

L'influence du choix de la méthode sur l'interprétation des résultats d'évaluation des impacts dans l'Analyse de Cycle de Vie d'un bâtiment en bois

LE SOUDER Pierre-Mathis^{1,2}, BLANCHET Pierre¹, MICHAUD Franck²

¹CIRCERB, Université Laval, Canada

²LIMBHA, Ecole Supérieure du Bois, France

pierremathis.lesouder@gmail.com

Mots clés : ACV comparée, Méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie, Bois massif, Connecteurs structuraux, Effet d'échelle.

Introduction

Dans un contexte de transition écologique et de décarbonation du secteur du bâtiment, qui représente 36% de la consommation énergétique finale mondiale et 39% des émissions de GES liées à l'énergie (Abergel et al 2019), l'analyse du cycle de vie (ACV) s'impose comme un outil central pour quantifier les impacts environnementaux des constructions (International Organization for Standardization 2006, 2006). Au fil du temps, cette méthode est devenue essentielle pour évaluer les choix de matériaux et de conception (Guinée et al 2011), particulièrement dans le contexte actuel où le secteur se tourne vers le bois, matériau renouvelable considéré comme bas-carbone (Rasmussen et al 2020).

Cependant, au-delà des données d'inventaire, les résultats d'ACV dépendent fortement de la méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie (EICV) utilisée (Rybczewska-Błażejowska et Jezierski 2024). Ces méthodes — telles que TRACI ou ReCiPe — se distinguent par leur périmètre géographique (Mutel et al 2019), leurs facteurs de caractérisation, la nature et le nombre des indicateurs produits, ou encore leur traitement de certaines substances spécifiques (Dong et al). Des études ont montré que le choix de la méthode d'EICV peut conduire à des conclusions différentes, particulièrement dans le cadre d'ACV comparatives (Le et al 2018). Cette problématique soulève une question cruciale pour les praticiens : si les méthodes d'EICV ont une influence sur les résultats, comment s'assurer que les décideurs font les bons choix de conception ?

Cette question est d'autant plus pertinente dans le contexte des bâtiments bois, où les études tendent à négliger certains éléments structurels. Parmi 13 études examinées, seulement 3 ont considéré les impacts des connecteurs structurels (Lukić et al 2021), leur inclusion dépendant souvent de la disponibilité d'inventaires précis des quantités de matériaux. De plus, l'un des trois critères d'exclusion de la norme ISO 14044 (International Organization for Standardization 2006) permet d'exclure des éléments basés sur leur masse, avec un seuil suggéré de 1%, ce qui conduit souvent à l'exclusion des connecteurs structurels métalliques, même si tous les matériaux n'ont pas le même impact environnemental.

Malgré l'importance de cette question méthodologique, peu d'études ont analysé l'influence du choix de la méthode d'EICV spécifiquement dans le contexte des bâtiments bois. Le présent article vise donc à répondre à la question suivante : le choix de la méthode d'EICV influence-t-il les conclusions d'une étude comparative portant sur des solutions structurelles bois ? Une analyse sera réalisée sur l'influence du choix de la méthode d'EICV à trois échelles successives : celle du connecteur bois-métal, celle de l'assemblage structurel, et celle du bâtiment complet.

Matériel et Méthodes

Cas d'étude

Le modèle de bâtiment hypothétique étudié s'appuie sur les travaux de Hosseini et al (2023). Il s'agit d'un bâtiment commercial en bois, de dimensions 12,72 m × 6,60 m, réparti sur six niveaux, dont un sous-sol, pour une surface totale de 6 198 m². Le système constructif est poteaux-poutres en bois lamellé-collé d'épinette noire du Québec (*Picea mariana*), avec des planchers en bois lamellé-croisé (CLT). Le bâtiment comporte un noyau

béton et des murs de cisaillement en CLT, avec 315 poteaux-poutres. Les calculs structuraux ont été réalisés selon le Code national du bâtiment du Canada (*National Research Council Canada* 1990).

L'étude s'appuie sur un bâtiment commercial hypothétique, situé à Québec, de six niveaux en bois lamellé-collé d'épinette noire du Québec, avec système constructif poteaux-poutres et 315 connexions. Deux connecteurs structurels représentatifs des pratiques québécoises ont été comparés : le moisage (MS) et la queue d'aronde industrielle (QA). La queue d'aronde nécessite 8,3 kg d'acier et 3,6 kg d'aluminium contre 0,2 kg d'acier seulement pour le moisage, mais impose un surdimensionnement du bois (818,7 kg contre 675,4 kg de bois lamellé-collé).

