

Quelques enjeux soulevés par l'analyse de cycle de vie d'un produit du bois en contexte québécois

Achille-Benjamin Laurent¹, Jean-François Boucher², Claude Villeneuve², Sophie D'Amours¹.

¹ Université Laval, Département de génie mécanique, Pavillon Adrien-Pouliot,
1065, av. de la Médecine, Québec, G1V 0A6, Québec, Canada
achille-benjamin.laurent.1@ulaval.ca

² Université du Québec à Chicoutimi, Chaire en éco-conseil,
555, boul. de l'Université, Saguenay, G7H 2B1, Québec, Canada

Résumé - Les entreprises manufacturières doivent aujourd'hui répondre à de nouveaux impératifs environnementaux. À cet égard, elles cherchent à mieux définir l'impact de l'ensemble de leurs activités et lorsque cela est possible, à mettre en valeur leur performance environnementale. Dans certains secteurs, où la compétition est particulièrement vive, la capacité de présenter une offre compétitive à plus faible impact environnemental peut permettre à l'entreprise d'augmenter considérablement ses parts de marchés. C'est dans cet esprit que ce travail vise, d'une part, à étudier le cas d'un producteur de bois lamellé-collé, à quantifier son empreinte environnementale en réalisant une analyse de cycle de vie et à identifier des pistes d'amélioration possibles de la chaîne de valeur de l'entreprise sur la base de ses impacts mesurés. Les résultats mettent en lumière les enjeux soulevés par les analyses de cycle de vie issues de données primaires spécifiques au contexte québécois par comparaison avec celles européennes et américaines. Dans le cas du produit du bois à l'étude, les émissions de gaz à effet de serre sont de l'ordre de la moitié de celles estimées dans les bases de données disponibles.

Abstract - The manufacturing companies have nowadays to deal with new environmental imperatives. In this respect, they try to better define the impact of all activities and when possible, to emphasize their environmental performance. In certain sectors, where the competition is particularly strong, the ability to offer a competitive value proposition with low environmental impact can allow the company to increase considerably its market shares. The aim of this study is to quantify the environmental footprint by realizing a life cycle assessment and identify value chain improvements on the basis of the measured environmental impacts for a glued laminated timber producer. The results bring to light the stakes raised by a life cycle assessment from primary data in the context of the province of Québec in comparison to European and American contexts. In this case study, greenhouse gas emissions are of the order of half of those estimated in the available databases.

Mots clés – Analyse de cycle de vie; produit du bois; chaîne de valeur; régionalisation.

Keywords – Life cycle assessment; harvesting wood products; value chain; regionalization

1 INTRODUCTION

Les entreprises manufacturières doivent aujourd'hui répondre à de nouveaux impératifs environnementaux. À cet égard, elles cherchent à mieux définir l'impact de l'ensemble de leurs activités et lorsque possible, à mettre en valeur leur performance environnementale. Dans certains secteurs, où la compétition est particulièrement vive, la capacité de présenter une offre compétitive à plus faible impact peut permettre à l'entreprise d'augmenter considérablement ses parts de marchés. C'est dans cet esprit que ce projet de recherche vise, d'une part, à étudier le cas d'un producteur de poutres en bois lamellé-collé, à définir ses impacts environnementaux en réalisant une analyse de cycle de vie

attributionnelle et à identifier des pistes d'amélioration de la chaîne de valeur de l'entreprise sur la base des impacts environnementaux calculés.

Lors de la réalisation de l'analyse des résultats d'inventaire de cycle de vie, une étape cruciale consiste à identifier les éléments ayant un impact significatif sur l'environnement. Au cours de l'interprétation des résultats de l'analyse de cycle de vie (ACV), portant sur la récolte et transformation d'un mètre cube de bois lamellé-collé à partir de données issues directement des Chantiers Chibougamau Ltée (Chibougamau, Qc, Canada), plusieurs éléments ont émergé. En effet, le contexte québécois présente quelques particularités affectant les résultats d'inventaires, tout

particulièrement le cocktail énergétique. La présente contribution a pour objectif de mettre en exergue les points chauds attribuables à la régionalisation de cette ACV.

1.1 Le bois et le carbone

Le bois est un réservoir naturel de carbone dont chaque atome de carbone provient d'une molécule de dioxyde de carbone atmosphérique grâce à la photosynthèse. Si la matière ligneuse est récoltée, le carbone demeure alors séquestré dans les produits en bois tout au long de leur durée de vie utile [Karjalainen *et al.*, 1999].

