cancérigènes, les effets non cancérigènes, les effets respiratoires, et l'épuisement des ressources fossiles. Selon les écarts minimaux, la réduction est significative pour l'indicateur acidification (36 %) et non significative pour les cinq autres. En revanche, le pont Paradis en acier-bois présente des impacts plus faibles pour l'appauvrissement de la couche d'ozone (0,47 %),

l'eutrophisation (23 %) et l'écotoxicité (23 %). Toutefois, ces différences ne sont pas significatives selon les écarts minimaux présentés précédemment au Tableau 19.

### 6.1.2 Pont Lafarge – impacts totaux

La Figure 11 présente les résultats du « berceau à la porte » associés au pont Lafarge. Les résultats montrent que le pont hybride en bois présente une empreinte carbone plus faible par rapport au pont en acier-béton. La conception du pont hybride en bois entraîne une réduction d'environ 25 % des émissions de GES comparativement au pont en acier-béton. C'est une réduction significative considérant les seuils de significances présentées au Tableau 19. C'est une réduction d'environ 414 kg éq. CO<sub>2</sub> par mètre carré de ponts comparés. Les émissions au mètre carré des ponts sont respectivement de 1273 kg éq. CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> et 1687 kg éq. CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> pour le pont Lafarge hybride en bois et le pont Lafarge en acier-béton. Les résultats détaillés et les valeurs absolues des impacts de tous les indicateurs sont présentés en annexe (voir Annexe V).

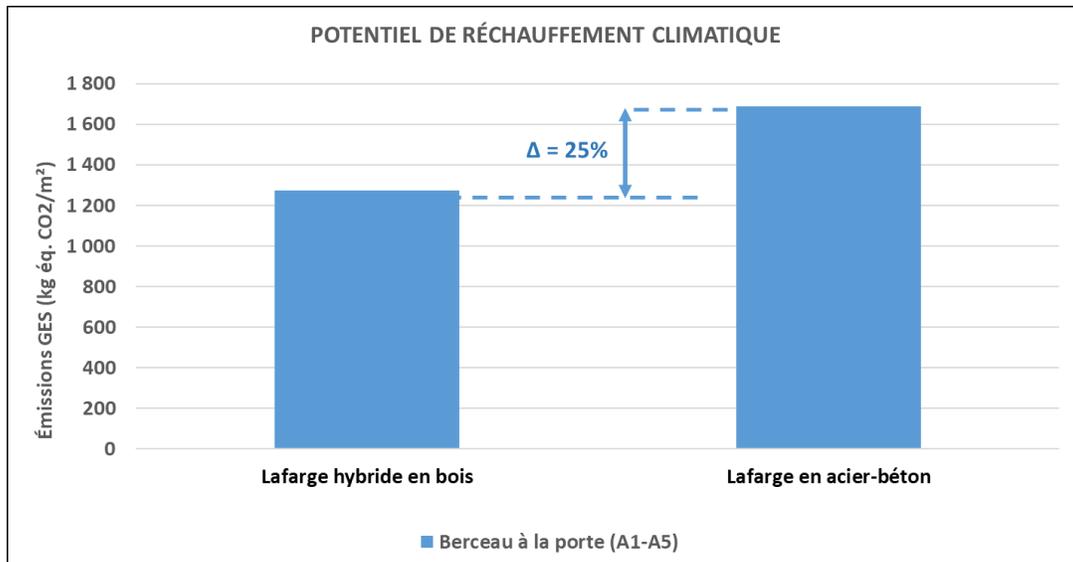


Figure 11. Émissions des gaz à effet de serre (GES) des scénarios de pont Lafarge

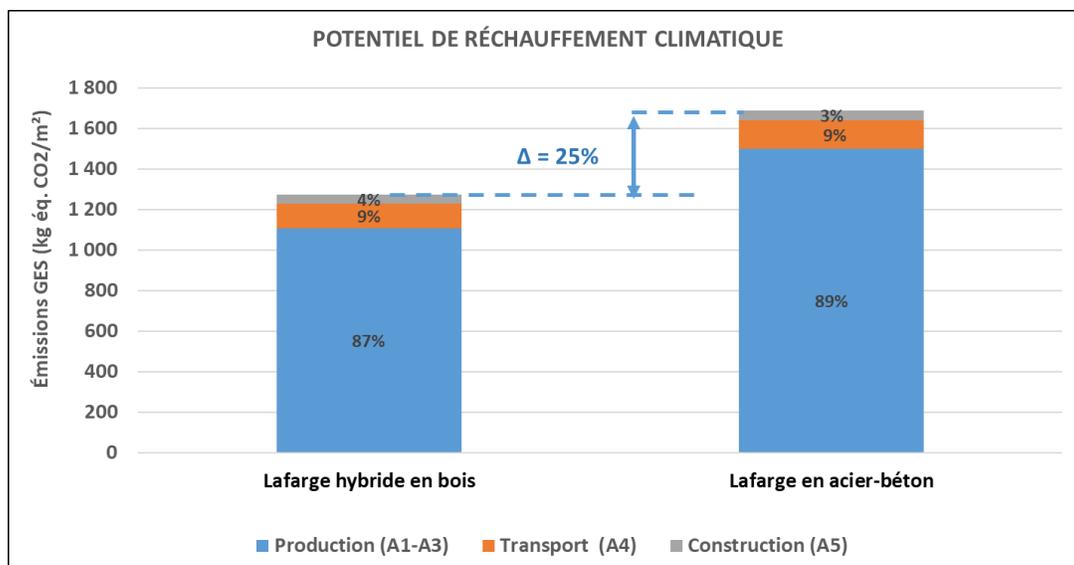


Figure 12. Analyse de contribution des étapes de cycle de vie aux émissions du pont Lafarge

La Figure 12 présente la contribution aux émissions de chaque étape de cycle de vie. Les émissions attribuables aux étapes production des matériaux (A1-A3) représentent respectivement 87 % et 89 % des émissions du pont Lafarge hybride en bois et du pont Lafarge en acier-béton. Dans les deux scénarios (le pont hybride en bois et le pont en acier-béton), les étapes de transport des matériaux contribuent à hauteur de 9 % des émissions GES. Dans les deux cas, le transport (A4) est la deuxième étape la plus contributrice aux émissions totales. Finalement, l'étape de construction (A5) est, dans les deux scénarios, l'étape la moins contributrice avec les contributions respectives de 4 % et 3 %.

Outre les émissions de GES, la Figure 13 montre que le pont Lafarge hybride en bois présente des impacts plus faibles que le pont en acier-béton, et ce, dans les neuf autres indicateurs. De tous ces indicateurs, la réduction n'est significative que pour l'indicateur épuisement des ressources fossiles (12 %), selon les seuils de signifiante présentés au Tableau 19.

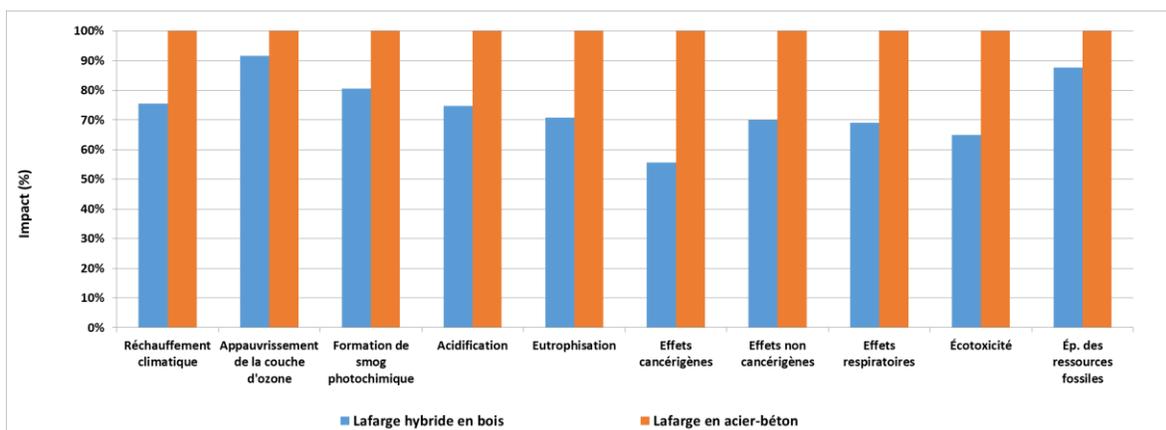


Figure 13. Illustration comparative des impacts du pont Lafarge hybride en bois et ceux du pont en acier-béton

## 6.2 Analyse de contribution aux émissions de GES des ponts

### 6.2.1 Pont Paradis – Analyse de contribution des matériaux aux émissions GES

La Figure 14 présente les impacts liés à la consommation des matériaux dans chaque scénario de ponts. Les matériaux les plus contributeurs aux émissions dans le scénario Paradis en bois sont le bois lamellé-collé, le bois de sciage traité et l’acier galvanisé à chaud contribuant respectivement à hauteur de 47 %, 38 % et 10 %. Ces trois matériaux totalisent 95 % des impacts attribuables aux étapes A1-A3. Les autres matériaux tels que l’Innoprep, l’Innocryl, la plaque UHMW, le bois lamellé-croisé et le contreplaqué totalisent une contribution avoisinant les 5 %.

Quant au scénario Pont Paradis en acier-bois, les matériaux les plus contributeurs sont l’acier galvanisé à chaud et le bois de sciage traité contribuant respectivement à hauteur de 83 % et 16 %. Les deux matériaux totalisent 99 % des impacts attribuables à l’étape de production des matériaux (A1-A3). La part de contribution de l’arséniate de cuivre chromaté est négligeable dans ce scénario.

En comparant uniquement les étapes de production des matériaux (A1-A3), la Figure 14 montre un écart de réduction est de 62 % au sein desdites étapes. L’étude montre que l’essentielle du rendement de réduction des émissions a lieu à l’étape de production des matériaux. Les résultats détaillés et les valeurs absolues des impacts pour les autres indicateurs sont présentés en annexe (voir Annexe V).

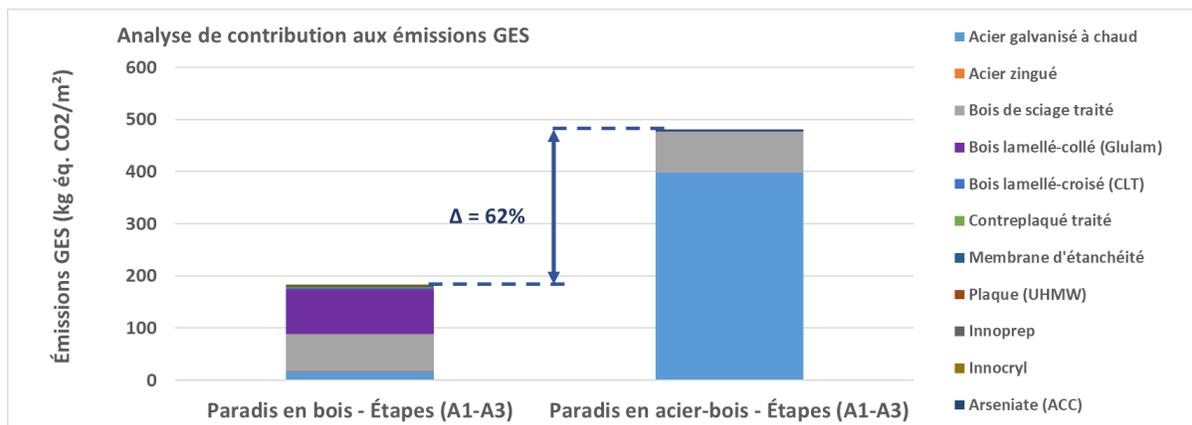


Figure 14. Analyse de contribution des matériaux aux émissions GES des scénarios du pont Paradis – Étapes (A1-A3)

### 6.2.2 Pont Lafarge – Analyse de contribution des matériaux aux émissions GES

La Figure 15 présente les émissions liées à la consommation des matériaux dans chaque scénario de ponts. Les matériaux les plus contributeurs dans le scénario de pont Lafarge hybride en bois sont le béton, l’acier galvanisé, l’asphalte, le gravier et lamellé-collé contribuant respectivement à hauteur de 36 %, 36 %, 8 %, 8 % et 7 %. Ces six matériaux totalisent 96 % des émissions attribuables à la consommation des matériaux.

Les autres matériaux tels que le bois lamellé-croisé, le contreplaqué, la membrane et l’Innocryl totalisent une contribution avoisinant les 4 % restant d’émissions attribuables à la production des matériaux. Cette analyse montre que la contribution aux impacts du lamellé-collé arrive en cinquième position au sein du pont hybride avec environ 7 % seulement des émissions du pont hybride en bois. La contribution des autres matériaux en bois tels que le bois lamellé-croisé et le contreplaqué est presque négligeable.

Quant au scénario Lafarge en acier-béton, les matériaux les plus contributeurs sont l'acier galvanisé, le béton, l'asphalte et le gravier contribuant respectivement à hauteur de 47 % et 39 %, 6 % et 6 %. Les quatre matériaux totalisent 97 % des émissions attribuables à l'étape de production des matériaux.

En comparant entre elles les étapes de production des matériaux, la Figure 15 montre un écart de réduction de 26 % au sein desdites étapes. L'étude montre que les véritables gains en matière de réduction de GES ont lieu dans les étapes A1 à A3. Les résultats détaillés et les valeurs absolues des impacts pour les autres indicateurs sont présentés en annexe (voir Annexe V).

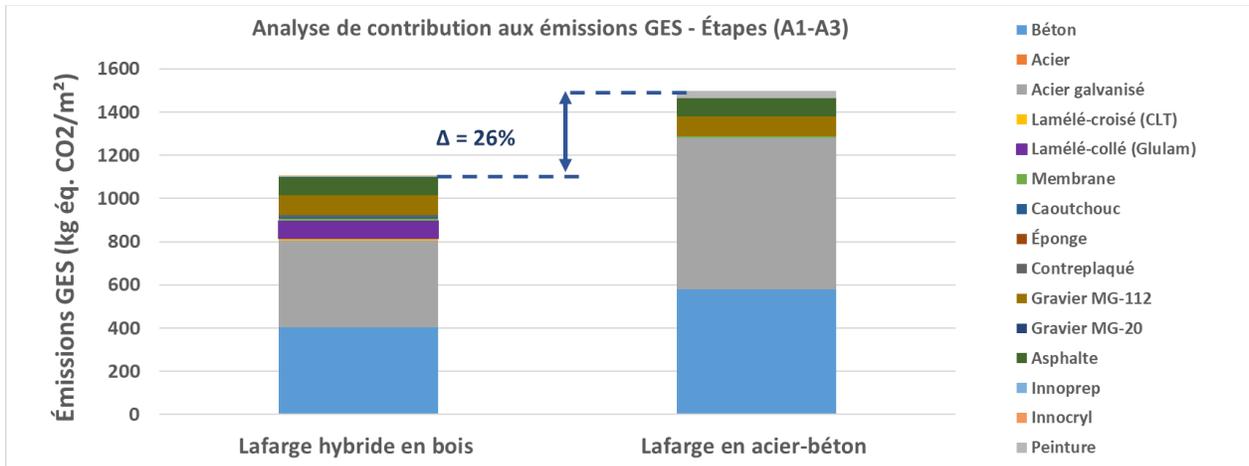


Figure 15. Analyse de contribution des matériaux aux émissions GES des scénarios du pont Lafarge – Étapes (A1-A3)

## 6.3 Analyse de sensibilité

### 6.3.1 Impacts totaux des ponts selon IMPACT 2002+

La méthode IMPACT2002+ v2.14 est une méthode qui présente quinze catégories d'impact intermédiaires comme présentées au Tableau 19. Les résultats de l'analyse de sensibilité sont présentés à la Figure 16. Elle montre que les tendances relatives des profils environnementaux observées sous la méthode TRACI sont quasiment conservées dans la plupart des catégories d'impacts sauf pour l'indicateur occupation des terres. En effet, pour ces indicateurs, les tendances des profils environnementaux sont en faveur du pont acier-bois.

Pour ce qui est des indicateurs occupation des terres et rayonnement ionisant, ceux-ci n'existent pas dans TRACI. De fait, il est impossible de se prononcer sur la conservation des tendances ou non entre les deux méthodes ou encore, il est impossible de juger la cohérence ou la robustesse des résultats sur la base de ces indicateurs.

En ce qui concerne les deux autres indicateurs (effets cancérigènes et les effets non cancérigènes), il est important de souligner que ces deux indicateurs n'ont pas les mêmes unités équivalentes. En effet, dans IMPACT 2002+, les deux indicateurs sont exprimés en kilogramme équivalent de chloroéthène (kg éq. C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>Cl), alors que dans TRACI ces derniers sont exprimés en unité de toxicité humaine (CTUh). De plus d'une méthode à l'autre, ces deux indicateurs ne sont pas caractérisés par les mêmes substances. Par conséquent, d'une méthode à l'autre, ils n'ont pas les mêmes facteurs de caractérisation (FCs).

Néanmoins, en analysant de près quelques catégories d'impacts, les tendances relatives aux indicateurs du potentiel de réchauffement climatique, de l'acidification et eutrophisation sont similaires à celles obtenues sous TRACI. En effet, comparativement au scénario en acier-bois, le pont Paradis en bois présente une réduction de 49 % et 36 % pour les deux premiers et une augmentation de +2 % respectivement pour les indicateurs du potentiel de réchauffement climatique, acidification et eutrophisation. Alors que sous TRACI, les mêmes indicateurs affichent une réduction de 48 % et 36 % pour les deux premiers et une augmentation d'impact de +23 % pour l'eutrophisation. La différence des tendances relatives sous l'eutrophisation s'explique par le fait que d'une méthode à l'autre l'indicateur eutrophisation présente différentes unités (kg éq. PO4 P-lim/kg versus kg éq. N /kg) et différents facteurs de caractérisation. L'analyse de contribution sous l'indicateur eutrophisation a révélé que la contribution maximale dans les deux scénarios comparés provient de l'arséniate de cuivre chromaté (ACC) utilisé pour traiter le bois. L'analyse de contribution de ACC a révélé que la substance responsable est l'émission de phosphate en milieu aquatique. Or le facteur de caractérisation du phosphate sous IMPACT 2002 est de 1 kg éq. PO4 P-lim/kg alors qu'il est de 2,38 kg éq. N/kg.

En mettant l'emphase sur l'indicateur relatif aux émissions GES, l'analyse montre que d'une méthode à l'autre, les tendances des résultats sont conservées. Autrement dit, la comparaison des deux méthodes d'évaluation d'impacts (TRACI et IMPACT 2002+) prouve la cohérence et la robustesse des résultats obtenus, ce qui par le même effet donne une certitude aux conclusions qui découlent de l'étude de cas. Les résultats détaillés et les valeurs absolues des impacts obtenus sous IMPACT2002+ sont présentés en annexe (voir Annexe V).