Modélisation multi-échelle

Trois modèles à différentes échelles ont été développés. Le modèle 1 étudie les connecteurs seuls, dimensionnés pour une charge de 100 kN. Le modèle 2 élargie la comparaison à l'assemblage poteaux-poutres. Les connecteurs sont inclus et le dimensionnement des éléments en bois varient selon la solution. Le modèle 3 prend en compte la totalité du bâtiment. A cette échelle, les quantités des nouveaux matériaux ajoutés ne varient pas en fonction de la solution. Ce modèle permet d'évaluer les impacts à l'échelle du bâtiment.

L'ACV suit une approche "cradle-to-cradle" incluant production (A1-A3) et fin de vie (C2-C4). La phase d'utilisation est exclue, considérée égale selon les solutions.

Outils d'étude

L'unité fonctionnelle (UF) est définie comme le transfert d'une charge de 100 kN vers l'appui sur une durée de vie du bâtiment estimée à 60 ans, conformément à la certification LEED v4 (*U.S. Green Building Council* 2013). Les ACV ont été réalisées avec SimaPro 9.0. Pour garantir la transparence des données et la représentativité des résultats, la base générique Ecoinvent v3.5 (Wernet et al 2016) a été utilisée, regroupant des données environnementales moyennes pour les matériaux de construction. Le modèle de système choisi est « Allocation, cut-off by classification – unit ». Les processus de la région du Québec ont été privilégiés, avec recours aux processus européens adaptés au mix énergétique québécois en cas d'indisponibilité.

Méthodes d'évaluation d'impact

Deux méthodes d'évaluation de l'inventaire de cycle de vie (EICV) ont été comparées :

- TRACI 2.1 : développée par l'US EPA pour des applications nord-américaines, couvrant 10 catégories d'impacts midpoint (ou impacts intermédiaires);
- ReCiPe 2016 Midpoint Egalitarian : méthode internationale développée par un consortium européen, couvrant 18 catégories d'impacts midpoint.

ReCiPe propose trois approches, hiérarchiste, individualiste et égalitariste, selon les hypothèses temporelles et sociales. Pour cette étude, les résultats ont été exploités en midpoints Egalitarian pour un reflet à long terme et plus pessimiste. La méthode utilisée s'intitule donc ReCiPe 2016 MidPoint Egalitarian (désormais abrégé ReCiPe).

Il existe aussi les catégories d'impacts endpoint, seulement proposé par la méthode ReCiPe. Les résultats de ces catégories d'impacts endpoint ne seront pas analysés dans la partie Résultats mais seulement évoqués dans la partie Discussion.

Le Tab. 1 montre les cinq catégories d'impacts communes aux deux méthodes ont été retenues pour la comparaison : appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique, le réchauffement climatique, l'acidification, l'eutrophisation et les particules fines. Ces catégories présentent des

unités identiques entre TRACI et ReCiPe, permettant une comparaison directe des résultats. Cependant, bien que les unités soient identiques, chaque méthode utilise des facteurs de caractérisation différents pour convertir les émissions d'inventaire en impacts. Ces facteurs, qui attribuent un poids spécifique à chaque substance émise, constituent la principale source de divergence entre les méthodes d'EICV.

Tab. 1 : Catégories d'impacts retenues pour la comparaison de l'étude et leur abréviations

TRACI 2.1			ReCiPe 2016 Midpoint E		
OD	Ozone depletion	kg CFC11 eq	kg CFC11 eq	Stratospheric ozone depletion	SOD
GW	Global warming	kg CO2 eq	kg CO2 eq	Global Warming	GLO
AC	Acidification	kg SO2 eq	kg SO2 eq	Terrestrial acidification	TAC
EU	Eutrophication	kg N eq	kg N eq	Marine eutrophication	MEU
RE	Respiratory effects	kg PM2,5 eq	kg PM2,5 eq	Fine particulate matter formation	FPM

Résultats

Échelle du connecteur, Modèle 1

Les Fig. 1 et 2 montrent les impacts du moisage et de la queue d'aronde avec le scénario défini dans la section précédente en utilisant la méthode d'EICV TRACI, pour la première, et ReCiPe, pour la deuxième. À l'échelle du connecteur, les deux méthodes convergent vers des conclusions identiques dans toutes les catégories d'impacts évaluées. La queue d'aronde présente des impacts supérieurs de plus de deux ordres de grandeur par rapport au moisage. Cette robustesse s'explique par la différence importante de masse des connecteurs métalliques entre les deux solutions, rendant les conclusions insensibles aux variations méthodologiques.