Le quatrième rapport du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat (GIEC) conclut qu'une gestion sylvicole durable permettrait d'augmenter les stocks de carbone forestier à long terme et qu'un apport accru de matières ligneuses renouvelables permettrait d'intensifier la lutte contre les changements climatiques [Nabuurs *et al.*, 2007]. Même si les incertitudes sont encore nombreuses, la capacité des écosystèmes forestiers à fournir des produits ligneux à longue durée de vie pourrait jouer un rôle de réservoir de carbone hors forêt, en supplément des réservoirs se constituant en forêt [Nabuurs et Sikkema, 2001; Nabuurs *et al.*, 2007; Hennigar *et al.*, 2008; Ter-Mikaelian *et al.*, 2008].

Il a été démontré que l'utilisation du bois dans le secteur de la construction est pertinente dans une stratégie de séquestration de carbone [Koch, 1992; Buchanan et Honey, 1994; Schlamadinger et Marland, 1999]. De nombreuses recherches rendent compte de la pertinence d'utiliser la matière lignocellulosique comme substitut aux produits à haute intensité carbonique tels que les matériaux de construction en acier ou en béton ou encore les combustibles fossiles [Niles et Schwarze, 2001; Eriksson *et al.*, 2007; Valsta *et al.*, 2008]. L'une des initiatives prometteuses consiste donc à encourager la construction en bois plutôt qu'en acier ou en béton, qui sont des matériaux énergivores et émetteurs nets de gaz à effet de serre [Puettmann Wilson, 2005b; Gustavsson *et al.*, 2006].

Le bois est une source énergétique renouvelable dont la combustion est considérée comme neutre en émissions de CO₂ [IEA, 2002]. Par conséquent, la substitution d'un combustible fossile par de la biomasse représente une émission nette de gaz à effet de serre évitée [Baral et Guha, 2004]. La production énergétique à partir de biomasse forestière est avantageuse pour l'environnement, à condition que cette biomasse soit issue d'un aménagement forestier durable et que sa combustion soit complète. De plus, ces substitutions présentent l'avantage de favoriser des réductions d'émissions permanentes et cumulatives alors que la simple séquestration biologique (en forêt) n'est que temporaire et limitée dans le temps [Schlamadinger et Marland, 1999; Kirschbaum, 2006].

L'industrie du bois offre un panier de produits particulièrement diversifié. Les progrès dans le domaine des

technologies de transformation permettent d'accroître cette diversification et contribuent à l'augmentation de la valeur de cette ressource. Cette étude se concentre uniquement sur deux produits issus de la matière ligneuse reconnue comme ayant la plus importante capacité de séquestration de carbone (les matériaux de construction) et pour leur potentiel de substitution (les combustibles) [IPCC, 2003].

1.2 Problématique

Des bases de données, telle que *ecoinvent* (ecoinvent Center, St-Gallen, Switzerland), permettent d'estimer, à partir de moyennes, la quantité de carbone émis pour la production de différents matériaux, dont ceux en bois. Une revue de littérature présente les résultats des études abordant le sujet à travers le monde [Sathre et O'Connor, 2008]. Il est ainsi possible d'estimer l'ensemble des gains carboniques attribuables au remplacement de matériaux de construction à haute intensité carbonique, par exemple.

Les modèles généraux présentent l'avantage d'obtenir rapidement des estimations quantitatives du carbone séquestré par l'utilisation de produits du bois. En revanche, ces modèles ne peuvent pas rendre compte des particularités régionales telles que celles de la forêt boréale. En effet, la forêt boréale est un écosystème dominé par l'épinette noire (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.), un conifère résistant aux conditions hivernales dont les tiges ont un petit diamètre et un taux de croissance particulièrement faible. Cela a des conséquences sur les pratiques sylvicoles ainsi que sur l'ensemble des étapes de transformation. Ces caractéristiques diffèrent de la réalité de régions forestières situées plus au sud et qui ont servi à alimenter les bases de données généralement utilisées [Puettmann et Wilson, 2005a].

De plus, l'approvisionnement énergétique du Québec n'est pas représentatif des autres régions d'Amérique du Nord ou d'Europe, puisque la principale source de production d'électricité est hydraulique. L'inventaire canadien des gaz à effet de serre 2008 évalue à 2 grammes équivalent de CO₂ par kilowattheure la fourniture électrique du Québec en 2008 [Environment Canada Greenhouse Gas Division, 2009]. Cette spécificité régionale influe potentiellement de façon significative les bilans carbone des produits issus du Québec, dont ceux du bois [Wells *et al.*, In press].

Cette recherche s'inscrit dans une tendance, relativement récente dans le domaine de l'ACV, qui vise à prendre en considération ces particularités au sein de travaux de recherche qui opèrent à une échelle régionale [Grahm *et al.*, 2009].