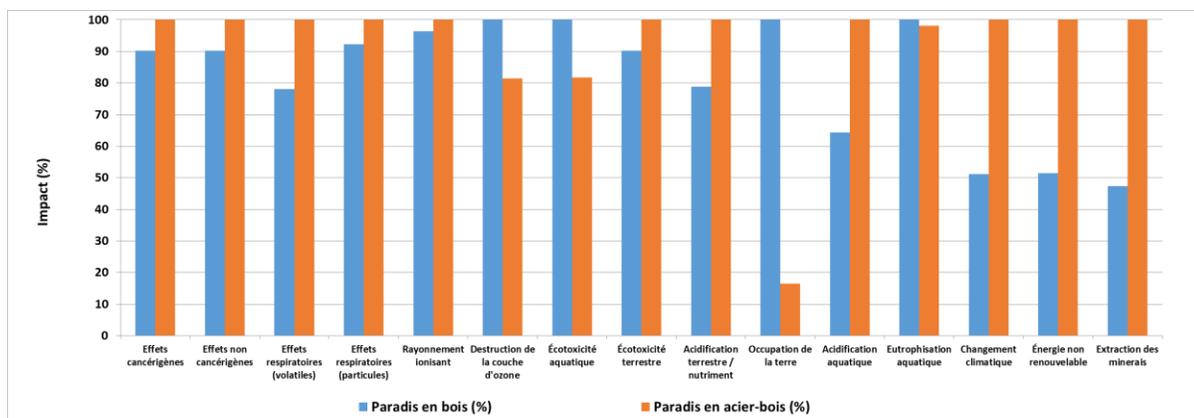


Figure 16. Comparaison d'impacts entre ponts Paradis en bois et pont Paradis en acier-bois

### 6.3.2 Hypothèses, traitement des exclusions au-delà des frontières du système et analyse de sensibilité

Dans cette section quelques hypothèses sont formulées afin de collecter les données qui seront prises en compte dans une analyse de sensibilité qui inclurait le module B4 et les modules allant de C1 à C4.

### 6.3.2.1 Hypothèses et approximation des données

#### 6.3.2.1.1 Module B2 et B3 Maintenance, réparation

Les ponts à l'étude ont différents matériaux et caractéristiques. Bien que les matériaux constitutifs de ces ponts soient exposés aux intempéries, il est possible d'assurer l'intégrité physique, structurale et architecturale de ces ponts grâce à la fréquence calculée des maintenances et réparations de ces derniers.

En formulant l'hypothèse que les deux types de ponts et leurs scénarios respectifs reçoivent équitablement de meilleurs services de maintenance, d'entretien et de rénovation, et ce, à des fréquences jugées bien adaptées à chaque style de conception, et en faisant l'hypothèse que l'étanchéité des tabliers est conservée tout au long de la durée de vie de chaque pont, il est possible que tous les matériaux de la fondation, les matériaux des culées, les matériaux structuraux et sous-structuraux atteignent ou dépassent la durée de vie définie de 50 ans ou 75 ans. En tenant compte de ce qui précède, une communication réalisée avec les ingénieurs de Hexaki, de Nordic Structures et de ceux du MFFP a permis d'estimer les durées de vie des matériaux présentées aux tableaux Tableau 20 et Tableau 21 [80]. Les tableaux présentant les durées de vie des scénarios du pont Lafarge sont présentés en annexe (voir Annexe VI).

Tableau 20. Illustration des durées de vie des matériaux – pont Paradis en bois [80]

Inventaire des matériaux pour le pont forestier de la rivière Paradis		
Pont Paradis en bois		
ART.	DESCRIPTION	DURÉE DE VIE
<b>2,0</b>	<b>Structure de bois Nordic</b>	<b>Sous hypothèse</b>
	Acier galvanisé à chaud	50 ans
	Bois lamellé-collé	50 ans
	Bois lamellé-croisé	50 ans
	Contreplaqué traité	25 ans
	Membrane d'étanchéité	50 ans
	Nylon (UHMW)	50 ans
2,20		
<b>3,0</b>	<b>Tablier</b>	
	Acier galvanisé à chaud	50 ans
	Acier zingué	25 ans
3,40		
	Glissière (12x12 + 8x8)	10-15 ans
	4x8 en bois traité	10-15 ans
	8x8 en bois traité	25 ans
3,40		

Tableau 21. Illustration des durées de vie des matériaux – pont Paradis en acier-bois [80]

<b>Inventaire des matériaux pour le pont forestier de la rivière Paradis</b>		
<b>Pont Paradis acier-bois</b>		
<b>ART.</b>	<b>DESCRIPTION</b>	<b>DURÉE DE VIE</b>
<b>2,0</b>	<b>Structure d'acier</b>	<b>Sous hypothèse</b>
	Plaques raidisseurs 850 x 175 x 16 (20)	50 ans
	Plaques appuis (600 x 500 x 25 * 6)	50 ans
	Poutre principale - acier noir - AT	50 ans
<b>2,10</b>		
	Boulonnage en acier galvanisé (17 boulons $\frac{3}{4}$ * 5 * 2)	50 ans
	Ancrage appui (4 tirefonds galvanisés x 3 x 2)	50 ans
	Contreventement en acier galvanisé	50 ans
<b>2,20</b>		
<b>3,0</b>	<b>Tablier</b>	
	Plaques d'attache 8 x 8 aux WWF	50 ans
	Boulons pour glissières (51 x 2= 102 boulons de 32 po x $\frac{3}{4}$ )	50 ans
	Vis pour plaques d'attache	50 ans
	Vis pour 8x8	25 ans
<b>3,30</b>		
	Glissière (12 x 12 + 8 x 8)	10-15 ans
	4 x 8 en bois traité	10-15 ans
	8 x 8 en bois traité	25 ans
<b>3,40</b>	<b>Sous total bois</b>	

#### 6.3.2.2 Module B4 – Remplacement des matériaux

En se basant sur les durées de vie des matériaux présentées dans la section précédente, les quantités des matériaux consommés à l'étape B4 sont présentées dans les tableaux Tableau 22 et Tableau 23.

Tableau 22. Quantité de remplacement pour le pont Paradis

Matériaux	Paradis en bois	Paradis en acier-bois	Unité
Acier zingué/ acier galvanisé	0,16	0.48	kg/m <sup>2</sup>
Glissière (12 x 12 + 8 x 8)	51,8	51,8	kg/m <sup>2</sup>
4 x 8 en bois traité	125,6	125,6	kg/m <sup>2</sup>
8 x 8 en bois traité	163,13	118,75	kg/m <sup>2</sup>
Contreplaqué	4,00	0	kg/m <sup>2</sup>

Tableau 23. Quantité de remplacement pour le pont Lafarge

Matériaux	Lafarge hybride bois	Lafarge acier-béton	Unité
Membrane	29,89	17,24	kg/m <sup>2</sup>
Caoutchouc	0,94	0	kg/m <sup>2</sup>
Éponge	0,21	0,14	kg/m <sup>2</sup>
Contreplaqué	18,6	0	kg/m <sup>2</sup>
Gravier MG-112	248,28	248,28	kg/m <sup>2</sup>
Gravier MG-112	124,14	124,14	kg/m <sup>2</sup>
Asphalte	724	724	kg/m <sup>2</sup>

### 6.3.2.3 Hypothèses et approximation des données de phase fin de vie

#### 6.3.2.3.1 Module C1-C4

À la fin de vie, les ponts sont démontés. En assumant que les déchets issus du démantèlement des ponts obéissent aux mêmes règles que le traitement des déchets issus de la construction, rénovation et démolitions (CRD) au Québec, les débris sont acheminés vers les centres de tri spécialisés situés dans un rayon de 120 km [81, 82]. Le tableau ci-dessous présente le transport des débris vers le centre de tri pour chacun des scénarios.

Tableau 24. Transport des débris

Transport des débris	Unité	Paradis en bois	Paradis en acier-bois	Lafarge hybride en bois	Lafarge en acier-béton
Transport	tkm	83	76	1 096	1 206

#### 6.3.2.3.2 Gestion et élimination

Au niveau des centres de tri spécialisés, les matériaux sont ségrégués par catégories. Certains matériaux sont recyclés, réutilisés ou revalorisés. En revanche, d'autres sont acheminés vers les sites de gestions de fin de vie et d'enfouissement au Québec, environ 80 % du bois issu des déchets de construction, rénovation

et démolition (CRD) sont réutilisés, recyclés, valorisés ou utilisés tandis qu'environ 20 % du bois issu des CRD finissent dans les sites d'enfouissement [81, 82]. En faisant l'hypothèse que le gravier est réutilisé à 100 %, le béton à 90 % et l'acier à 95 %, le tableau ci-dessous présente le reste des matériaux destinés à l'enfouissement.

Tableau 25. Transport des débris

Transport des débris	Unité	Paradis en bois	Paradis en acier-bois	Lafarge hybride en bois	Lafarge en acier-béton
Débris enfouis	Tonnes	0,15	0,25	1,87	1,90

D'après les règles d'imputations présentées à la section 4.2.14, les matériaux destinés aux recyclages, à la valorisation ou à la réutilisation sont exclus du système à l'étude. De fait, ni les impacts ni les avantages associés au processus de leur recyclage, de leur réutilisation ou de leur revalorisation ne sont pas pris en considération dans les étapes de fin de vie de cette étude [51].

#### 6.3.2.4 Ponts Paradis – Résultats de l'analyse de sensibilité incluant la fin de vie

Cette section traite des résultats du pont Paradis qui inclut l'étape de fin de vie. La Figure 17 présente la comparaison des résultats des deux scénarios du pont Paradis (en bois par rapport en acier-bois). Les résultats montrent que le pont Paradis en bois présente une plus faible empreinte carbone par rapport au pont en acier-bois. La conception du pont en bois entraîne une réduction d'environ 40 % des émissions de GES comparativement au pont en acier-bois. C'est une réduction significative considérant les incertitudes associées aux modèles et les écarts minimaux présentés au Tableau 19, soit une réduction d'environ 296 kg éq. CO<sub>2</sub> par mètre carré de ponts comparés. Les émissions au mètre carré des ponts sont respectivement de 449 kg éq. CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> et 745 kg éq. CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> pour le pont Paradis en bois et le pont Paradis en acier-bois. Les résultats détaillés et les valeurs absolues des impacts de tous les indicateurs sont présentés en annexe (voir Annexe V).

Outre les émissions de GES, l'analyse de sensibilité du pont Paradis en bois présente des impacts plus faibles que le pont Paradis en acier-bois, et ce, dans sept autres indicateurs, incluant l'appauvrissement de la couche d'ozone, la formation de smog photochimique, l'acidification, les effets cancérigènes, les effets non cancérigènes, les effets respiratoires, et l'épuisement des ressources fossiles. Selon les écarts minimaux, la réduction est non significative pour tous les sept indicateurs. En revanche, le pont Paradis en acier-bois présente des impacts plus faibles pour l'eutrophisation (6 %) et l'écotoxicité (3 %). Toutefois, ces différences ne sont pas significatives selon les écarts minimaux présentés précédemment (30 % et 90 %, respectivement) au Tableau 19.

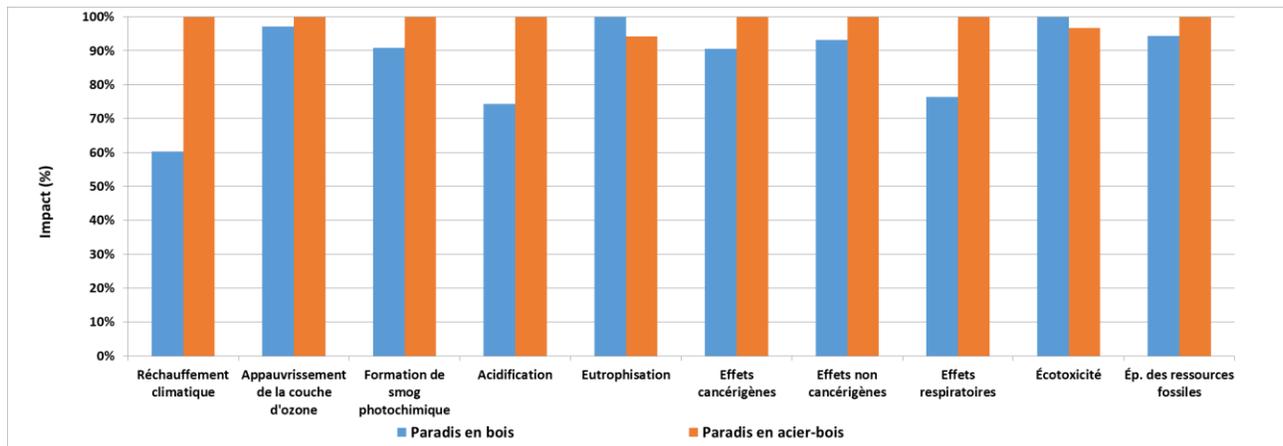


Figure 17. Impacts comparatifs des scénarios du pont Paradis – analyse de sensibilité incluant la fin de vie

### 6.3.2.5 Ponts Lafarge – Résultats de l’analyse de sensibilité incluant la fin de vie

La Figure 18 présente les résultats de l’analyse de sensibilité qui inclut l’étape de fin de vie. Les résultats montrent que le pont hybride en bois présente une empreinte carbone plus faible par rapport au pont en acier-béton. La conception du pont hybride en bois entraîne une réduction d'environ 21 % des émissions de GES comparativement au pont en acier-béton. C’est une réduction significative considérant les seuils de signifiante présentés au Tableau 19. C’est une réduction d’environ 424 kg éq. CO<sub>2</sub> par mètre carré de ponts comparés. Les émissions au mètre carré des ponts sont respectivement de 1622 kg éq. CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> et 2046 kg éq. CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> pour le pont Lafarge hybride en bois et le pont Lafarge en acier-béton. Les résultats détaillés et les valeurs absolues des impacts de tous les indicateurs sont présentés en annexe (voir Annexe V). Outre l’indicateur de réchauffement climatique, la Figure 18 montre que le pont Lafarge hybride en bois présente des impacts plus faibles dans neuf autres indicateurs. De tous ces indicateurs, la réduction n’est significative que pour l’indicateur épuisement des ressources fossiles (12 %), selon les seuils présentés au Tableau 19.

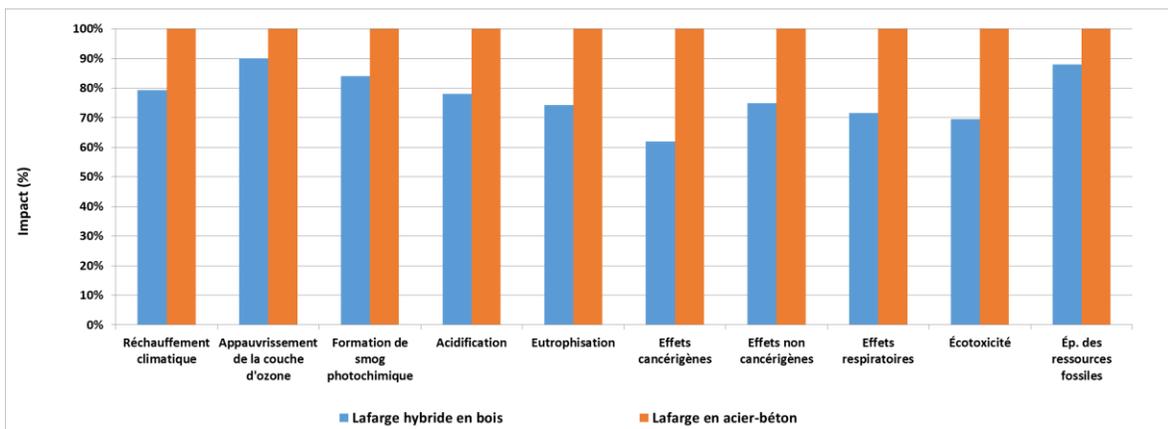


Figure 18. Impacts comparatifs des scénarios du pont Lafarge – analyse de sensibilité incluant la fin de vie

### 6.3.3 Carbone biogénique

#### 6.3.3.1 Informations additionnelles – Traitement du carbone biogénique

Étant donné que la portée de l'étude actuelle n'inclut pas la fin de vie des ponts, le carbone biogénique ne peut pas être inclus dans les résultats finaux (ISO 21930). Toutefois, l'information additionnelle concernant le carbone biogénique peut être fournie pour faciliter la compréhension et l'implication de celui-ci, advenant l'inclusion ultérieure des étapes de fin de vie dans les études à venir. Le bois pour les ponts Paradis et Lafarge ont été fournis par Nordic structures. Or les forêts gérées par Nordic Structures sont certifiées par le Forest Stewardship Council® (FSC), de sorte que le bois utilisé pour fabriquer le bois d'œuvre, du bois lamellé-collé et du bois lamellé-croisé proviennent des forêts certifiées de manière indépendante comme légales et durables. Les facteurs de caractérisation fournis dans les normes ISO 14067 et ISO 21930 pour les émissions et l'absorption du carbone forestier (1 et -1, respectivement) sont appliqués pour le calcul du potentiel de réchauffement climatique. Les émissions et absorptions de carbone forestier pour le pont Paradis en bois, le pont Paradis en acier-bois et le pont Lafarge hybride en bois sont présentées dans les tableaux ci-dessous. La teneur en carbone du bois (49,80 %) fournie par Hunt et al.,[83] a été appliquée pour estimer le carbone biogénique.

Les tableaux Tableau 26, Tableau 27 et Tableau 28 présente les informations relatives au carbone biogénique contenu dans le produit final (pont) ainsi que les informations relatives aux émissions et absorptions du Carbon biogénique des scénarios de ponts Paradis en bois, Paradis en acier-bois et le pont Lafarge hybride en bois. Le scénario Lafarge acier-béton ne contient pas de carbone biogénique, car le bois ne fait pas partie des matériaux de composition dudit scénario.

Tableau 26. Émissions et absorptions de carbone biogénique associées au pont Paradis en bois

Pont Paradis en bois	kg éq. CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>					
	Total	A1	A2	A3	A4	A5
Absorptions de carbone*	<b>(626)</b>	(626)				
Carbone contenu dans le produit final**	<b>609</b>					609
Émissions potentielles de carbone biogénique***	<b>17</b>					17
*L'absorption de carbone inclut la totalité du carbone transporté jusqu'au site de construction. **Carbone contenu dans le produit fait référence le carbone qui demeure dans le produit final (pont), une fois le bois installé sur le pont. ***Fait référence au carbone biogénique potentiellement émis par les déchets du bois sur site. En effet, les émissions effectives du carbone biogénique relatives aux déchets sur site dépendent du scénario de traitement desdits déchets (réutilisés, revalorisés, enfouis ou incinérés).						