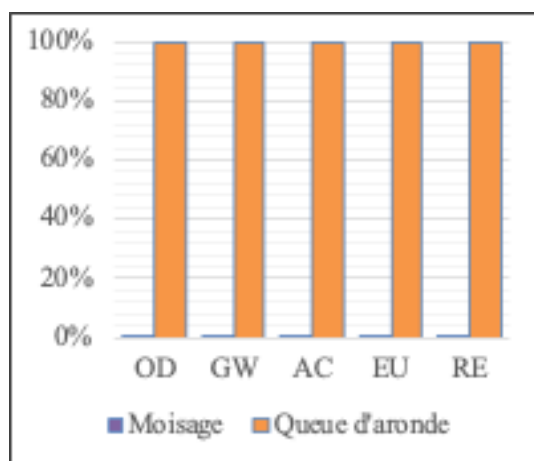


Fig. 1 : Résultats de l'ACV du modèle 1 avec TRACI 2.1

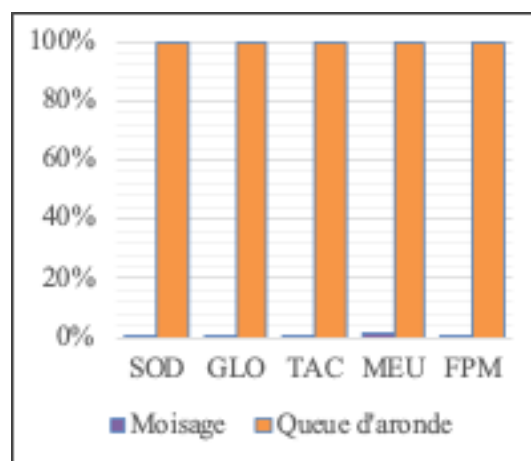


Fig. 2 : Résultats de l'ACV du modèle 1 avec ReCiPe 2016

Échelle de l'assemblage, Modèle 2

Les Fig. 3 et 4 montrent les impacts du moisage et de la queue d'aronde et de leur ossature bois associée en utilisant la méthode d'EICV TRACI, pour la première, et ReCiPe, pour la deuxième. L'introduction de la structure bois modifie substantiellement la dynamique comparative. Les écarts se resserrent significativement (jamais plus de 15% de différence). Le moisage devient plus impactant dans la catégorie eutrophisation pour les deux méthodes, reflétant l'influence de sa masse de bois bien supérieure (*i.e* augmentation de la présence d'azote).