Tableau 27. Émissions et absorptions de carbone biogénique associées au pont Paradis en acier-bois

Pont Paradis en acier-bois	kg éq. CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>					
	Total	A1	A2	A3	A4	A5
Absorptions de carbone*	(331)	(331)				
Carbone contenu dans le produit final**	315					315
Émissions potentielles du carbone biogénique***	16					16
<p>*L'absorption de carbone inclut la totalité du carbone transporté jusqu'au site de construction.  **Carbone contenu dans le produit fait référence le carbone qui demeure dans le produit final (pont), une fois le bois installé sur le pont.  ***Fait référence au carbone biogénique potentiellement émis par les déchets du bois sur site. En effet, les émissions effectives du carbone biogénique relatives aux déchets sur site dépendent du scénario de traitement des déchets (réutilisés, revalorisés, enfouis ou incinérés).</p>						

Tableau 28. Émissions et absorptions de carbone biogénique associées au pont Lafarge hybride en bois

Pont Lafarge hybride en bois	kg éq. CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>					
	Total	A1	A2	A3	A4	A5
Absorptions de carbone*	(709)	(709)				
Carbone contenu dans le produit final**	701					701
Émissions potentielles du carbone biogénique***	8					8
<p>*L'absorption de carbone inclut la totalité du carbone transporté jusqu'au site de construction.  **Carbone contenu dans le produit fait référence le carbone qui demeure dans le produit final (pont), une fois le bois installé sur le pont.  ***Fait référence au carbone biogénique potentiellement émis par les déchets du bois sur site. En effet, les émissions effectives du carbone biogénique relatives aux déchets sur site dépendent du scénario de traitement des déchets (réutilisés, revalorisés, enfouis ou incinérés).</p>						

### 6.3.3.2 Hypothèse et analyse de sensibilité sur l'inclusion du carbone biogénique à la fin de vie des ponts

L'analyse de sensibilité des résultats a été réalisée en modifiant la méthode TRACI. La méthode a été modifiée en ajoutant les absorptions et les émissions biogéniques de CO<sub>2</sub> avec des facteurs de caractérisation -1 et +1, respectivement.

En ce qui concerne l'élimination des déchets de bois issus de la construction, rénovation et de démolition (CRD) au Québec, le gouvernement du Québec encourage le transport des déchets de CRD vers les centres de tri. Environ 80 % du bois issu des déchets CRD acheminés vers les centres de tri sont réutilisés, recyclés, valorisés ou utilisés tandis qu'environ 20 % du bois issu des CRD finissent dans les sites d'enfouissement [81, 82]. Seule une petite partie du bois (environ 5 %) se décompose dans les décharges et les 95 % restants sont stockés de manière permanente dans des décharges. Dans des conditions anaérobiques, le bois se décompose et émet du dioxyde de carbone et du méthane (50:50) [84]. Une partie de ce méthane est capturée dans les systèmes de captage des gaz d'enfouissement (environ 75 %) et le méthane restant (environ 25 %) est rejeté dans l'atmosphère. Les impacts du méthane sur le réchauffement climatique sont environ 27,75 fois supérieurs à ceux du dioxyde de carbone. Cela signifie que :

- une portion (80 % ) du bois sort complètement du système de fin de vie à l'étude (voir section 4.2.14.4);
  - en réalité, il y a rien à dire sur l'issue des 80 % du carbone biogénique – l'hypothèse « osée » pour des besoins de calcul serait que le bois est réutilisé. Dans une telle hypothèse, le bois à une seconde vie, et les 80 % du carbone biogénique demeurent stockés dans d'autres produits du bois de seconde vie;
- des 20 % du bois restant dans le système de fin de vie à l'étude, seulement une portion de 5 % du bois qui se décompose, dans les conditions anaérobiques alors que les 95 % du bois restent stockés dans les décharges. Autrement dit, les 19 % du carbone biogénique du bois CRD resteront stockés sous forme de bois non-décomposé;
- dans les conditions anaérobiques, les 5 % du 20 %, c'est-à-dire, seulement le 1 % du bois CRD se décompose comme suit : les 50 % du 1 % vont émettre du dioxyde de carbone et les autres 50 % vont émettre du méthane;
  - les 75 % du méthane émis sont capturés dans les systèmes de captage des gaz d'enfouissement – cette portion capturée devient hors système (voir section 4.2.14.4); et finalement
  - les 25 % du méthane émis sont relâchés dans l'atmosphère. Or chaque kilogramme du méthane biogénique émis donne lieu à 27,7 kilogrammes de dioxyde de carbone biogénique équivalents relâchés dans l'atmosphère.

Au regard de ce qui précède, les tableaux ci-dessous (Tableau 29, Tableau 30 et Tableau 31) présentent les émissions du carbone biogénique à l'étape C4 selon le contexte du traitement des déchets CRD au Québec. Les tableaux présentent aussi la balance du carbone biogénique selon ledit contexte.

Tableau 29. Émissions et absorptions de carbone biogénique associées au pont Paradis en bois

Pont Paradis en bois		kg éq. CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>															
Étape de cycle de vie	Total	A1	A2	A3	A4	A5*	B1	B2	B3	B4 **	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4
Absorptions de carbone	(1920)	(626)								(1294)							
Carbone contenu dans le produit***	1871					609				1262							
Carbone contenu dans les rejets de l'étape	49					17				32							
<b>Balance du carbone biogénique avant démolition du pont</b>	<b>0</b>																
<p>*Cette étape génère des déchets de bois contenant du carbone biogénique (17 kg éq. CO<sub>2</sub>). Ces déchets sont traités selon le contexte des déchets CRD du Québec.</p> <p>** Cette étape génère aussi des déchets de bois contenant du carbone biogénique (32 kg éq. CO<sub>2</sub>). Ces déchets sont aussi traités selon le contexte des déchets CRD du Québec.</p> <p>*** Selon le contexte québécois, 99 % de ce carbone biogénique contenu dans le produit sort complètement du système à l'étude en fin de vie.</p>																	
Émissions totales estimées du carbone biogénique (après démolition) selon le contexte québécois	33,77****					0,3				11,7							21,8
<p>**** Émissions totales estimées du carbone biogénique sont dérivées des déchets issus de A5, B4 et ceux de démolition selon le contexte du scénario québécois, en voici le calcul : 50 %*(1 %) *[609+1262+17+32] + 50 %*(1 %) * [609+1262+17] *[(12/44) *(16/12)] *(25 %) *(27,7) =33,77</p> <p><b>Balance nette du carbone biogénique après démolition du pont : -1886,23 kg éq. CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup></b></p>																	

Tableau 30. Émissions et absorptions de carbone biogénique associées au pont Paradis en acier bois

Pont Paradis acier-bois	Total	kg éq. CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>															
		A1	A2	A3	A4	A5*	B1	B2	B3	B4**	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4
Absorptions de carbone	(1444)	(331)								(1113)							
Carbone contenu dans le produit***	1401					315				1086							
Carbone contenu dans les rejets de l'étape	43					16				27							
<b>Balance du carbone biogénique avant démolition du pont</b>	<b>0</b>																
<p>*Étape A5 génère des déchets de bois contenant du carbone biogénique (16 kg éq. CO<sub>2</sub>). Ces déchets sont traités selon le contexte des déchets CRD du Québec.</p> <p>** Étape B4 génère aussi des déchets de bois contenant du carbone biogénique (27 kg éq. CO<sub>2</sub>). Ces déchets sont aussi traités selon le contexte des déchets CRD du Québec.</p> <p>*** Selon le contexte québécois, 99 % de ce carbone biogénique contenu dans le produit sort complètement du système à l'étude en fin de vie</p>																	
Émissions totales estimées du carbone biogénique (en fin de vie du pont) selon le contexte québécois	25,4***					0,28				10,02							15,09
<p>**** Émissions totales estimées du carbone biogénique sont dérivées des déchets A5, B4 et ceux de démolition selon le contexte du scénario québécois, en voici le calcul : <math>50\% * (1\%) * [315+1086+16+27] + 50\% * (1\%) * [315+1086+16+27]</math>  <math>* [(12/44) * (16/12)] * (25\%) * (27,7) = 25,4</math></p> <p><b>Balance nette du carbone biogénique après démolition du pont: -1418,6 kg éq. CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup></b></p>																	

Tableau 31. Émissions et absorptions de carbone biogénique associées au pont Lafarge hybride en bois

Pont Lafarge hybride en bois	Total	kg éq. CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>															
		A1	A2	A3	A4	A5*	B1	B2	B3	B4**	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4
Absorptions de carbone	(779)	(709)								(70)							
Carbone contenu dans le produit***	769					701				68							
Carbone contenu dans les rejets de l'étape	10					8				2							
<b>Balance du carbone biogénique avant démolition du pont</b>	<b>0</b>																
*Étape A5 génère des déchets de bois contenant du carbone biogénique (8 kg éq. CO <sub>2</sub> ). Ces déchets sont traités selon le contexte des déchets CRD du Québec. ** Étape B4 génère aussi des déchets de bois contenant du carbone biogénique (2 kg éq. CO <sub>2</sub> ). Ces déchets sont aussi traités selon le contexte des déchets CRD du Québec. *** Selon le contexte québécois, 99 % de ce carbone biogénique contenu dans le produit sort complètement du système à l'étude en fin de vie																	
Émissions totales estimées du carbone biogénique (en fin de vie du pont) selon le contexte québécois	13,7					0,14				0,63							12,92
**** Émissions totales estimées du carbone biogénique sont dérivées des déchets A5, B4 et ceux de démolition selon le contexte du scénario québécois, en voici le calcul : $50\% \cdot (1\%) \cdot [701+68+8+2] + 50\% \cdot (1\%) \cdot [701+68+8+2] \cdot [(12/44) \cdot (16/12)] \cdot (25\%) \cdot (27,7) = 13,7$																	
<b>Balance nette du carbone biogénique après démolition du pont :-765,3 kg éq. CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup></b>																	

### 6.3.4 Analyse de sensibilité relative aux méthodes d'allocation

Les impacts environnementaux des produits du bois intégrés dans les ponts ont été modélisés à partir des déclarations environnementales de produits (DEP) publiées en Amérique du Nord. Il s'agit des produits du bois lamellé-collé, du bois lamellé-croisé, du bois de sciage et du contreplaqué [35-38]. Les quatre DEP ont été produites en conformité avec les règles des catégories de produits (PCR) [39, 40]. Or, la norme ISO 14044 exige d'effectuer une analyse de sensibilité lorsque différentes méthodes d'allocation sont possibles tels que dans le cas des produits et co-produits du bois. Dans le cas présent, les DEP utilisées ont été dérivées à partir des allocations massiques, il paraît pertinent, conformément à ISO 14040/44, d'effectuer une analyse de sensibilité en usant des allocations économiques pour les mêmes produits de bois afin de contraster les résultats de l'étude. Pour ce faire, une autre modélisation des produits du bois est faite en usant des processus extraits de la base de données ecoinvent v3.5, car la base de données ecoinvent est une base de données qui priorise l'allocation économique. Le Tableau 32 présente les processus du bois lamellé-collé, du bois de sciage et du contreplaqué, lesquels ont été extraits d'ecoinvent v3.5 et adaptés au contexte régional du Québec. Toutefois, la base de données ecoinvent ne répertorie aucune donnée relative au bois lamellé-croisé (cross Laminated Timber (CLT)). Pour modéliser

les impacts du bois lamellé-croisé, la déclaration environnementale du CLT de Nordic Structures a été utilisée, car celle-ci a été produite en appliquant l'allocation économique (voir Figure 19) [85, 86].

Tableau 32. Processus modélisant les produits du bois sur Ecoinvent

Matériaux	Processus de modélisation	Statut du modèle	Base de données	Commentaires
Bois lamellé-collé,	Glued laminated timber, for indoor use (CA-QC)   production, APOS, U	Original	Ecoinvent v3.5	Modélisation «indoor use» par défaut faute de ne pas trouver le modèle « outdoor use »
Bois lamellé-croisé	Cross Laminated timber	Créé	Modèles créés à partir des fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) et d'une déclaration environnementale de produit (DEP)	[36, 86-89]
Bois de sciage/ Bois d'œuvres	Sawnwood, board, softwood, raw, dried (u = 20 %) (CA QC)   board, softwood, raw, kiln drying to u = 20 %   APOS, U	Original	Ecoinvent v3.5	Ce choix est consistant car ce processus est utilisé pour modéliser le bois de sciage dans le modèle suivant : « <i>Glued laminated timber, for indoor use (CA-QC)   production, APOS, U</i> »
Contreplaqué	Plywood, for outdoor use (CA-QC)   production   APOS, U	Original	Ecoinvent v3.5	

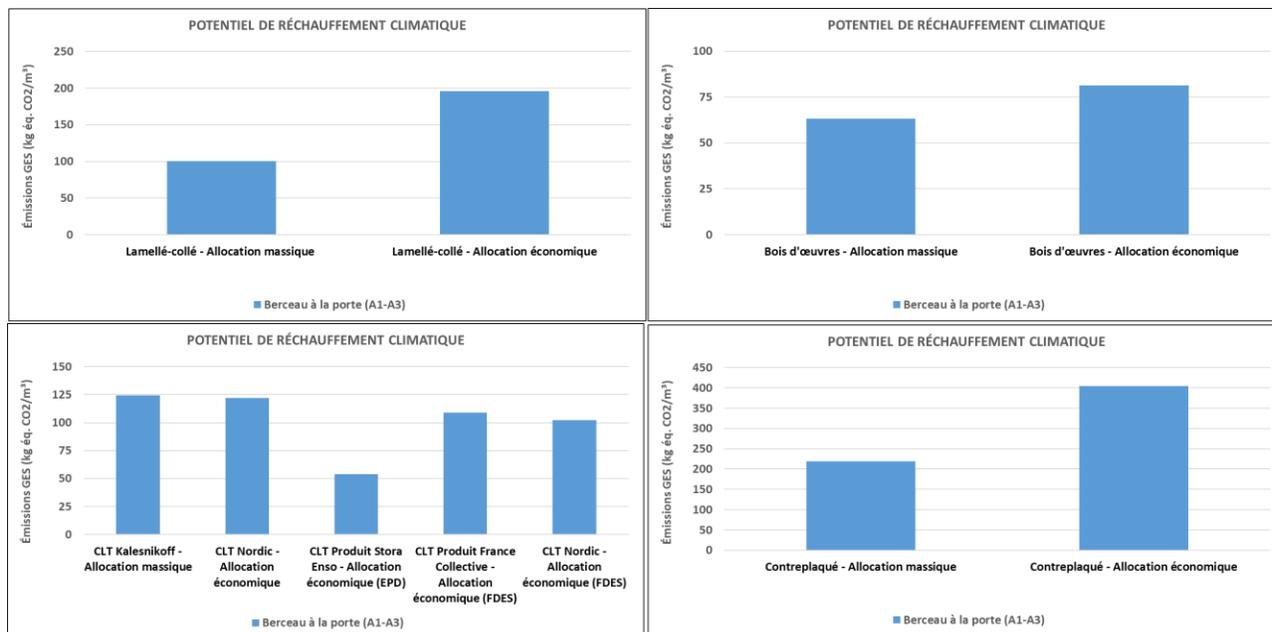


Figure 19. Émissions des gaz à effet de serre (GES) des produits de bois selon les allocations massiques et économiques

En mettant l'accent sur l'empreinte carbone des produits du bois, la Figure 19 donne une illustration de la variation des émissions GES des produits du bois en fonction des méthodes d'allocation. Elle montre que les empreintes carbonées du bois lamellé-collé, du bois d'œuvre et du bois contreplaqué sont plus élevées lorsque la méthode d'allocation économique est appliquée. En revanche, l'empreinte carbone du bois lamellé-croisé est plus faible sous la méthode d'allocation économique. En effet, les émissions GES de du bois lamellé-croisé de Kalesnikoff Lumber Co (sous le format DEP nord-américaine) sont de 124,50 kg éq. CO<sub>2</sub> sous l'allocation massique alors qu'elles sont respectivement de 121,89 kg éq. CO<sub>2</sub>, 53,8 kg éq. CO<sub>2</sub>, 109 kg éq. CO<sub>2</sub> et 102 kg éq. CO<sub>2</sub> sous allocation économique pour le bois lamellé-croisé de Nordic Structures de Stora Enso, le bois lamellé-croisé de France Collective, et le bois lamellé-croisé de Nordic Structures sous le format fiche FDES tel que publié en Europe.

Dans une approche plus conservatrice, la suite des analyses de sensibilité sur les résultats des ponts selon l'allocation économique s'effectuera avec le bois lamellé-collé de Nordic Structures qui présente des émissions les plus élevées (121,89 kg éq. CO<sub>2</sub>), sous allocation économique, que les autres émissions de CLT répertoriées.

#### 6.3.4.1 Pont Paradis – allocation économique vs allocation massique sur les produits du bois

Figure 20 montre que le pont Paradis en bois présente des impacts plus faibles que le pont Paradis en acier-bois, dans trois indicateurs, incluant le réchauffement climatique, l'acidification, et les effets cancérigènes. Selon les écarts minimaux présentés au Tableau 19, la réduction des impacts est significative pour l'indicateur réchauffement climatique (44 %) et non-significative pour les deux autres. En revanche, le pont Paradis en acier-bois présente des impacts plus faibles pour les sept autres indicateurs, incluant l'appauvrissement de la couche d'ozone (22 %), la formation de smog photochimique (14 %), l'eutrophisation (37 %), les effets non cancérigènes (13 %), les effets respiratoires (9 %), l'écotoxicité (28 %)

et l'épuisement des ressources fossiles (18 %). Toutefois, ces réductions en faveur du pont Paradis en acier-bois, ne sont significatives que pour l'indicateur eutrophisation.

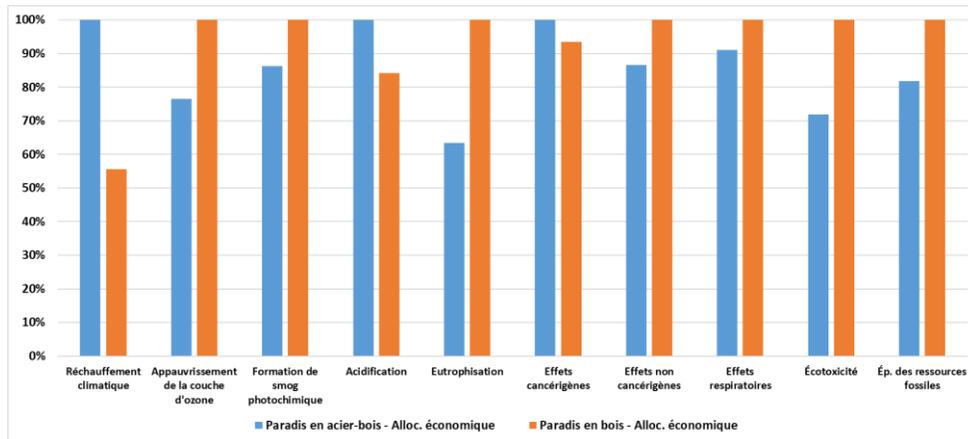


Figure 20. Comparaison d'impacts entre ponts Paradis en bois et pont Paradis en acier-bois en considérant l'allocation économique

#### 6.3.4.2 Pont Lafarge – allocation économique vs allocation massique sur les produits du bois

La Figure 21 montre que le pont Lafarge hybride en bois présente des impacts plus faibles que le pont en acier-béton dans cinq indicateurs incluant le réchauffement climatique, l'acidification, les effets cancérigènes, les effets non cancérigènes et la toxicité. De ces cinq indicateurs, la réduction n'est significative que pour l'indicateur réchauffement climatique (22 %), selon les seuils d'écart minimaux présentés au Tableau 19. En revanche, le pont Lafarge en acier-béton présente des impacts plus faibles pour les cinq autres indicateurs, incluant l'appauvrissement de la couche d'ozone (12 %), la formation de smog photochimique (1 %), l'eutrophisation (1 %), les effets cancérigènes (16 %), les effets non cancérigènes (2 %) et l'écotoxicité (3%). De toutes ces réductions en faveur du pont Lafarge en acier-béton, aucune n'est significative.

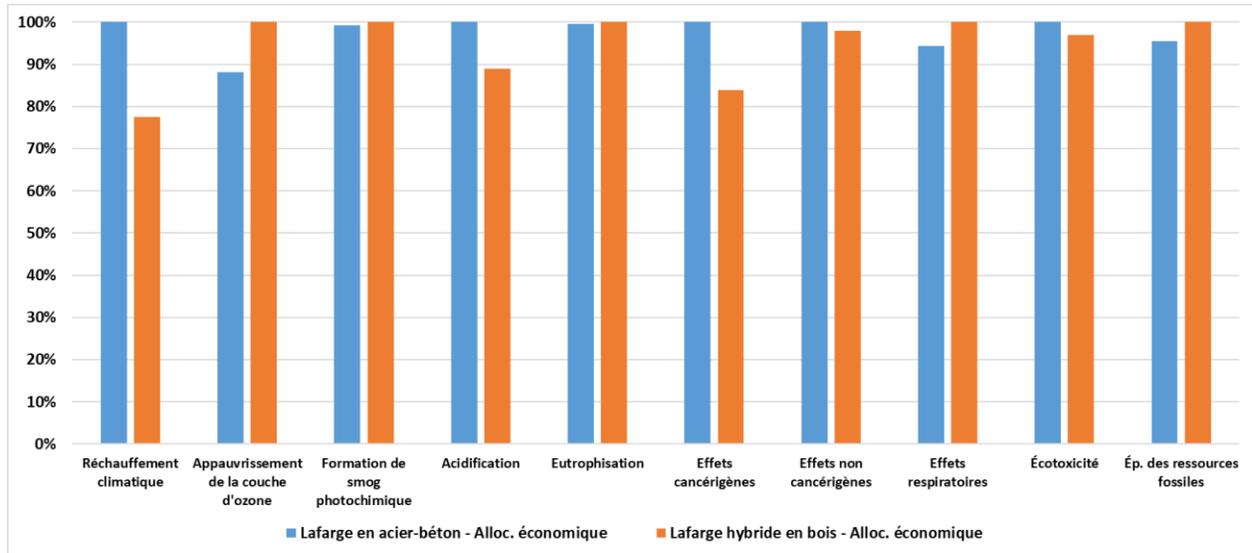


Figure 21. Comparaison des impacts du pont Lafarge hybride en bois et ceux du pont Lafarge en acier-béton considérant l'allocation économique

### 6.3.5 Analyse de sensibilité relative aux incertitudes de ( $\pm 5\%$ et $\pm 30\%$ ) sur les données de conception

Une approche en chassé-croisé aux bornes des intervalles d'incertitudes ( $\pm 5\%$  et  $\pm 30\%$ ) a été utilisée pour analyser l'effet des incertitudes sur les résultats. Le but de cette approche étant de focaliser l'analyse autour de deux cas probables ( $-5\%$  et  $+30\%$  versus  $+5\%$  et  $30\%$ ) pouvant avoir des effets extrêmes sur les résultats.

En appliquant les incertitudes de  $-5\%$  et  $+30\%$  respectivement sur les données du pont Paradis en bois et du pont Paradis en acier-bois, les résultats conservent à la même tendance que celles obtenue précédemment sans considération d'incertitudes. Autrement dit, la tendance est conservée pour sept indicateurs incluant le réchauffement climatique, la formation de smog photochimique, l'acidification, les effets cancérigènes, les effets non cancérigènes, les effets respiratoires, et l'épuisement des ressources fossiles. En revanche, la tendance est inversée pour les trois autres indicateurs incluant l'appauvrissement de la couche d'ozone, l'eutrophisation et l'écotoxicité. Sous cet angle, le pont Paradis en bois présente des impacts plus faibles que le pont Paradis en acier-bois, et ce, pour tous les indicateurs environnementaux considérés. Selon les écarts minimaux, les réductions sont significatives pour l'indicateur réchauffement climatique ( $61\%$ ), l'indicateur acidification ( $51\%$ ) et l'indicateur épuisement des ressources fossiles ( $21\%$ ). Les réductions sont non-significative pour les sept autres.

Les impacts au mètre carré passent à  $292\text{ kg éq. CO}_2$  pour le pont Paradis en bois et à  $739\text{ kg éq. CO}_2$  pour le pont Paradis en acier-bois. Cela représente une réduction au mètre carré de  $447\text{ kg éq. CO}_2$ , soit une réduction relative de  $61\%$  (voir Figure 17).

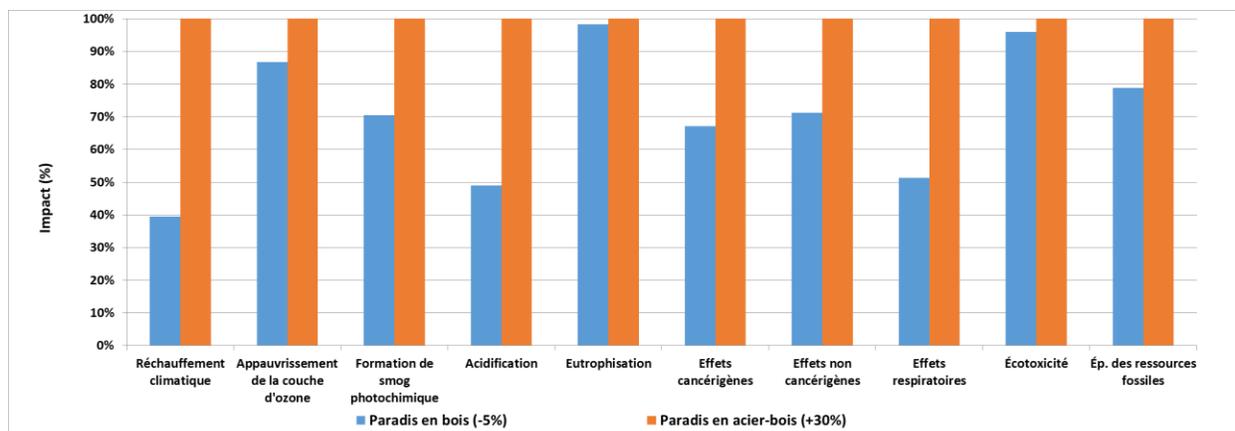


Figure 22. Résultats de l'analyse de sensibilité avec la considération des bornes d'incertitudes -5% et +30 % sur les données de conception

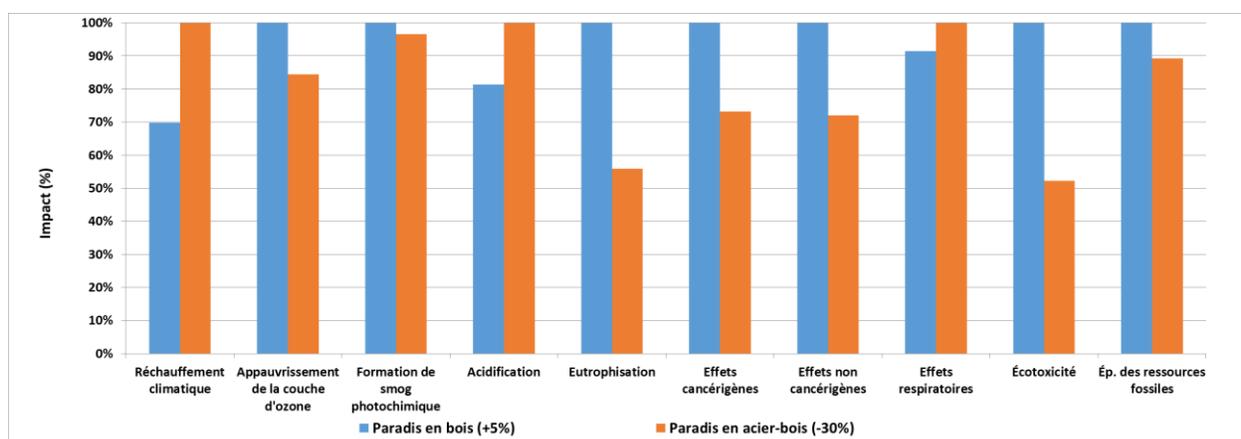


Figure 23. Résultats de l'analyse de sensibilité avec la considération des bornes d'incertitudes +5% et -30 % sur les données de conception

En revanche, en appliquant les incertitudes de +5 % et -30 % respectivement sur les données du pont Paradis en bois et du pont Paradis en acier-bois, le pont Paradis en acier-bois présente des impacts plus faibles que le pont Paradis en bois dans sept indicateurs incluant l'appauvrissement de la couche d'ozone, la formation de smog photochimique, l'eutrophisation, les effets cancérigènes, les effets non cancérigènes, écotoxicité, et l'épuisement des ressources fossiles. Selon les écarts minimaux, les réductions sont significatives pour l'indicateur eutrophisation (44 %) et l'indicateur épuisement des ressources fossiles (11 %). Elles sont non-significative pour les cinq autres. Cependant, le pont Paradis en bois présente des impacts plus faibles dans trois indicateurs incluant le réchauffement climatique, l'acidification, les effets respiratoires. Les réductions en faveur du pont Paradis en bois sont significatives pour le réchauffement climatique (30 %) et non-significatives pour les deux autres.

Les impacts au mètre carré passent à 314 kg éq. CO<sub>2</sub> pour le pont Paradis en bois et à 450 kg éq. CO<sub>2</sub> pour le pont Paradis en acier-bois. Cela représente une réduction au mètre carré de 135 kg éq. CO<sub>2</sub>, soit une réduction relative de 30 % (voir Figure 18).

Les résultats détaillés de cette analyse de sensibilité ainsi que les valeurs absolues des impacts des autres indicateurs sont présentés en annexe (voir Annexe V).

En se focalisant sur l'indicateur de réchauffement climatique, le premier chassé-croisé a donné lieu à une réduction de 61 % de GES, en faveur du pont Paradis en bois, et le second a donné lieu à une réduction de 30 %. Étant donné que le résultat obtenu sans considération de l'incertitude affiche une réduction de 48 %, en faveur du pont Paradis en bois, l'incertitude moyenne autour de cet indicateur est de  $\pm 15,5$  %. En considérant  $\pm 15,5$  % comme nouvel écart minimal requis pour que la réduction soit significative, la réduction de 48 % de GES en faveur du pont Paradis en bois demeure significative considérant ce nouvel écart minimal.

Quant au pont Lafarge, le premier chassé-croisé (-5 % et +30 %) a donné lieu à une réduction de 44 % de GES, en faveur du pont Lafarge hybride en bois, tandis que le second (+5 % et -30 %) a donné lieu à une augmentation relative de 12 % de GES du pont Lafarge hybride en bois par rapport au pont Lafarge en acier-béton. L'incertitude moyenne autour de cet indicateur est de  $\pm 28$  %. En considérant  $\pm 28$  % comme nouvel écart minimal requis pour que la réduction soit significative, la réduction de 25 % de GES en faveur du pont Lafarge hybride en bois est non significative.

## 7. CONCLUSION ET RECOMMANDATION

Cette étude a permis d'analyser les impacts de cycle de vie de « berceau à la porte » de deux types de ponts au Québec, à savoir le pont forestier et le pont routier. En mettant l'accent sur l'indicateur portant sur les émissions de gaz à effet de serre (GES), l'analyse d'impacts a permis de mettre en évidence le potentiel de réduction des émissions GES par l'inclusion accrue du bois dans la construction des infrastructures civiles telles que les ponts routiers et forestiers. Quatre systèmes ont été définis et analysés deux à deux, à savoir le pont Paradis en bois et son comparatif en acier-bois, ainsi que le pont Lafarge hybride en bois et son équivalent en acier-béton.

L'étude a montré qu'au Québec, les émissions GES du pont forestier en acier-bois sont plus importantes que celles du pont en bois fonctionnellement équivalent. L'inclusion du bois entraîne une réduction significative de 48 % des émissions de GES du « berceau à la porte ». Cependant, pour le pont routier, l'inclusion du bois entraîne une réduction de 25 % des émissions de GES du « berceau à la porte ». Dans les deux cas de figure, l'analyse a montré que l'étape de production des matériaux est l'étape la plus contributrice aux impacts totaux des ponts étudiés. L'étape de production des matériaux représente 87 % des émissions du pont Lafarge hybride en bois, et 89 % des émissions du pont Lafarge en acier-béton. Quant au pont Paradis en bois, la part de l'étape de production des matériaux s'élève à 65 %, alors qu'elle est de 82 % pour le pont Paradis en acier-bois.

En ramenant l'analyse de contribution au niveau des matériaux, l'analyse montre que les matériaux les plus contributeurs aux émissions GES dans le scénario Paradis en bois sont le lamellé-collé, le bois de sciage traité et l'acier galvanisé à chaud. Ces matériaux contribuent respectivement à hauteur de 47 %, 38 % et 10 %, alors que les matériaux les plus contributeurs dans le scénario acier-bois sont l'acier galvanisé à chaud et le bois de sciage traité contribuant respectivement à hauteur de 83 % et 16 %.

Les matériaux les plus contributeurs aux émissions GES dans le scénario de pont Lafarge hybride en bois sont le béton, l'acier galvanisé, l'asphalte, le gravier et lamellé-collé contribuant respectivement à hauteur de 36 %, 36 %, 8 %, 8 % et 7 %. Quant au pont Lafarge en acier béton, les matériaux les plus contributeurs

aux impacts totaux sont l'acier galvanisé, le béton, l'asphalte et le gravier contribuant respectivement à hauteur de 47 %, 39 %, 6 % et 6 %.

L'évaluation d'impact de cycle de vie (ÉICV) avec IMPACT 2002+ a permis de valider la robustesse des résultats et des conclusions.

L'analyse de sensibilité aux alentours des frontières du système a permis de contraster les résultats obtenus du « berceau à la porte » et ceux obtenus sur une portée allant du « berceau au tombeau ». Dans le cas du pont Paradis, les réductions d'émissions GES respectives obtenues sont 48 % et 40 %, tandis qu'elles sont respectivement de 25 % et 21 % dans le cas du pont Lafarge.

L'analyse de sensibilité autour des méthodes d'allocation a permis de comparer les résultats obtenus sous allocation massique pour les produits du bois et sous allocation économique pour les mêmes produits. L'analyse a montré que les réductions d'émissions GES respectives sont de 48 % et 44 % pour le pont Paradis. Alors que pour le pont Lafarge, les réductions d'émissions GES respectives sont de 25 % et 22 %.

L'analyse de sensibilité aux bornes des intervalles d'incertitudes ( $\pm 5\%$  et  $\pm 30\%$ ) a mis en exergue les nouveaux écarts minimaux requis pour que la réduction relative des émissions entre deux scénarios comparatifs soit considérée comme significative. Dans le cas du pont Paradis, l'écart minimal de signifiante est passé de  $\pm 10\%$  à  $\pm 15,5\%$  pour l'indicateur réchauffement climatique. Pour le même indicateur, l'écart minimal de signifiante est passé de  $\pm 10\%$  à  $\pm 28\%$  pour le pont Lafarge.

Dans le cas du pont Paradis, la réduction de 48 % en faveur du pont Paradis en bois demeure significative, considérant le nouvel écart minimal. En revanche, dans le cas du pont Lafarge, la réduction de 25 % en faveur du pont Lafarge hybride en bois devient non significative sous le nouvel écart minimal de signifiante.

Il est important de préciser que les résultats de cette étude sont des expressions relatives et qu'elles ne prédisent pas les effets sur les impacts finaux par catégorie, le dépassement des seuils, les marges de sécurité ou les risques.

En conclusion, l'étude a montré que dans le contexte géographique québécois, la contribution de l'étape de production des matériaux aux émissions GES de type « berceau à la porte » peut varier entre 65 % et 89 %. Il est possible de réduire la part de contribution des matériaux en appliquant un choix judicieux des matériaux lors de la conception. L'étude réalisée du « berceau à la porte » a montré que le bois est un matériau à faible empreinte carbone. De fait, le bois représente une solution alternative aux matériaux conventionnels (acier et béton) couramment utilisés dans infrastructures civiles. D'ailleurs, les observations faites dans cette étude sont en adéquation avec les conclusions et recommandations du rapport Beaulieu, lesquelles mettent l'accent sur l'exemplarité du gouvernement et sur l'inclusion accrue du bois dans la construction [8].

## 8. LIMITES DE L'ÉTUDE

Les conclusions de cette étude ne sont valables que pour les scénarios de ponts étudiés selon les hypothèses qui ont été formulées et justifiées dans le contexte de l'étude. De fait, les résultats présentés

dans cette étude ne peuvent être généralisés à moins de tenir compte des mêmes plans de conception et des exclusions appliquées à cette étude. La qualité des données primaires et secondaires a été analysée, mais l'analyse d'incertitudes et leurs effets n'ont été analysés que partiellement sous forme d'analyse de sensibilité. Une analyse Monte-Carlo aurait pu être ajoutée pour compléter cette analyse et donner plus de certitude aux comparaisons relatives des résultats. Au niveau des méthodes d'allocation, les impacts des produits du bois dérivent d'une approche priorisant l'allocation massive. Pour ce faire, une analyse de sensibilité, autour des méthodes d'allocation massive et économique sur les produits du bois, a été réalisée pour nuancer les résultats.

Bien que l'étude ait pu inclure l'étape de fin de vie, l'étude présente néanmoins quelques limites au niveau du manque de données relatives à l'étape à la maintenance, la réparation et l'entretien des ponts. Toutes ces différences probables peuvent entraîner ultimement des répercussions positives ou négatives sur la tendance actuelle des résultats de chacun des systèmes présentés dans cette étude.

## **9. PISTES POUR FUTURES ÉTUDES**

Les infrastructures des ponts non couverts en bois sont très récentes au Québec. De fait, il y a actuellement un manque de données relatives aux méthodes appropriées applicables pour l'entretien de ces ponts. De plus, il y a aussi un manque de données relatives à la fréquence d'entretien des matériaux exposés aux intempéries de la nature. C'est entre autres l'une des raisons pour laquelle l'étape d'entretien des ponts a été exclue de cette étude. Il serait probablement intéressant de mener une étude qui vise à collecter et compiler les données relatives à l'entretien des ponts en bois non couverts au Québec. Une telle étude permettrait de bâtir une base de données qui permettrait de mener des études comparatives plus exhaustives entre les ponts en bois et leurs équivalents en acier ou en béton, lesquelles incluraient plus facilement la fin de vie des ponts et les étapes d'entretien.