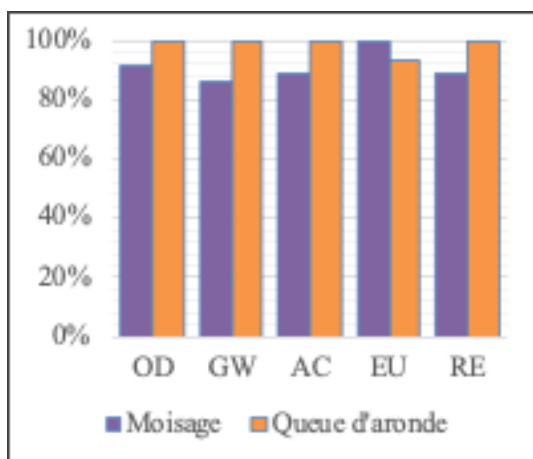


Fig. 3 : Résultats de l'ACV du modèle 2 avec TRACI 2.1

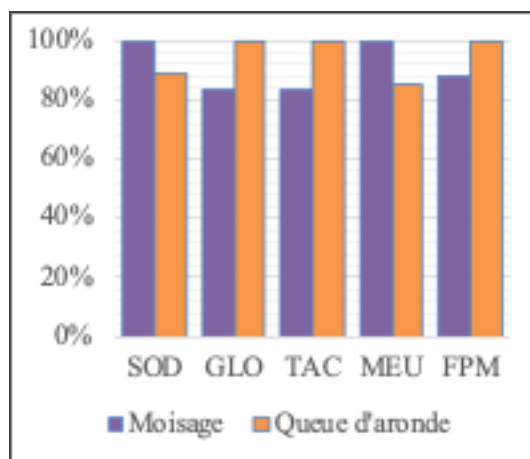


Fig. 4 : Résultats de l'ACV du modèle 2 avec ReCiPe 2016

Plus révélateur, ReCiPe 2016 identifie le moisage comme plus impactant que la queue d'aronde dans l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, illustrant les différences de facteurs de caractérisation entre méthodes. Malgré ces divergences catégorielles, les deux méthodes maintiennent une conclusion globale identique favorisant le moisage.

Échelle du bâtiment, Modèle 3

Les Fig. 5 et 6 montrent les impacts du moisage et de la queue d'aronde, de leur ossature associée et du bâtiment, en utilisant la méthode d'EICV TRACI, pour la première, et ReCiPe, pour la deuxième. À l'échelle du bâtiment complet, les différences entre solutions se réduisent drastiquement (toujours moins de 8%). La structure poteau-poutre ne représente que 7-8% de la masse totale du bâtiment. Ni TRACI ni ReCiPe ne permettent d'observer des écarts significatifs pour justifier un choix définitif. Cette incapacité à conclure résulte de la dilution progressive de l'influence des connecteurs dans la masse totale du bâtiment.

Discussion

Cette étude révèle une influence progressive du choix de la méthode d'EICV selon l'échelle d'analyse. Les différences observées entre TRACI 2.1 et ReCiPe 2016 s'enracinent dans leurs développements distincts : TRACI, conçue par l'EPA américaine, utilise des facteurs de caractérisation adaptés au contexte nord-américain, tandis que ReCiPe adopte une approche plus globale avec des facteurs européens.

Cette sensibilité méthodologique soulève des questions importantes pour les praticiens. Lorsque les différences entre solutions sont importantes (Modèle 1), le choix de la méthode d'EICV importe peu. Au Modèle 2, des divergences apparaissent dans certaines catégories sans affecter les conclusions générales. Au Modèle 3, c'est la modélisation elle-même qui empêche toute conclusion définitive en raison de la dilution des écarts d'impacts observés à l'échelle de modélisation inférieure.

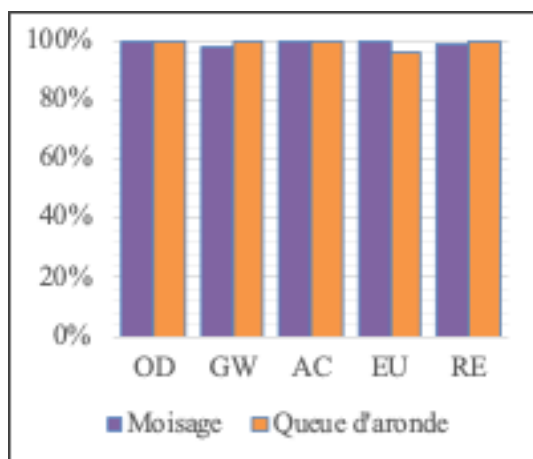


Fig. 5 : Résultats de l'ACV du modèle 3 avec TRACI 2.1

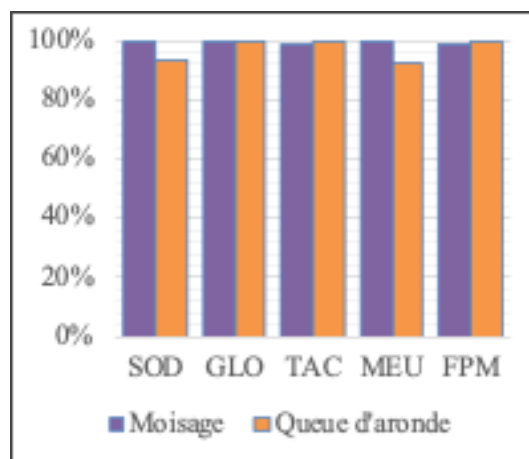


Fig. 6 : Résultats de l'ACV du modèle 3 avec ReCiPe 2016 (b)

Un décideur privilégiant spécifiquement certaines catégories d'impact pourrait aboutir à des choix différents selon la méthode employée, soulignant l'importance de la transparence dans le choix des catégories et de la méthode d'évaluation.