## 10. RÉFÉRENCES

1. Watts, J., *Concrete: the most destructive material on Earth*, in *The Guardian*. 2020, The Guardian: London.
2. Lehne, J. and F. Preston, *Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. 2018, Chatham House: Cambridge. p. 138.
3. Association, W. *About Steel*. 2021 December 3, 2021 [cited 2021 December 10]; Available from: <https://www.worldsteel.org/about-steel/about-steel.html>.
4. Hoffmann, C., M.V. Hoey, and B. Zeumer, *The steel industry decarbonization challenge*. 2020, McKinsey & Company. p. 12.
5. (GCCA), G.C.a.C.A., *Concrete Future – The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete*. 2021, GCCA. p. 48.
6. Association, W. *Steel in Buildings and Infrastructure Steel markets 2021* [cited 2021 December 10,]; Available from: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/steel-markets.html>.
7. Québec, G.d., *Politique d'intégration du bois dans la construction*. 2020, Gouvernement du Québec: Québec. p. 20.
8. Beaulieu, L., *Rapport du groupe de travail visant à favoriser une utilisation accrue du bois dans la construction*. 2012, Groupe de travail visant à favoriser une utilisation accrue du bois dans la construction: Québec, Qc, Canada.
9. MRN, *Charte du bois*. 2013, MRN: Québec. p. 8.
10. Structures, L.e.d.N., *Disponibilité des produits en bois d'ingénierie tels que le bois lamellé-croisé et bois lamellé-collé au Québec.*, D. Batsy, Editor. 2022.
11. L'Office québécois de la langue française (OQLF), *Le Grand dictionnaire terminologique (GDT)*. 2002, Gouvernement du Québec: Québec.
12. Cecobois, *Guide sur la durabilité des ponts en bois*. 2020.
13. Québec, M.d.T.d. *Ouvrages d'art*. 2022; Available from: <https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/projets-infrastructures/structures/ouvrages-art/Pages/ouvrages-art.aspx>.
14. 14044:2016. *Environmental Management - Lifecycle assessment - Requirements and guidelines*. 2016.
15. WoodWorks, *Big Box Retail: Wood Saves Nearly \$1 Million Cost and environmental studies compare wood to steel*, in *Retail big box comparison*. 2015, WoodWorks p. 12.
16. Geraud Essoua and Patrick Lavoie, *Analyse du cycle de vie (ACV) comparative environnementale de la construction de grande hauteur en bois massive versus béton* 2019, FPIInnovations: Quebec. p. 78.
17. MFFP, *Norme relative aux ponts sur les terres du domaine de l'État*, d.l.F.e.d.P. ministère des Forêts, Editor. 2019, Gouvernement du Québec: Québec, Qc. p. 14.
18. (CSA), C.S.A., *S6-19 - Code canadien sur le calcul des ponts routiers.*. 2019, Groupe CSA: Mississauga.
19. MFFP, *Règlement sur l'aménagement durable des forêts du domaine de l'État (RADF)*. d.l.F.e.d.P. ministère des Forêts, Editor. 2019, Gouvernement du Québec: Québec, Qc. p. 109.
20. Jolliett, O., et al., *Environmental Life Cycle Assessment*. 2015: CRC Press.
21. EN 15978:2011. *Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*. 2011.

22. Cobut, A., *Climate Change and Environmental Impacts: Comparative life cycle assessment of resource road bridges in Carbon Assessment Framework (CAF)*. 2020, FPIInnovations: Vancouver, BC. p. 36.
23. Jolliet, O., M. Saadé, and P. Crettaz, *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*. Vol. 23. 2010: PPUR Presses polytechniques.
24. Franklin Associates, A.D.o.E.R.G.I., *Cradle-to-gate life cycle inventory of nine plastic resins and four polyurethane precursors*, Plastics Division of the American Chemistry Council (ACC), Editor. 2011, Plastics Division of the American Chemistry Council (ACC),.
25. Hischier R., *Life Cycle Inventories of Packaging and Graphical Papers*, in *Ecoinvent report No.11*, P.a. Board, Editor. 2007, Swiss Centre for Life Cycle Inventories: Zurich, Switzerland.
26. Canadian LCI Database. *New canadian LCI database 2014* [cited 2014 December 12]; Available from: [www.ciraig.org/CIRAIG\\_LCI\\_DB](http://www.ciraig.org/CIRAIG_LCI_DB).
27. Quebec Life Cycle Inventory database. *First Quebec LCI Database*. 2014 [cited 2014 December, 17 2014]; Available from: [http://www.empreintecarbonequebec.org/en/projet\\_base\\_de\\_donnees\\_icv.php](http://www.empreintecarbonequebec.org/en/projet_base_de_donnees_icv.php).
28. Bare, J., *TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other Environmental impacts 2.0.*, in *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13(5). 2011. p. 687–696.
29. *SimaPro, the world's leading sustainability software.*. 2016, PRé Consultants BV: Pays-Bas.
30. Jolliet, O., et al., *Environmental life cycle assessment*. 3 ed. 2016: CRC Press, Taylor & Francis Group.
31. Finkbeiner, M., et al., *The New International Standards for Life Cycle Assessment: ISO 14040 and ISO 14044*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006. **11**(2): p. 80-85.
32. International Organization for Standardization (ISO), *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework*. 2006.a, ISO 14044: GENEVA.
33. Azapagic, A. and R. Clift, *Allocation of environmental burdens in co-product systems: process and product-related burdens (Part 2)*. The international journal of life cycle assessment, 2000. **5**(1): p. 31-36.
34. Frischknecht, R., *Life cycle inventory analysis for decision-making*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1998. **3**(2): p. 67-67.
35. Council, A.W.C.a.C.W., *Environmental Product Declaration for North American Glued Laminated Timber*, in *Environmental Product Declaration* U.E. Inc., Editor. 2020, American Wood Council and Canadian Wood Council.
36. Co., K.L., *Cradle to Gate EPD for Cross Laminated Timber produced by Kalesnikoff in South Slokan, BC*, in *Environmental Product Declaration*, A. Institute, Editor. 2022, Kalesnikoff Lumber Co.
37. Council, A.W.C.a.C.W., *Environmental Product Declaration for North American Softwood Lumber*, in *Environmental Product Declaration*, U.E. Inc., Editor. 2020, American Wood Council and Canadian Wood Council.
38. Council, A.W.C.a.C.W., *Environmental Product Declaration for North American Softwood Plywood*, in *Environmental Product Declaration*, U.E. Inc., Editor. 2020, American Wood Council and Canadian Wood Council.
39. UL Environment Inc., *Part B: Product Category Rule (PCR) Guidance for Building-Related Products and Services: Structural and Architectural Wood Products EPD Requirements.*, in *UL - PCR2019*, UL, Editor. 2019, UL Environment Inc.
40. UL Environment Inc., *Part A: Product Category Rule (PCR) Guidance for Building-Related Products and Services: Life Cycle Assessment Calculations Rules and Report Requirements*, in *UL - PCR2019*, UL, Editor. 2019, UL Environment Inc.
41. National Renewable Energy Laboratory (NREL), *US life cycle inventory database (US LCI)*, in *US LCI*, NREL, Editor. 2012, NREL.

42. Moreno Ruiz E., V.L., Brunner, F., Symeonidis A., FitzGerald D., Treyer, K., Bourgault G., Wernet G., *Documentation of changes implemented in the ecoinvent database v3.5 (2018.08.23)*, in *Ecoinvent 3.5*, E. database, Editor. 2018: Zürich, Switzerland.
43. Long Trail Sustainability (LTS), *DATASMART 2020 (US EI 2.2) released*, in *DATASMART LTS*, Editor. 2020.
44. CORRIM), C.f.R.o.R.I.M., *CORRIM - The go-to place for wood Life Cycle Assessments*, CORRIM, Editor. 2022.
45. (ASMI), A.s.M.I., *LCA and EPD Reports*. 2022.
46. Zhang, Y., F. Gao, and Z. Wang, *Allocation of the Environmental Impact in Iron and Steel Industry*. Materials Science Forum, 2017. **898**: p. 2413-2421.
47. Atherton, J., *Declaration by the Metals Industry on Recycling Principles*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007. **12**(1): p. 59-60.
48. Services, S.G., *North American product category rule for designated steel construction products*, in *Steel Industry PCR 2010*, S.G. Services, Editor. 2015.
49. NSF International, *Product Category Rules for Environmental Product Declarations - PCR for Concrete*. 2019: Ann Arbor, Michigan. p. 46.
50. Ekvall, T. and A.-M. Tillman, *Open-loop recycling: Criteria for allocation procedures*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1997. **2**(3): p. 155.
51. Batsy, D. and P. Lavoie, *Évaluation des constructions à haute efficacité énergétique dans le contexte québécois*. 2019, FPIInnovations.
52. Environment and Climate Change Canada, *National Inventory Report 1990-2015: Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada*, in *National Inventory Report*, E.a.C.C. Canada, Editor. 2018, Environment and Climate Change Canada: Ottawa.
53. Quebec, G.o., *The 2030 Energy Policy*, in *Energy in Quebec*, G.o. Quebec, Editor. 2017.
54. Quebec, G.d. *Lancement de la politique énergétique*. Énergie et Ressources naturelles 2017 [cited 2017 23/03]; Available from: <https://mern.gouv.qc.ca/2016-04-07-politique-energetique/>.
55. Ontario Ministry of Energy. *Planning Ontario's Energy Future*. Ontario's Long-Term Energy Plan 2017 [cited 2017 23/03]; Available from: <http://www.energy.gov.on.ca/en/ltep/2017-discussion-guide/>.
56. Alberta Energy System operator (AESO), *2016 Long-term Outlook*, in *Long-term Outlook*, AESO, Editor. 2016, Alberta Energy System operator (AESO): Calgary. p. 42.
57. *Introduction to ecoinvent Version 3*. s.d.
58. *US life cycle inventory database (US LCI)*. 2012, <https://www.nrel.gov/lci/>.
59. *European Life Cycle Database (ELCD)*. 2018, <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>.
60. *A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Oriented Strand Board*, in *Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment*. 2008: Ottawa.
61. *A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Medium Density Fiberboard (MDF); 2013 Update*. . 2013: Ottawa.
62. Athena sustainable Materials Institute (ASMI), *Design Building University of Massachusetts, Amherst*. 2017, Athena Institute. p. 54.
63. Richard, J., *Comment Goodfellow traite-t-il le bois utilisé dans la construction des ponts au Québec?*, D. Batsy, Editor. 2022.
64. Dumont, L.-P., *Données de traitement à l'Innoprep du lamellé-collé et du lamellé-croisé* D. Batsy, Editor. 2022: Confidential data.
65. Dumont, L.-P., *Données de traitement à l'Innocryl du lamellé-collé et du lamellé-croisé* D. Batsy, Editor. 2022: Confidential Data.
66. Industriel, L., *Fiche technique - Innocryl 12-16: Teinture extérieure à base de résine acrylique en phase aqueuse, version opaque*, F. 398-16X, Editor. 2019, Laurentide Industriel. p. 2.

67. Pedneault, J., et al., *Analyse du coût total de possession sur le cycle de vie d'un pont routier à platelage en aluminium*. Projet, 2019. **787**: p. 1.
68. Dan, T., *Photo Narrative – L162 Concept Bridge*. Prepared for the BC Ministry of Forests, Lands, Natural Resource Operations and Rural Development. . 2019, Timber Restoration Services: Moncton, NB. p. 57.
69. McConnell, S., *Software Estimation: Demystifying the Black Art*. 2006, Redmond, WA, USA: Microsoft Press.
70. Cleden, D., *Managing project uncertainty*. 2017: Routledge.
71. (OIQ), O.d.l.d.Q., *Guide et lexique de gestion des services d'ingénierie*. 2007. 99.
72. Weidema, B. and M. Wesnaes, *Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators*. Vol. 4. 1996. 167-174.
73. Humbert, S., et al., *IMPACT 2002+ - User guide (Draft for version 2.1)*. *IMPACT Modeling*. 2010, IMPACT 2002+: Lausanne, Switzerland.
74. Humbert, S., M. Margni, and O. Jolliet, *IMPACT 2002+ User Guide: Draft for version 2.1*. 2005. 33.
75. Humbert, S., et al. *IMPACT 2002 + : User Guide Draft for version Q 2 . 21 ( version adapted by Quantis ) Prepared by*. 2012.
76. Anne Lautier, et al., *Life Cycle Assessment of Plywood and OSB resin: Substitution of phenol by lignin*, in *National Bioproducts program*, N.R.C.C.N.-A.E.G.B.R. Institute, Editor. 2010, NRCC Applied Ecotoxicology Group Biotechnology Research Institute.
77. Anne Lautier, et al., *Complementary information related to IMPACT 2002+ User Guide Report: Minimal difference required to be significant*, S. Humbert, Editor. 2010.
78. Grann, B., *A Comparative Life Cycle Assessment of Two Multistory Residential Buildings: Cross-Laminated Timber vs. Concrete Slab and Column with Light Gauge Steel Walls*, in *Life Cycle Assessment (LCA)*. 2013, FPInnovations: Vancouver, BC, Canada.
79. Mahalle, L., *Development of multi-functional panels for next generation building systems. Part XI.*, in *Life Cycle Assessment (LCA)*. 2015, FPInnovations: Vancouver, BC, Canada.
80. Experts chez Hexaki, Experts chez Nordic Structures, and E.d. MFFP, *Consultation pour estimation des durée de vie des matériaux des ponts forestiers et routiers*, in *ACV des Ponts*, D. Batsy, Editor. 2022.
81. Recyc-Québec, *Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec*, in *Gestion des matières résiduelles au Québec*. 2015.
82. Récyq-Québec, *Résidus de construction, de rénovation et de démolition (CRD)*, Récyq-Québec, Editor. 2018: Québec.
83. Hunt, S.L., Gordon, A.M. & Morris, D.M. 2, *Carbon stocks in managed conifer forests in northern Ontario, Canada*. *Silva Fennica* 2010. **44**(4): p. 20.
84. EPA, U., *Management Practices Chapters: Documentation for Greenhouse Gas Emission and Energy Factors Used in the Waste Reduction Model (WARM)*. . 2019, US EPA. p. 132.
85. Mahalle, L., *Life Cycle Assessment of Nordic Lam™ and Nordic X-Lam™*, FPInnovations, Editor. 2018, Nordic Structures.
86. FPInnovations, *Environmental Product Declaration for Nordic X-Lam™*, in *Environmental Product Declaration*, FPInnovations, Editor. 2018, FPInnovations.
87. Enso, S., *Environmental Product Declaration In accordance with ISO 14025 and EN 15804 for: CLT (Cross Laminated Timber)*, in *Environmental Product Declaration*. 2020, EPD International AB.
88. FCBA, I.T., *Panneau CLT (lamellé-croisé), fabriqué en France*. 2018, Institut Technologique FCBA.
89. FCBA, I.T., *Panneaux en bois lamellé-croisé (CLT) Nordic X-Lam*. 2020, Institut Technologique FCBA.

## ANNEXE I – PHASES D'ANALYSE DE CYCLE DE VIE

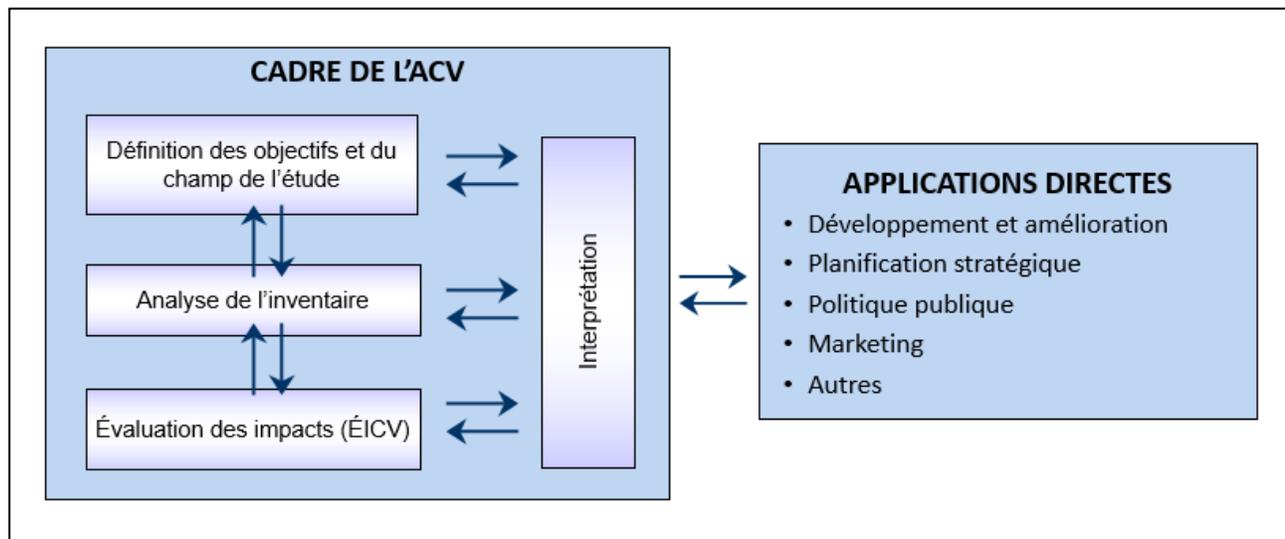


Figure 24. Les étapes de l'analyse de cycle de vie (source : [14])

### 1. Définition de l'objectif et du champ de l'étude

Une analyse de cycle de vie (ACV) commence par un énoncé explicite du but et de la portée de l'étude, de l'unité fonctionnelle, des limites du système, des hypothèses, des limites et des méthodes d'allocation utilisées ainsi que des catégories d'impacts choisies. L'objectif et la portée comprennent une définition du contexte de l'étude qui explique à qui et comment les résultats doivent être communiqués. Le but et la portée d'un ACV sont clairement définis et compatibles avec l'application visée. L'unité fonctionnelle est une unité de référence définie pour le rendement quantifié d'un système de produit auquel tous les flux de l'ACV se rapportent. L'allocation est la méthode utilisée pour partitionner le fardeau environnemental d'un processus lorsque plusieurs produits ou fonctions partagent le même processus (ISO, 2006b).

### 2. L'inventaire du cycle de vie (ICV)

Dans l'analyse d'inventaire, un modèle de flux du système technique est construit à l'aide de données sur les entrées et les sorties, appelées inventaire du cycle de vie (ICV). Le modèle de flux est souvent illustré par un organigramme qui inclut les activités à évaluer et donne une image claire des limites du système technique. Les données d'entrée et de sortie nécessaires à la construction du modèle sont collectées (telles que les ressources, les besoins énergétiques, les émissions dans l'air et l'eau et la production de déchets pour toutes les activités à l'intérieur des limites du système). Ensuite, le fardeau environnemental du système est calculé et rapporté à l'unité fonctionnelle (UF).