Conclusion

Cette étude confirme que le choix de la méthode d'évaluation des impacts du cycle de vie influence effectivement les interprétations d'une étude comparative portant sur des solutions structurelles bois, mais de manière variable selon l'échelle d'analyse.

À l'échelle du connecteur, TRACI 2.1 et ReCiPe 2016 convergent vers des conclusions identiques grâce à l'amplitude des différences entre solutions. L'extension à l'échelle de l'assemblage révèle les premières divergences méthodologiques, particulièrement dans l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique, tout en maintenant des conclusions globales proches. À l'échelle du bâtiment complet, la dilution des écarts entre impacts rend toute distinction impossible avec les deux méthodes. A cette échelle, la taille du système permet de conclure que le résultat est peu sensible à la méthode EICV. Celle-ci n'est pas prépondérante dans les limites proposées par cette étude.

Ces résultats appellent à une vigilance accrue des praticiens face au choix méthodologique, particulièrement lorsque les différences entre alternatives sont réduites. L'utilisation de plusieurs méthodes d'EICV en parallèle pourrait constituer une approche de validation robuste pour les études comparatives critiques, accompagnée d'une analyse de la significativité des écarts observés.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier du CRSNG et de la collaboration des partenaires industriels de la chaire CIRCERB (Université Laval)

Bibliographie

Abergel, T., Dulac, J., Hamilton, I., Jordan, M., and Pradeep, A. (2019). Global Status Report for BuildCe travail ings and Construction—Towards a Zero-Emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector, Environment Programme, United Nations Environment Programme.

ISO 14040 & ISO 14044(2006). "Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework,"& "Requirements and guidelines", International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

Guinée, J. B., Heijungs, R., Huppes, G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T., and Rydberg, T. (2011). Life cycle assessment: Past, present, and future," *Environmental Science and Technology* 45(1), 90-96. DOI: 10.1021/es101316v

Rasmussen, F. N., Birkved, M., and Birgisdóttir, H. (2020). "Low- carbon design strategies for new residential buildings—Lessons from architectural practice," *Architectural Engineering and Design Management* 16(5), 374-390. DOI: 10.1080/17452007.2020.1747385

Rybczewska-Błazejowska, M., Jezierski, D. (2024). Comparison of ReCiPe 2016, ILCD 2011, CML-IA baseline and IMPACT 2002+ LCIA methods: a case study based on the electricity consumption mix in Europe. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 29, 1799–1817. DOI: 10.1007/s11367-024-02326-6

Mutel C., Liao X., Patouillard L., Bare J., Fantke P., Frischknecht R., Hauschild M., Jolliet O., de Souza D. M., Laurent A., Pfister S., Verones F. (2019). Overview and recommendations for regionalized life cycle impact assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 24(5):856-865. DOI: 10.1007/s11367-018-1539-4

Dong, Y., Hossain, M. U., Li, H., & Liu, P. (2021). Developing Conversion Factors of LCIA Methods for Comparison of LCA Results in the Construction Sector. *Sustainability*, 13(16), 9016. DOI : 10.3390/su13169016

Le, K. N., Tran, C. N., & Tam, V. W. (2018). Life-cycle greenhouse-gas emissions assessment: An Australian commercial building perspective. *Journal of cleaner production*, 199, 236-247. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.172

Lukić, I., Premrov, M., Passer, A., and Žegarac Leskovic, V. (2021). "Embodied energy and GHG emissions of residential multi-storey timber buildings by height – A case with structural connectors and mechanical fasteners," *Energy and Buildings* 252. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111387

Hosseini, Z., Laratte, B., and Blanchet, P. (2023). "Circular economy: Construction," *BioResources* 18(3), 4699-4722. DOI: 10.15376/biores.18.3.4699-4722

National Research Council Canada. Associate Committee on the National Building Code, (1990).

U.S. Green Building Council. (2013). "LEED v4 for Building Design and Construction," USGBC Inc 332.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., and Weidema, B. (2016). "The ecoinvent database version 3 (Part I): Overview and methodology," *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21(9) 218-1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8