### 3. Évaluation de l'impact du cycle de vie (ÉICV)

L'analyse de l'inventaire est suivie d'une évaluation de l'impact – où les données de l'inventaire du cycle de vie (ICV) sont caractérisées en matière d'impact environnemental potentiel (p. ex., acidification, eutrophisation, effets potentiels sur le réchauffement climatique, etc.). Le processus est illustré à la

Figure 18. La phase d'évaluation de l'impact de l'ACV vise à évaluer les impacts environnementaux potentiels sur la base des résultats de l'ICV. Au stade de la classification, les paramètres d'inventaire sont triés et affectés à des catégories d'impact spécifiques.

Le calcul des résultats des indicateurs (caractérisation) implique la conversion des résultats de l'ICV en unités communes à l'aide de méthodes d'évaluation de l'impact et de l'agrégation des résultats convertis dans la même catégorie d'impact. Cette conversion utilise des facteurs de caractérisation (FC). Le résultat du calcul est un résultat d'indicateur numérique généralement indiqué sur une base d'équivalence. Dans de nombreuses analyses ACV, la caractérisation conclut l'analyse. C'est également la dernière étape obligatoire selon ISO 14044: 2006. Cependant, certaines études impliquent une étape supplémentaire de normalisation dans laquelle les résultats des catégories d'impacts de l'étude sont comparés à l'impact total dans la région. Lors de la pondération, les différents impacts environnementaux sont pondérés les uns par rapport aux autres pour obtenir un score unique pour l'impact environnemental total.

#### 4. Interprétation

Les résultats de l'analyse de l'inventaire et de l'évaluation de l'impact sont résumés lors de la phase d'interprétation. Les conclusions et les recommandations sont les résultats de la phase d'interprétation de l'étude. Selon ISO 14040: 2006, l'interprétation devrait inclure :

- l'identification de problèmes importants pour l'impact environnemental
- l'évaluation de l'étude en tenant compte de la complétude, de la sensibilité et de la cohérence
- les conclusions et les recommandations

La procédure de travail de l'ACV est itérative, comme le montrent les flèches d'aller-retour de la Figure 4. L'itération signifie que les informations recueillies à un stade ultérieur peuvent affecter une étape antérieure. Lorsque cela se produit, la première étape et les étapes suivantes doivent être retravaillées en tenant compte des nouvelles informations. Par conséquent, il est fréquent qu'un praticien d'ACV travaille à plusieurs étapes en même temps.

## ANNEXE II – ILLUSTRATION DE L'ÉQUIVALENCE DU POIDS DES SCÉNARIOS DU PONT FORESTIER

<b>Inventaire des matériaux pour le pont forestier de la rivière Paradis - Solution Bois</b> Quantités estimées par Nordic Structures					
ART.	DESCRIPTION	UNITÉ	kg / unité	QUANTITÉ	QUANTITÉ (kg)
2,0	<b>Structure d'acier</b>				
	Acier galvanisé à chaud	kg	1,0	554	554
	Bois lamellé-collé	kg	1,0	17 972	17 972
	Bois lamellé-croisé	kg	1,0	451	451
	Contreplaqué traité	kg	1,0	323	323
	Membrane d'étanchéité	kg	1,0	137	137
	Nylon (UHMW)	kg	1,0	40	40
2,2	<b>Sosu total quincaillerie en acier galvanisé</b>	<b>kg</b>			<b>19 477</b>
3,0	<b>Tablier</b>				
	Acier galvanisé à chaud	kg	1,0	183	183
	Acier zingué	kg	1,0	16	16
	Bois de sciage traité	kg	1,0	14 669	14 669
	Contreplaqué traité	kg	1,0	85	85
3,4	<b>Sous total bois traité (voir détail en copie)</b>	<b>kg</b>			<b>14 953</b>
	<b>Masse totale</b>				<b>34 430</b>

<b>Inventaire des matériaux pour le pont forestier de la rivière Paradis - Solution Acier-Bois</b> Conception et estimation des quantités par Hexaki					
ART.	DESCRIPTION	UNITÉ	kg / unité	QUANTITÉ	QUANTITÉ (kg)
2,00	<b>Structure d'acier</b>				
	Plaques raidisseurs 850x175x16 (nbr 20)	kg	1,0	373,7	374
	Plaques appuis (600x500x25*6)	kg	1,0	353,3	353
	Poutre principale - acier noir - AT	kg	1,0	11 828,0	11 828
2,10	<b>Sous-total structure d'acier noir</b>	<b>kg</b>			<b>12 555</b>
	Boulonnage en acier galvanisé (17 boulons ¾ * 5'2)	kg	1,0	54,0	54
	Ancrage appui (4 tirefonds galvanisés x 3 x 2)	kg	1,0	9,8	10
	Contreventement en acier galvanisé	kg	1,0	715,0	715
2,20	<b>Sous total quincaillerie en acier galvanisé</b>	<b>kg</b>			<b>779</b>
3,00	<b>Tablier</b>				
	Plaques d'attache 8x8 aux WWF	kg	1,0	245,0	245
	Boulons pour glissières (51 x 2= 102 boulons de 32 po x ¾)	kg	1,0	171,2	171
	Vis pour plaques d'attache	kg	1,0	21,4	21
	Vis pour 8x8	kg	1,0	48,0	48
3,30	<b>Sous total acier galvanisé (quincaillerie)</b>	<b>kg</b>			<b>485</b>
	Glissière (12x12 + 8x8)	m.cu	640,0	3,5	2 230
	4x8 en bois traité	m.cu	640,0	8,5	5 416
	8x8 en bois traité	m.cu	640,0	18,6	11 929
3,40	<b>Sous total acier noir</b>	<b>kg</b>			<b>19 575</b>
	<b>Masse totale</b>				<b>33 394</b>

Les deux tableaux ci-dessus illustrent et démontrent l'équivalence du poids des deux édifices. En génie civil, le poids de l'édifice est le facteur déterminant dans la définition des caractéristiques de la fondation et la conception poutres porteuses du poids.

## **ANNEXE III – INVENTAIRE DES SCÉNARIOS DU PONT ROUTIER**

Inventaire des matériaux pour le pont du parc Lafarge en bois (2021)						
Conception et estimation des quantités par Hexaki						
Q	ART.	DESCRIPTION	UNITÉ	kg / unité	QUANTITÉ	QUANTITÉ (kg)
	<b>1,0</b>	<b>Fondation</b>				
	1,10	<b>Remblai MG 112 - Axe 2 derrière la dalle de transition</b>	m.cu	2000	611	1 222 000
		Coussin de support en béton (sous les semelles)	m.cu	2400	34	80 640
		Coussin de support en MG-20 (dalle de transition)	m.cu	2400	50	120 960
		Béton des semelles	m.cu	2400	115	276 000
		Béton des culées	m.cu	2400	139	333 600
		Béton des dalles de transition	m.cu	2400	48	115 200
		Murs homologués (quatre murs en retour) (béton)	m.ca	480	56,25	27 000
		Semelle de réglage (béton)	m	100	20,00	2 000
		Module de couronnement (béton)	m	1000	20,56	20 560
	<b>1,20</b>	<b>Sous-total béton</b>	kg			<b>975 960</b>
		Armature galvanisée semelles	kg	1	8 882	8 882
		Armature galvanisée des culées	kg	1	8 447	8 447
		Armature galvanisée dalle de transition	kg	1	6 080	6 080
		Murs homologués (quatre murs en retour) (armature)	m.ca	20	56,25	1 125
		Semelle de réglage (armature)	m	7	20,00	140
		Module de couronnement (armature)	m	70	20,56	1 439
	<b>1,30</b>	<b>Sous-total acier d'armature galvanisée</b>	kg			<b>26 113</b>
		Murs homologués (quatre murs en retour) (quincaillerie acier galvanisé)	m	30	20,56	617
	<b>1,40</b>	<b>Sous-total quincaillerie en acier galvanisé</b>	kg			<b>617</b>
	<b>2,0</b>	<b>Structure de bois</b>				
		Sections de bois lamellé-collé droite (incluant 3 couches de teinture Sansin)	m.cu	560	64,9	36 344
		Sections de bois lamellé-collé arche (incluant 3 couches de teinture Sansin)	m.cu	560	77,6	43 456
		Platelage de bois lamellé-collé (incluant 2 couches de teinture Sansin)	m.cu	560	65,6	36 736
		Sections de trottoir en bois CLT (incluant 1 couche de teinture Sansin)	m.cu	560	19,2	10 752
		Contreplaqué ¾"	m²	10	300,0	3 000
	<b>2,10</b>	<b>Sous-total bois</b>	kg			<b>130 288</b>
		Tourillon côté bois (acier galvanisé)	kg	325	12	3 900
		Tourillon côté béton (acier galvanisé)	kg	225	12	2 700
		Grande tige d'assemblage	kg	5	66	330
		Appareils d'appui, butée, quincaillerie et ses ancrages (acier galvanisé)	unité	140	12	1 680
		Plaques vissées (acier galvanisé) et vis...	unité	7	132	924
		Épissures en acier galvanisé et boulons	unité	886	6,0	5 316
	<b>2,2</b>	<b>Sous total quincaillerie en acier galvanisé</b>	kg			<b>14 850</b>
	<b>3,0</b>	<b>Tablier</b>				
		Membrane d'étanchéité (platelage, trottoir et chasse-roue)	m.ca	10,0	420	4 200
		Membrane d'étanchéité entre poutre et platelage	m.ca	10	100	1 000
	<b>3,10</b>	<b>Sous total membrane</b>	kg			<b>5 200</b>
		Plaques d'acier (trottoir et chasse-roue)	kg	1	7 400	7 400
		Glissière modifiée 210B - galvanisé et peinturé	m	85	40,3	3 426
		Glissière modifiée 210D - galvanisé et peinturé	m	85	40,3	3 426
		Tous les solins épaisseur 20 Ga. métallisé, peinturé et pose	m	5	58	290
	<b>3,20</b>	<b>Sous total quincaillerie en acier galvanisé</b>	kg			<b>14 542</b>
	<b>4,0</b>	<b>Autres matériaux utilisés</b>				
		Surface anti-dérapante	m.ca	12,5	52,1	651
		Néoprène sous le premier et dernier panneau	unité	24,6	2	49
		Néoprène appui	unité	3,9	24	94
		Contreplaqué 3/4 en bois traité	unité	33	98	3 234
		600 mm d'infrastructure à compléter au-dessus de la dalle de transition	m.cu	2000	86	172 800
		300 mm de granulats concassés MG-20 (sous le pavage, au-dessus de l'infrastructure)	m.cu	2000	43	86 400
		Enrobé pour pavage du pont préparé et posé à chaud (Couche de base, épaisseur variable 25 à 125 mm) (44 m de longueur)	tonne	1000	82	82 000
		Enrobé pour pavage du pont préparé et posé à chaud (Couche final - 40 mm) (44 m de longueur)	tonne	1000	44	44 000

Inventaire des matériaux pour la conception du pont Lafarge en acier-béton (2021)					
Conception et estimation des quantités par Hexaki					
Q					
ART.	DESCRIPTION	UNITÉ	kg / unité	QUANTITÉ	QUANTITÉ (kg)
<b>1,0</b>	<b>Fondation</b>				
1,10	Remblai MG 112 - Axe 2 derrière la dalle de transition	m.cu	2000,0	611	1 222 000
	Coussin de support en béton (sous les semelles)	m.cu	2400,0	54	129 024
	Coussin de support en MG-20 (dalle de transition)	m.cu	2400,0	50	120 960
	Béton des semelles	m.cu	2400,0	166	398 362
	Béton des culées	m.cu	2400,0	139	333 600
	Béton des dalles de transition	m.cu	2400,0	48	115 200
	Murs homologués (quatre murs en retour) (béton)	m.ca	480,0	56,25	27 000
	Semelle de réglage (béton)	m	100,0	20,00	2 000
	Module de couronnement (béton)	m	1000,0	20,56	20 560
1,20	<b>Sous-total béton</b>	<b>kg</b>			<b>1 146 706</b>
	Armature galvanisée semelles	kg	1,0	15 000	15 000
	Armature galvanisée des culées	kg	1,0	10 100	10 100
	Armature galvanisée dalle de transition	kg	1,0	6 080	6 080
	Murs homologués (quatre murs en retour) (armature)	m.ca	20	56,25	1 125
	Semelle de réglage (armature)	m	7	20,00	140
	Module de couronnement (armature)	m	70	20,56	1 439
1,30	<b>Sous-total acier d'armature galvanisée</b>	<b>kg</b>			<b>33 884</b>
	Murs homologués (quatre murs en retour) (quincaillerie acier galvanisé)	m	30	20,56	617
1,40	<b>Sous-total quincaillerie en acier galvanisé</b>	<b>kg</b>			<b>617</b>
<b>2,00</b>	<b>Structure d'acier</b>				
	Poutre principale - métallisé et peinturé	kg	1,0	32 526,0	32 526
2,10	<b>Sous-total structure d'acier métallisé et peinturé</b>	<b>kg</b>			<b>32 526</b>
	Boulonnage en acier galvanisé	kg	1,0	78,0	78
	Ancrage appui	kg	1,0	480,0	480
	Contreventement en acier galvanisé	kg	1,0	3 400,0	3 400
	Diaphragmes aux appuis en acier galvanisé	kg	1,0	3 400,0	3 400
2,20	<b>Sous total quincaillerie en acier galvanisé</b>	<b>kg</b>			<b>7 358</b>
<b>3,00</b>	<b>Tablier</b>				
	Membrane d'étanchéité	m.ca	10,0	300,0	3 000
3,10	<b>Sous total membrane</b>	<b>kg</b>			<b>3 000</b>
	Glissière modifiée 210B - galvanisé et peinturé	m	85,0	40,3	3 426
	Glissière modifiée 210D - galvanisé et peinturé	m	85,0	40,3	3 426
3,20	<b>Sous total quincaillerie en acier galvanisé</b>	<b>kg</b>			<b>6 852</b>
	Goujons en acier noir	kg	1,0	358,0	358
3,30	<b>Sous total acier noir</b>	<b>kg</b>			<b>358</b>
	Béton de la dalle - chasse-roue - trottoir	m.cu	2400,0	105,9	254 160
3,40	<b>Sous total acier noir</b>	<b>kg</b>			<b>254 160</b>
	Armature galvanisée de la dalle - chasse-roue - trottoir	kg	1,0	16 613,0	16 613
3,50	<b>Sous total acier noir</b>	<b>kg</b>			<b>16 613</b>
<b>4,00</b>	<b>Autres matériaux utilisés</b>				
	Néoprène appui	unité	11,7	8,0	94
	600 mm d'infrastructure à compléter au-dessus de la dalle de transition	m.cu	2000	86	172 800
	300 mm de granulats concassés MG-20 (sous le pavage, au-dessus de l'infrastructure)	m.cu	2000	43	86 400
	Enrobé pour pavage du pont préparé et posé à chaud (Couche de base, Épaisseur variable 25 à 125 mm) (44 m de longueur)	tonne	1000	82	82 000
	Enrobé pour pavage du pont préparé et posé à chaud (Couche final - 40 mm) (44 m de longueur)	tonne	1000	44	44 000

## **ANNEXE IV – ÉVALUATION DE LA QUALITÉ DES DONNÉES**

Tableau 33. Analyse de la qualité des données secondaires (A1-A3)

Matériau*	Donnée brute telle que collectée	Unité de la donnée brute	Référence ou source	Outils [AutoCAD plans (P) et fiches techniques (FTP)]	Processus de modélisation**	Qualité de la donnée brute					
						Technologie	Temps	Géographie	Complétude	Fiabilité	Note
<b>ÉTAPE DE PRODUCTION (A1-A3) : LISTE AGRÉGÉE DES MATÉRIAUX – CAS D'EXEMPLE LAFARGE EN BOIS</b>											
Béton	3301,03	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	A	2	1	1	2	2	
Acier	161,27	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	B	2	1	1	2	2	
Acier galvanisé et peinturé	116,11	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	C	2	1	1	2	2	
Acier zingué	0,0		Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	D	2	1	1	2	2	
Bois lamellé-croisé (CLT)	30,90	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	E	2	1	1	2	2	
Bois lamellé-collé (glulam)	229,31	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	F	2	1	1	2	2	
Bois	105,56	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	G	2	1	1	2	2	
Membrane	14,94	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	H	2	1	1	2	2	
Caoutchouc	1,87	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	I	2	1	1	2	2	
Éponge	0,41	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	J	2	1	1	2	2	
Contreplaqué	17,91	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	K	2	1	1	2	2	
Gravier MG-112	3511,49	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	L	2	1	1	2	2	
Gravier MG-20	248,27	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	M	2	1	1	2	2	
Asphalte	362,06	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	N	2	1	1	2	2	
Innoprep (	4,98	kg	FPI	FT	O	2	1	1	2	2	
Innocryl	0,0	kg	FPI	FT	P	2	1	1	2	2	
Peinture (	0,0	kg	FPI	FT	Q	2	1	1	2	2	
Arséniate de cuivre chromaté (ACC)	0,0	kg	FPI	FT	R	2	1	1	2	2	
UHMW	0	kg	Hexaki & Nordic Structures	AutoCAD, P, FT	R	2	1	1	2	2	

Tableau 34. Analyse de la qualité des données secondaires (A1-A3)

ÉTAPE DE PRODUCTION (A1-A3) : LISTE AGRÉGÉE DES MATÉRIAUX – CAS D'EXEMPLE LAFARGE EN BOIS										
Matériau*	Processus de modélisation (de A à V)	Base de données ou source	Localisation géographique	Année	Évaluation processus					
					Technologie	Temps	Géographie	Complétude	Fiabilité	Note
A	Concrete, 30-32MPa (CA-QC)   concrete production	ecoinvent v3.5	Québec, CA	2016	3	3	1	2	2	
B	Steel, low-alloyed (CA-QC)   steel production	ecoinvent v3.5	Québec, CA	2016	3	3	1	2	2	
C	Steel hot dip galvanized (ILCD), blast furnace route, production mix,	ELCD	Europe	2011	3	4	3	2	2	
D	Zinc coat, pieces (RoW)   zinc coating, pieces	ecoinvent v3.5	Reste du monde	1996	3	4	4	3	2	
E	Cross Laminated Timber, EPD/NA	EPD	Canada	2022	2	2	2	2	2	
F	Glued laminated timber, EPD/NA	EPD	Canada & É.U	2020	2	2	2	2	2	
G	Softwood lumber, EPD	EPD	Canada & É.U	2020	2	2	2	2	2	
	z. Wood treated with CCA treatment, SE/kg/RNA	Proxy	Canada	2022	4	2	2	3	3	
H	Bitumen seal, polymer EP4 flame retardant (CA-QC)   production	ecoinvent v3.5	Québec, CA	2013	3	3	1	2	2	
I	Synthetic rubber (RoW)   production   APOS, U	ecoinvent v3.5	Rest of the Word	2016	3	3	1	2	2	
J	Synthetic rubber (RoW)   production   APOS, U	ecoinvent v3.5	Rest of the Word	2016	3	3	4	3	3	
K	Softwood plywood, RNA_EPD	EPD	Canada & É.U	2020	2	3	4	3	3	
L	Silica sand, at plant/US** US-EI U	US-EI	É.U	2014	3	3	1	3	3	
M	Gravel, crushed (CA-QC)   production   APOS,	ecoinvent v3.5	Québec, CA	2014	3	3	1	2	2	
N	Mastic asphalt, at plant/US* US-EI U	US-EI	Québec, CA	2013	2	3	1	2	3	
O	Acrylic varnish production, product in 87.5% solution state	ecoinvent v3.5	Reste du monde	2011	3	4	4	3	3	
P	Acrylic varnish production, product in 87.5% solution state	ecoinvent v3.5	Reste du monde	2011	3	4	4	3	3	
Q	Alkyd paint production, white, solvent-based, product in 60% solution state	ecoinvent v3.5	Reste du monde	1995	3	4	4	3	3	
R	Chromated copper arsenate (CCA) production	Proxy	Canada	2022	4	2	2	3	3	
S	PET film (production only) E	ecoinvent v3.5	Europe	2007	3	4	3	2	2	

Tableau 35. Analyse de la qualité des données secondaires (A4-A5)

Matériau*	Donnée brute telle que collectée	Unité de la donnée brute	Référence ou source	Outils [AutoCAD plans (P) et fiches techniques (FTP)]	Processus de modélisation**	Qualité de la donnée brute					
						Technologie	Temps	Géographie	Complétude	Fiabilité	Note
<b>TRANSPORT DES MATÉRIAUX (A4)</b>											
Transport	1339	tkm	FPI	S/O	A4	2	1	1	2	2	
<b>ÉTAPE DE CONSTRUCTION (A5)</b>											
Machinerie <18.64 kW	0,3	Heure	Lit. (MTQ 2019)	S/O	A5.1	2	1	1	2	2	
18.64 kW ≤ Machinerie < 74.57 kW	0,2	Heure	Lit. (MTQ 2019)	S/O	A5.2	2	1	1	2	2	
Machinerie ≥ 74.57 kW	0,1	Heure	Lit. (MTQ 2019)	S/O	A5.3	2	1	1	2	2	

Tableau 36. Analyse de la qualité des données secondaires (A4-A5)

Matériau*	Processus de modélisation (de A à V)	Base de données ou source	Localisation géographique	Année	Évaluation processus					
					Technologie	Temps	Géographie	Complétude	Fiabilité	Note
<b>TRANSPORT DES MATÉRIAUX (A4)</b>										
A4	Transport, combination truck, long-haul, diesel powered/tkm/RNA	DATASMART 2020	Reste d'Amérique du nord	2010	2	4	4	3	2	
<b>ÉTAPE DE CONSTRUCTION (A5)</b>										
A5.1	Machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state (GLO)  machine operation, diesel, < 18.64 kW, steady-state	ecoinvent v3.5	Mondial	2014	2	4	4	3	2	
A5.2	Machine operation, diesel, ≥ 74.57 kW, high load factor (GLO)  machine operation, diesel, ≥ 74.57 kW, high load factor	ecoinvent v3.5	Mondial	2014	2	4	4	3	2	
A5.3	Machine operation, diesel, ≥ 74.57 kW, high load factor (GLO)  machine operation, diesel, ≥ 74.57 kW, high load factor	ecoinvent v3.5	Mondial	2014	2	4	4	3	2	

## ANNEXE V – RÉSULTATS ABSOLUS ET RELATIFS DE L'ANALYSE COMPARATIVE DES PONTS FORESTIERS

### Pont Paradis – Impacts pour « Berceau à la porte »

Tableau 37. Résultats impacts absolus comparatifs des scénarios du pont Paradis

Catégorie d'impacts	Unité	Paradis en bois	Paradis en acier-bois
Réchauffement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>	302,83	586,44
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11	3,35E-05	3,33E-05
Formation de smog photochimique	kg éq. O <sub>3</sub>	32,39	35,83
Acidification	kg éq. SO <sub>2</sub> eq	1,54	2,39
Eutrophisation	kg éq. N	0,68	0,53
Effets cancérigènes	CTUh	2,35E-04	2,57E-04
Effets non cancérigènes	CTUh	1,21E-04	1,25E-04
Effets respiratoires	kg éq. PM2.5	0,15	0,23
Écotoxicité	CTUe	5962,75	4565,48
Ép. des ressources fossiles	MJ surplus	429,04	444,39

Tableau 38. Résultats relatifs comparatifs des scénarios du pont Paradis

Catégorie d'impacts	Paradis en bois	Paradis en acier-bois
Réchauffement climatique	52%	100%
Appauvrissement de la couche d'ozone	100%	100%
Formation de smog photochimique	90%	100%
Acidification	64%	100%
Eutrophisation	100%	77%
Effets cancérigènes	92%	100%
Effets non cancérigènes	97%	100%
Effets respiratoires	67%	100%
Écotoxicité	100%	77%
Ép. des ressources fossiles	97%	100%

### Analyse de contribution des étapes de cycle de vie

Tableau 39. Analyse de contribution des étapes de cycle de vie des scénarios du pont Paradis

Analyse de contribution des étapes	Paradis en bois	Paradis en acier-bois
Réchauffement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>	kg éq. CO <sub>2</sub>
Production (A1-A3)	195,64	481,39
Transport (A4)	29,32	26,72
Construction (A5)	77,86	78,31
Total des émissions GES	302,83	586,44

## Pont Lafarge – Impacts pour « Berceau à la porte »

Tableau 40. Résultats impacts absolus comparatifs des scénarios du pont Lafarge

Catégorie d'impacts	Unité	Lafarge hybride en bois	Lafarge en acier-béton
Réchauffement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>	1273,60	1687,13
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11	1,03E-04	1,13E-04
Formation de smog photochimique	kg éq. O <sub>3</sub>	85,10	105,55
Acidification	kg éq. SO <sub>2</sub> eq	4,69	6,27
Eutrophisation	kg éq. N	0,80	1,13
Effets cancérigènes	CTUh	1,72E-05	3,08E-05
Effets non cancérigènes	CTUh	1,28E-04	1,83E-04
Effets respiratoires	kg éq. PM2.5	0,40	0,58
Écotoxicité	CTUe	1828,60	2817,07
Épuisement des ressources fossiles	MJ surplus	1324,58	1511,49

Tableau 41. Résultats relatifs comparatifs des scénarios du pont Lafarge

Catégorie d'impacts	Lafarge hybride en bois	Lafarge en acier-béton
Réchauffement climatique	75%	100%
Appauvrissement de la couche d'ozone	92%	100%
Formation de smog photochimique	81%	100%
Acidification	75%	100%
Eutrophisation	71%	100%
Effets cancérigènes	56%	100%
Effets non cancérigènes	70%	100%
Effets respiratoires	69%	100%
Écotoxicité	65%	100%
Épuisement des ressources fossiles	88%	100%

## Analyse de contribution des étapes de cycle de vie

Tableau 42. Analyse de contribution des étapes de cycle de vie des scénarios du pont Lafarge

Analyse de contribution des étapes	Lafarge hybride en bois	Lafarge en acier-béton
Réchauffement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>	kg éq. CO <sub>2</sub>
Production (A1-A3)	1106,55	1497,24
Transport (A4)	120,62	143,71
Construction (A5)	46,18	46,18
Total des émissions GES	1273,35	1687,13

## **ANNEXE VI – RÉSULTATS DES ANALYSES DE SENSIBILITÉS**

## Analyse de sensibilité – Impacts obtenus sous IMPACT 2002+

Tableau 43. Impacts absolus des scénarios du pont paradis sous IMPACT 2002+

Catégories d'impacts	Unité	Paradis en bois (%)	Paradis en acier-bois (%)
Effets cancérigènes	kg C2H3Cl eq	5,40E+02	5,98E+02
Effets non cancérigènes	kg C2H3Cl eq	2,72E+03	3,02E+03
Effets respiratoires (volatiles)	kg PM2.5 eq	3,43E-01	4,40E-01
Effets respiratoires (particules)	Bq C-14 eq	1,18E+03	1,28E+03
Rayonnement ionisant	kg CFC-11 eq	2,72E-05	2,83E-05
Destruction de la couche d'ozone	kg C2H4 eq	1,56E-01	1,27E-01
Écotoxicité aquatique	kg TEG water	5,73E+04	4,68E+04
Écotoxicité terrestre	kg TEG soil	3,67E+03	4,07E+03
Acidification terrestre / nutriment	kg SO2 eq	8,20E+00	1,04E+01
Occupation de la terre	m2org.arable	4,05E+00	6,67E-01
Acidification aquatique	kg SO2 eq	1,55E+00	2,41E+00
Eutrophisation aquatique	kg PO4 P-lim	6,49E-02	6,36E-02
Changement climatique	kg CO2 eq	2,93E+02	5,73E+02
Énergie non renouvelable	MJ primary	3,46E+03	6,73E+03
Extraction des minerais	MJ surplus	2,48E+01	5,23E+01

Tableau 44. Impacts relatifs des scénarios du pont paradis sous IMPACT 2002+

Catégories d'impacts	Paradis en bois (%)	Paradis en acier-bois (%)
Effets cancérigènes	90	100
Effets non cancérigènes	90	100
Effets respiratoires (volatiles)	78	100
Effets respiratoires (particules)	92	100
Rayonnement ionisant	96	100
Destruction de la couche d'ozone	100	81
Écotoxicité aquatique	100	82
Écotoxicité terrestre	90	100
Acidification terrestre / nutriment	79	100
Occupation de la terre	100	16
Acidification aquatique	64	100
Eutrophisation aquatique	100	98
Changement climatique	51	100
Énergie non renouvelable	51	100
Extraction des minerais	47	100

## Analyse de sensibilité – Impacts incluant la fin de vie des ponts

Tableau 45. Résultats des impacts absolus comparatifs des scénarios pont Paradis avec inclusion de la fin de vie

Catégorie d'impacts	Unité	Paradis en bois	Paradis en acier-bois
Réchauffement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>	449,27	745,31
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11	5,22E-05	5,37E-05
Formation de smog photochimique	kg éq. O <sub>3</sub>	58,53	64,37
Acidification	kg éq. SO <sub>2</sub> eq	2,87	3,85
Eutrophisation	kg éq. N	1,47	1,39
Effets cancérigènes	CTUh	7,48E-04	8,26E-04
Effets non cancérigènes	CTUh	3,05E-04	3,27E-04
Effets respiratoires	kg éq. PM2.5	0,28	0,36
Écotoxicité	CTUe	14794,18	14313,83
Épuisement des ressources fossiles	MJ surplus	691,62	732,33

Tableau 46. Résultats relatifs comparatifs des scénarios du pont Paradis incluant l'étape de fin de vie

Catégorie d'impacts	Paradis en bois	Paradis en acier-bois
Réchauffement climatique	60%	100%
Appauvrissement de la couche d'ozone	97%	100%
Formation de smog photochimique	91%	100%
Acidification	74%	100%
Eutrophisation	100%	94%
Effets cancérigènes	91%	100%
Effets non cancérigènes	93%	100%
Effets respiratoires	76%	100%
Écotoxicité	100%	97%
Ép. des ressources fossiles	94%	100%

## Analyse de sensibilité – Impacts incluant la fin de vie des ponts

Tableau 47. Résultats impacts absolus comparatifs des scénarios du pont Lafarge incluant l'étape de fin de vie

Catégorie d'impacts	Unité	Lafarge hybride en bois	Lafarge en acier-béton
Réchauffement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>	1621,98	2046,44
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11	1,88E-04	2,09E-04
Formation de smog photochimique	kg éq. O <sub>3</sub>	121,85	144,99
Acidification	kg éq. SO <sub>2</sub> eq	6,20	7,95
Eutrophisation	kg éq. N	1,11	1,50
Effets cancérigènes	CTUh	2,41E-05	3,88E-05
Effets non cancérigènes	CTUh	1,86E-04	2,49E-04
Effets respiratoires	kg éq. PM2.5	0,49	0,68
Écotoxicité	CTUe	2643,21	3803,20
Ép. des ressources fossiles	MJ surplus	2311,32	2628,02

Tableau 48. Résultats relatifs comparatifs des scénarios du pont Lafarge incluant l'étape de fin de vie

Catégorie d'impacts	Lafarge hybride en bois	Lafarge en acier-béton
Réchauffement climatique	79%	100%
Appauvrissement de la couche d'ozone	90%	100%
Formation de smog photochimique	84%	100%
Acidification	78%	100%
Eutrophisation	74%	100%
Effets cancérigènes	62%	100%
Effets non cancérigènes	75%	100%
Effets respiratoires	72%	100%
Écotoxicité	69%	100%
Ép. des ressources fossiles	88%	100%

## Analyse de sensibilité – Méthodes d'allocation économique

Tableau 49. Résultats des impacts absolus comparatifs des scénarios pont Paradis avec selon l'allocation économique

Catégorie d'impacts	Unité	Paradis en bois	Paradis en acier-bois
Réchauffement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>	3,30E+02	5,93E+02
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11	5,28E-05	4,04E-05
Formation de smog photochimique	kg éq. O <sub>3</sub>	5,06E+01	4,36E+01
Acidification	kg éq. SO <sub>2</sub> eq	2,24E+00	2,66E+00
Eutrophisation	kg éq. N	8,97E-01	5,68E-01
Effets cancérigènes	CTUh	2,41E-04	2,58E-04
Effets non cancérigènes	CTUh	1,55E-04	1,34E-04
Effets respiratoires	kg éq. PM2.5	3,18E-01	2,90E-01
Écotoxicité	CTUe	6,56E+03	4,71E+03
Épuisement des ressources fossiles	MJ surplus	6,21E+02	5,08E+02

Tableau 50. Résultats relatifs comparatifs des scénarios du pont Paradis selon l'allocation économique

Catégorie d'impacts	Paradis en bois	Paradis en acier-bois
Réchauffement climatique	56%	100%
Appauvrissement de la couche d'ozone	100%	77%
Formation de smog photochimique	100%	86%
Acidification	84%	100%
Eutrophisation	100%	63%
Effets cancérigènes	93%	100%
Effets non cancérigènes	100%	87%
Effets respiratoires	100%	91%
Écotoxicité	100%	72%
Ép. des ressources fossiles	100%	82%

Tableau 51. Résultats impacts absolus comparatifs des scénarios du pont Lafarge selon l'allocation économique

Catégorie d'impacts	Unité	Lafarge hybride en bois	Lafarge en acier-béton
Réchauffement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>	1,28E-04	1,13E-04
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11	1,31E+03	1,69E+03
Formation de smog photochimique	kg éq. O <sub>3</sub>	1,06E+02	1,06E+02
Acidification	kg éq. SO <sub>2</sub> eq	5,57E+00	6,27E+00
Eutrophisation	kg éq. N	1,13E+00	1,13E+00
Effets cancérigènes	CTUh	2,59E-05	3,08E-05
Effets non cancérigènes	CTUh	1,80E-04	1,83E-04
Effets respiratoires	kg éq. PM2.5	6,17E-01	5,82E-01
Écotoxicité	CTUe	2,73E+03	2,82E+03
Ép. des ressources fossiles	MJ surplus	1,58E+03	1,51E+03

Tableau 52. Résultats relatifs comparatifs des scénarios du pont Lafarge selon l'allocation économique

Catégorie d'impacts	Lafarge hybride en bois	Lafarge en acier-béton
Réchauffement climatique	78%	100%
Appauvrissement de la couche d'ozone	100%	88%
Formation de smog photochimique	100%	99%
Acidification	89%	100%
Eutrophisation	100%	99%
Effets cancérigènes	84%	100%
Effets non cancérigènes	98%	100%
Effets respiratoires	100%	94%
Écotoxicité	97%	100%
Ép. des ressources fossiles	100%	95%

## Analyse de sensibilité – Impacts obtenus en tenant compte des incertitudes aux bornes des intervalles d’incertitudes sur les données de conception des ponts ( $\pm 5\%$ et $\pm 30\%$ )

- PONT PARADIS

Tableau 53. Résultats absolus de l’analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant -5% pour pont Paradis en bois et +30% pour pont Paradis en acier-bois

Catégorie d'impacts	Unité	Paradis en bois (-5%)	Paradis en acier-bois (+30%)
Réchauffement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>	291,61	738,88
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11	3,27E-05	3,77E-05
Formation de smog photochimique	kg éq. O <sub>3</sub>	31,16	44,21
Acidification	kg éq. SO <sub>2</sub> eq	1,48	3,02
Eutrophisation	kg éq. N	0,65	0,66
Effets cancérigènes	CTUh	2,24E-04	3,33E-04
Effets non cancérigènes	CTUh	1,15E-04	1,61E-04
Effets respiratoires	kg éq. PM2.5	0,15	0,29
Écotoxicité	CTUe	5669,60	5905,02
Ép. des ressources fossiles	MJ surplus	415,86	527,80

Tableau 54. Résultats relatifs de l’analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant -5% pour pont Paradis en bois et +30% pour pont Paradis en acier-bois

Catégorie d'impacts	Paradis en bois (-5%)	Paradis en acier-bois (+30%)
Réchauffement climatique	39%	100%
Appauvrissement de la couche d'ozone	87%	100%
Formation de smog photochimique	70%	100%
Acidification	49%	100%
Eutrophisation	98%	100%
Effets cancérigènes	67%	100%
Effets non cancérigènes	71%	100%
Effets respiratoires	51%	100%
Écotoxicité	96%	100%
Ép. des ressources fossiles	79%	100%

Tableau 55. Résultats de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant +5% pour pont Paradis en bois et -30% pour pont Paradis en acier-bois

Catégorie d'impacts	Unité	Paradis en bois (+5%)	Paradis en acier-bois (-30%)
Réchauffement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>	314,11	450,04
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11	3,42E-05	2,89E-05
Formation de smog photochimique	kg éq. O <sub>3</sub>	33,62	32,48
Acidification	kg éq. SO <sub>2</sub> eq	1,60	1,97
Eutrophisation	kg éq. N	0,71	0,40
Effets cancérigènes	CTUh	2,47E-04	1,81E-04
Effets non cancérigènes	CTUh	1,26E-04	9,09E-05
Effets respiratoires	kg éq. PM2.5	0,16	0,17
Écotoxicité	CTUe	6255,89	3270,68
Épuisement des ressources fossiles	MJ surplus	442,22	394,65

Tableau 56. Résultats relatifs de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant +5% pour pont Paradis en bois et -30% pour pont Paradis en acier-bois

Catégorie d'impacts	Paradis en bois (+5%)	Paradis en acier-bois (-30%)
Réchauffement climatique	70%	100%
Appauvrissement de la couche d'ozone	100%	84%
Formation de smog photochimique	100%	97%
Acidification	81%	100%
Eutrophisation	100%	56%
Effets cancérigènes	100%	73%
Effets non cancérigènes	100%	72%
Effets respiratoires	91%	100%
Écotoxicité	100%	52%
Ép. des ressources fossiles	100%	89%

- PONT LAFARGE

Tableau 57. Résultats absolus de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant -5% pour pont Lafarge hybride en bois et +30% pour pont Lafarge en acier-béton

Catégorie d'impacts	Unité	Lafarge hybride en bois (-5%)	Lafarge en acier-béton (+30%)
Réchauffement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>	1211,99	2179,41
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11	9,84E-05	1,43E-04
Formation de smog photochimique	kg éq. O <sub>3</sub>	81,08	135,84
Acidification	kg éq. SO <sub>2</sub> eq	4,46	8,10
Eutrophisation	kg éq. N	0,76	1,45
Effets cancérigènes	CTUh	1,64E-05	3,97E-05

Catégorie d'impacts	Unité	Lafarge hybride en bois (-5%)	Lafarge en acier-béton (+30%)
Effets non cancérigènes	CTUh	1,22E-04	2,38E-04
Effets respiratoires	kg éq. PM2.5	0,38	0,75
Écotoxicité	CTUe	1740,13	3644,44
Ép. des ressources fossiles	MJ surplus	1263,26	1935,51

Tableau 58. Résultats relatifs de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant -5% pour pont Lafarge hybride en bois et +30% pour pont Lafarge en acier-béton

Catégorie d'impacts	Lafarge hybride en bois (-5%)	Lafarge en acier-béton (+30%)
Réchauffement climatique	56%	100%
Appauvrissement de la couche d'ozone	69%	100%
Formation de smog photochimique	60%	100%
Acidification	55%	100%
Eutrophisation	52%	100%
Effets cancérigènes	41%	100%
Effets non cancérigènes	51%	100%
Effets respiratoires	51%	100%
Écotoxicité	48%	100%
Ép. des ressources fossiles	65%	100%

Tableau 59. Résultats absolus de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant +5% pour pont Lafarge hybride en bois et -30% pour pont Lafarge en acier-béton

Catégorie d'impacts	Unité	Lafarge hybride en bois (+5%)	Lafarge en acier-béton (-30%)
Réchauffement climatique	kg éq. CO <sub>2</sub>	1334,71	1194,84
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg éq. CFC-11	1,08E-04	8,21E-05
Formation de smog photochimique	kg éq. O <sub>3</sub>	89,13	75,26
Acidification	kg éq. SO <sub>2</sub> eq	4,91	4,44
Eutrophisation	kg éq. N	0,84	0,80
Effets cancérigènes	CTUh	1,80E-05	2,19E-05
Effets non cancérigènes	CTUh	1,35E-04	1,29E-04
Effets respiratoires	kg éq. PM2.5	0,42	0,41
Écotoxicité	CTUe	1917,07	1989,70
Épuisement des ressources fossiles	MJ surplus	1385,90	1087,48

Tableau 60. Résultats relatifs de l'analyse de sensibilité en chassé-croisé sur les données de conception en considérant +5% pour pont Lafarge hybride en bois et -30% pour pont Lafarge en acier-béton

<b>Catégorie d'impacts</b>	<b>Lafarge hybride en bois (+5%)</b>	<b>Lafarge en acier-béton (-30%)</b>
Réchauffement climatique	100%	90%
Appauvrissement de la couche d'ozone	100%	76%
Formation de smog photochimique	100%	84%
Acidification	100%	90%
Eutrophisation	100%	96%
Effets cancérigènes	82%	100%
Effets non cancérigènes	100%	96%
Effets respiratoires	100%	98%
Écotoxicité	96%	100%
Ép. des ressources fossiles	100%	78%

## ANNEXE VII – ESTIMATION DES DURÉES DE VIE DES MATÉRIAUX CONSTITUTIFS DES PONTS

<b>Inventaire des matériaux pour le pont forestier de la rivière Paradis - Pont en bois</b>		
ART.	DESCRIPTION	DURÉE DE VIE
<b>2,0</b>	<b>Structure de bois Nordic</b>	<b>Sous hypothèse</b>
	Acier galvanisé à chaud	50 ans
	Bois lamellé-collé	50 ans
	Bois lamellé-croisé	50 ans
	Contreplaqué traité	25 ans
	Membrane d'étanchéité	50 ans
	Nylon (UHMW)	50 ans
2,20		
<b>3,0</b>	<b>Tablier</b>	
	Acier galvanisé à chaud	50 ans
	Acier zingué	25 ans
3,40	<b>Sous total acier</b>	
	<b>Glissière (12x12 + 8x8)</b>	10-15 ans
	<b>4x8 en bois traité</b>	10-15 ans
	<b>8x8 en bois traité</b>	25 ans
3,40	<b>Sous total bois traité</b>	

<b>Inventaire des matériaux pour le pont forestier de la rivière Paradis</b>		
<b>Pont acier-bois</b>		
<b>ART.</b>	<b>DESCRIPTION</b>	<b>DURÉE DE VIE</b>
<b>2,0</b>	<b>Structure d'acier</b>	<b>Sous hypothèse</b>
	Plaques raidisseurs 850x175x16 (nbr 20)	50 ans
	Plaques appuis (600x500x25*6)	50 ans
	Poutre principale - acier noir - AT	50 ans
<b>2,10</b>	<b>Sous-total structure d'acier noir</b>	
	Boulonnage en acier galvanisé (17 boulons $\frac{3}{4}$ * 5*2)	50 ans
	Ancrage appui (4 tirefonds galvanisés x 3 x 2)	50 ans
	Contreventement en acier galvanisé	50 ans
<b>2,20</b>	<b>Sous total quincaillerie en acier galvanisé</b>	
<b>3,0</b>	<b>Tablier</b>	
	Plaques d'attache 8x8 aux WWF	50 ans
	Boulons pour glissières (51 x 2= 102 boulons de 32 po x $\frac{3}{4}$ )	50 ans
	Vis pour plaques d'attache	50 ans
	Vis pour 8x8	25
<b>3,30</b>	<b>Sous total acier galvanisé (quincaillerie)</b>	
	Glissière (12x12 + 8x8)	10-15 ans
	4x8 en bois traité	10-15 ans
	8x8 en bois traité	25 ans
<b>3,40</b>	<b>Sous total bois</b>	

Lafarge hybride en bois (2021)			
ART.	DESCRIPTION	DURÉE DE VIE	
		Sous hypothèse	Unité
1,0	<b>Fondation</b>		
1,10	<b>Remblai MG 112 - Axe 2 derrière la dalle de transition</b>		
	Coussin de support en béton (sous les semelles)	75	ans
	Coussin de support en MG-20 (dalle de transition)	75	ans
	Béton des semelles	75	ans
	Béton des culées	75	ans
	Béton des dalles de transition	75	ans
	Murs homologués (quatre murs en retour) (béton)	75	ans
	Semelle de réglage (béton)	75	ans
	Module de couronnement (béton)	75	ans
		75	
1,20	<b>Sous-total béton</b>	75	
		75	
	Armature galvanisée semelles	75	ans
	Armature galvanisée des culées	75	ans
	Armature galvanisée dalle de transition	75	ans
	Murs homologués (quatre murs en retour) (armature)	75	ans
	Semelle de réglage (armature)	75	ans
	Module de couronnement (armature)	75	ans
		75	
1,30	<b>Sous-total acier d'armature galvanisée</b>	75	
		75	
	Murs homologués (quatre murs en retour) (quincaillerie acier galvanisé)	75	ans
		75	
1,40	<b>Sous-total quincaillerie en acier galvanisé</b>	75	
		75	
2,0	<b>Structure de bois</b>		
	Sections de bois lamelé-collé droite (incluant 3 couches de teinture Sansin)	75	ans
	Sections de bois lamelé-collé arche (incluant 3 couches de teinture Sansin)	75	ans
	Platelage de bois (incluant 2 couches de teinture Sansin)	75	ans
	Sections de trottoir en bois CLT (incluant 1 couche de teinture Sansin)	75	ans
	Contreplaqué 3/4"	75	ans
2,10	<b>Sous-total bois</b>		
	Tourillon côté bois (acier galvanisé)	75	ans
	Tourillon côté béton (acier galvanisé)	75	ans
	Grande tige d'assemblage	75	ans
	Appareils d'appui, butée, quincaillerie et ses ancrages (acier galvanisé)	75	ans
	Plaques vissées (acier galvanisé) et vis...	75	ans
	Épissures en acier galvanisé et boulons	75	ans
2,2	<b>Sosu total quincaillerie en acier galvanisé</b>		
3,0	<b>Tablier</b>		
	Membrane d'étanchéité (platelage, trottoir et chasse-roue)	25	ans
	Membrane d'étanchéité entre poutre et platelage	25	ans
3,10	<b>Sosu total membrane</b>		
	Plaques d'acier (trottoir et chasse-roue)	75	ans
	Glissière modifiée 210B - galvanisé et peinturé	75	ans
	Glissière modifiée 210D - galvanisé et peinturé	75	ans
	Tous les solins épaisseur 20 Ga. métallisé, peinturé et pose	75	ans
3,20	<b>Sosu total quincaillerie en acier galvanisé</b>		
4,0	<b>Autres matériaux utilisés</b>		
	Surface anti-dérapante	50	ans
	Néoprène sous le premier et dernier panneau	50	ans
	Néoprène appui	50	ans
	Contreplaqué 3/4 en bois traité	25	ans
	600 mm d'infrastructure à compléter au-dessus de la dalle de transition	50	ans
	300 mm de granulats concassés MG-20 (sous le pavage, au-dessus de l'infrastructure)	50	ans
	Enrobé pour pavage du pont préparé et posé à chaud (Couche de base, Épaisseur variable 25 à 125 mm) (44 m de longueur)	25	ans
	Enrobé pour pavage du pont préparé et posé à chaud (Couche final - 40 mm) (44 m de longueur)	25	ans

Lafarge en acier-béton (2021)			
ART.	DESCRIPTION	DURÉE DE VIE	
		Sous hypothèse	Unité
<b>1,0</b>	<b>Fondation</b>		
1,10	<b>Remblai MG 112 - Axe 2 derrière la dalle de transition</b>		
	Coussin de support en béton (sous les semelles)	75	ans
	Coussin de support en MG-20 (dalle de transition)	75	ans
	Béton des semelles	75	ans
	Béton des culées	75	ans
	Béton des dalles de transition	75	ans
	Murs homologués (quatre murs en retour) (béton)	75	ans
	Semelle de réglage (béton)	75	ans
	Module de couronnement (béton)	75	ans
1,20	<b>Sous-total béton</b>		
	Armature galvanisée semelles	75	ans
	Armature galvanisée des culées	75	ans
	Armature galvanisée dalle de transition	75	ans
	Murs homologués (quatre murs en retour) (armature)	75	ans
	Semelle de réglage (armature)	75	ans
	Module de couronnement (armature)	75	ans
1,30	<b>Sous-total acier d'armature galvanisée</b>		
	Murs homologués (quatre murs en retour) (quincaillerie acier galvanisé)	75	ans
1,40	<b>Sous-total quincaillerie en acier galvanisé</b>		
<b>2,0</b>	<b>Structure d'acier</b>		
	Poutre principale - métallisé et peinturé	75	ans
2,10	<b>Sous-total structure d'acier métallisé et peinturé</b>		
	Boulonnage en acier galvanisé	75	ans
	Ancrage appui	75	ans
	Contreventement en acier galvanisé	75	ans
	Diaphragmes aux appuis en acier galvanisé	75	ans
2,20	<b>Sosu total quincaillerie en acier galvanisé</b>		
<b>3,0</b>	<b>Tablier</b>		
	Membrane d'étanchiété	25	ans
3,10	<b>Sous total membrane</b>		
	Glissière modifiée 210B - galvanisé et peinturé	75	ans
	Glissière modifiée 210D - galvanisé et peinturé	75	ans
3,20	<b>Sosu total quincaillerie en acier galvanisé</b>		
	Goujons en acier noir	75	ans
3,30	<b>Sous total acier noir</b>		
	Béton de la dalle - chasse-roue - trottoir		ans
3,40	<b>Sous total béton</b>		
	Armature galvanisée de la dalle - chasse-roue - trottoir	75	ans
3,50	<b>Sous total acier galvanisé</b>		
<b>4,0</b>	<b>Autres matériaux utilisés</b>		
	Néoprène appui	50	ans
	600 mm d'infrastructure à compléter au-dessus de la dalle de transition	50	ans
	300 mm de granulat concassée MG-20 (sous le pavage, au-dessus de l'infrastructure)	50	ans
	Enrobé pour pavage du pont préparé et posé à chaud (Couche de base, Épaisseur variable 25 à 125 mm) (44 m de longueur)	25	ans
	Enrobé pour pavage du pont préparé et posé à chaud (Couche final - 40 mm) (44 m de longueur)	25	ans

**ANNEXE VIII –  
RAPPORT DE REVUE CRITIQUE**



## RAPPORT DE REVUE CRITIQUE

### ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE PONTS FORESTIERS ET ROUTIERS

PRÉSENTÉ À



8 JUILLET 2022

INFORMATIONS SUR LE RAPPORT	
<b>Titre de l'étude</b>	ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE PONTS FORESTIERS ET ROUTIERS
<b>Date</b>	8 juillet 2022
<b>Auteurs de l'étude</b>	Dieudonné Romaric Batsy, Ph. D., FPIinnovations
<b>Réviseur indépendant</b>	Hugues Imbeault-Térecault ing. M.Sc.A., Groupe AGÉCO
<b>Commanditaire de l'étude</b>	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP)

## 1. INTRODUCTION

---

Ce rapport de revue critique présente les conclusions ainsi que le verdict final de la revue critique du rapport intitulé *Analyse de cycle de vie de ponts forestiers et routiers*. Le rapport révisé, mandaté par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP), a été préparé par M. Dieudonné Romaric Batsy de FPInnovations.

Cette étude est réalisée dans le cadre d'un programme de développement de connaissances sur les matériaux à faible empreinte environnementale. Elle porte sur les ponts forestiers et les ponts routiers dans le but de comparer les structures en bois et acier-béton.

Étant donné que le MFFP désire communiquer à des ingénieurs concepteurs de ponts au sein du ministère et des chercheurs impliqués dans le programme les résultats et conclusions de cette étude comparative, une revue critique avec un expert indépendant a été réalisée.

## 2. MÉTHODOLOGIE DE LA REVUE

---

L'objectif de la revue critique est de valider la conformité du rapport d'analyse du cycle de vie (ACV) avec les exigences des normes suivantes :

- ISO 14040:2006/AMD 1:2020 – Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre
- ISO 14044:2006/AMD 1:2017/AMD 2:2020 – Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices

Bien que l'étude révisée se concentre sur les émissions de gaz à effet de serre, la conformité à la norme ISO/TS 14067 sur les empreintes carbone n'a pas été vérifiée.

Les éléments principaux à valider durant le processus de revue critique selon les normes ISO 14040-44:2006 sont les suivants :

- La méthodologie utilisée pour réaliser l'ACV doit être conforme à cette norme;
- La méthodologie utilisée pour réaliser l'ACV doit être scientifiquement et techniquement valide;
- Les données utilisées doivent être appropriées et représentatives de l'objectif et du champ de l'étude;
- L'interprétation doit refléter les limites identifiées et les objectifs de l'étude;
- Le rapport doit être transparent et cohérent.

Les conclusions de ce rapport de revue critique s'appliquent à la version finale du rapport reçu le 6 juillet 2022. Dans le cadre de cette revue, une révision du modèle n'a pas été effectuée; cependant la plausibilité des résultats a été évaluée.

La revue critique a été réalisée par un seul expert indépendant qui est M. Hugues Imbeault-Tétreault, conseiller aux affaires scientifiques, Groupe AGÉCO. M. Imbeault-Tétreault cumule plus de 10 ans d'expérience dans le domaine de l'ACV, ainsi que plusieurs revues critiques.

Il est important de noter que selon la section 6.3 de la norme ISO 14044:2006, dans le cas d'une étude qui vise à supporter une affirmation comparative divulguée au public, une revue critique doit être réalisée par un comité composé d'au moins trois experts indépendants. Par conséquent, le processus de révision avec un seul expert ne permet pas de se conformer à cette exigence, si le commanditaire venait à communiquer les résultats au grand public.

### Déroulement de la revue critique

Le processus de revue critique s'est déroulé en deux temps : d'abord sur un rapport intermédiaire contenant les objectifs et la portée de l'étude, puis sur un rapport final incluant le reste de la méthodologie et les résultats. La première partie a été reçue le 13 décembre 2021. Les commentaires formulés par le réviseur ont été transmis à l'auteur de l'étude le 21 janvier. Ensuite, la version complète du rapport a été transmise au réviseur le 7 mars 2022. S'en sont suivis plusieurs rondes de commentaires avec des échanges courriel et au besoin des appels organisés avec l'auteur pour traiter des points les plus complexes. La version finale du rapport a été reçue le 6 juillet 2022.

La liste complète des commentaires est présentée à l'annexe A.

### 3. CONCLUSIONS ET VERDICT DE LA REVUE CRITIQUE

---

Le réviseur juge que les quatre phases de cette étude ACV (objectifs et champ de l'étude, inventaire, évaluation des impacts et interprétation) ont été exécutées de façon conforme avec les exigences des normes ISO 14040-44:2006. Une grille de conformité ISO est présentée à l'annexe B. Les frontières des systèmes à l'étude sont limitées aux premières étapes du cycle de vie (du berceau jusqu'au site de construction), mais plusieurs analyses de sensibilités ont été ajoutées afin de tirer des conclusions cohérentes avec le but de l'étude. Les conclusions du rapport se limitent à la performance GES des systèmes comparés et aucune conclusion sur la leur performance environnementale globale n'est formulée.

Les méthodes et données utilisées sont considérées comme scientifiquement valides et suffisamment représentatives de la pratique actuelle en ACV. Ces dernières sont également appropriées pour répondre aux objectifs de cette étude.

L'interprétation est réalisée dans le respect des limites de l'étude.

Le rapport est transparent : les choix de modélisation et les hypothèses sont documentés de façon suffisante.

Ce rapport de revue critique ne représente pas un endossement par le réviseur indépendant des conclusions et des affirmations comparatives de cette étude. Il représente toutefois un avis quant à la conformité du rapport à l'étude avec les exigences des normes ISO 14044-44.

#### Verdict

En excluant les exigences des sections 5.3 et 6.3 de la norme ISO 14044 pour les affirmations comparatives, le réviseur indépendant juge que le rapport « *Analyse de cycle de vie de ponts forestiers et routiers – 6 juillet 2022* » est conforme à toutes les autres exigences des normes ISO 14040-44:2006.



Hugues Imbeault-Tétreault, ing. M.Sc.A.

Conseiller aux affaires scientifiques

Groupe AGÉCO

hugues.i-tetreault@groupeageco.ca



[info@fpinnovations.ca](mailto:info@fpinnovations.ca)  
[www.fpinnovations.ca](http://www.fpinnovations.ca)

## NOS BUREAUX

---

Pointe-Claire  
570, boul. Saint-Jean  
Pointe-Claire (Qc)  
Canada H9R 3J9  
(514) 630-4100

Vancouver  
2665, East Mall  
Vancouver (C.-B.)  
Canada V6T 1Z4  
604 224-3221

Québec  
1055, rue du P.E.P.S.  
Québec (Qc)  
Canada G1V 4C7  
418 659-2647