1.2.1 Les matériaux de construction

Les procédés de fabrication de la plupart des matériaux de construction sont énergivores. La production de béton, par exemple, représente 2 % de la consommation énergétique mondiale [Worrell *et al.*, 2001]. De plus, les combustibles utilisés sont principalement d'origine fossile. Si bien que les émissions de GES du secteur du ciment représentent 5 % du total des émissions mondiales [Levine *et al.*, 2007] faisant

des producteurs de béton, les plus importants émetteurs industriels. L'industrie de l'acier n'est pas en reste avec des émissions de GES de l'ordre de 3 à 4 % des émissions mondiales, la production d'une tonne d'acier émettant en moyenne 1,9 tonne de CO₂ [World Steel Association, 2010].

Au Québec, un rapport gouvernemental indique que moins de 5 % des bâtiments non résidentiels soient fabriqués en bois dans l'ensemble de la province, correspondant à 96 millions de pieds-planche (ce qui équivaut à environ 865 000 m³). Ce taux pourrait atteindre entre 50 et 60 % tout en respectant les exigences actuelles du Code du bâtiment. Dans ce même rapport, il est estimé qu'une réduction de 340 k tonnes de GES annuelles serait possible en triplant la consommation de bois dans les structures des édifices publics, les constructions non résidentielles et les habitations multifamiliales [Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), 2008].

1.2.2 Les biocombustibles

En 2007, 21 millions de tonnes de pétrole et 6,1 millions de tonnes équivalent pétrole (tep) de gaz naturel ont été consommées au Québec contre seulement 3,7 millions de tep de biomasse [Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 2009]. Cette consommation de combustibles fossiles, en plus d'émettre de grandes quantités de GES, joue un rôle important dans la balance commerciale de la province puisque le Québec ne produit à peu près pas d'hydrocarbures.

Les gouvernements du Québec et du Canada ont mis en place des cibles visant à réduire les émissions de GES dues à la consommation de combustibles fossiles, principalement dans le secteur du transport. Il est question de réduire de 20 % sous le niveau de 1990 les émissions québécoises sous le niveau de 1990 et de 17 % sous le niveau de 2005 les émissions de l'ensemble du Canada [Environnement Canada, 2010; Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs du Québec, 2009]. La réduction des émissions pour la production thermique dans le secteur industriel fait également l'objet de programmes de subvention, tel celui proposé par l'Agence d'Efficacité Énergétique du Québec, intitulé Programme de réduction de la consommation de mazout lourde [AEE, 2008].

2 CHOIX MÉTHODOLOGIQUES

2.1 L'analyse de cycle de vie

Une analyse de cycle de vie, de type attributionnelle, est une étude quantitative qui prend en considération l'ensemble des impacts sur l'environnement pour chacune des étapes du cycle de vie d'un produit ou d'un service. Cette méthodologie de recherche initiée dans années 1980 fait aujourd'hui l'objet d'une normalisation internationale [ISO, 2006a, 2006b]. Une analyse de cycle de vie, selon la série des normes ISO 14040, se résume en quatre étapes itératives qui se présentent sous la forme suivante :

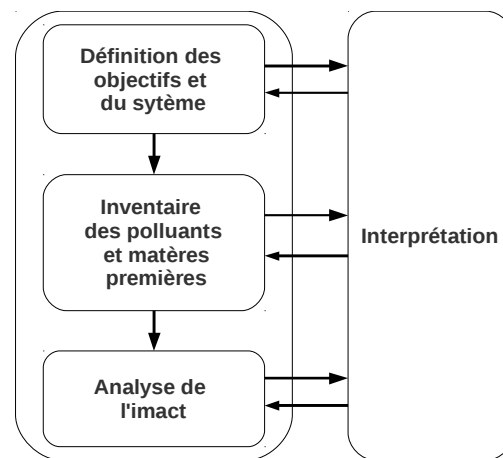


Figure 1. Étapes du cycle de vie (extrait de Jolliet, 2005)

L'étape de définition des objectifs et du système a pour but de circonscrire la ou les problématiques envisagées, le type d'applications ainsi que le public ciblé. Le système ou champ d'étude décrit les choix relatifs au modèle tels que l'unité fonctionnelle, les frontières du système et la méthode de caractérisation des impacts [Jolliet, 2005]. Dans le cadre de cette étude, l'unité fonctionnelle choisie sera le mètre cube de bois lamellé-collé. Les frontières du système définies du « berceau à la barrière » (*cradle-to-gate*) prennent en considération tous les processus depuis la récolte en forêt jusqu'à la sortie de l'usine de transformation (figure 2).

La méthode de l'ACV est la plus couramment utilisée pour déterminer l'ensemble des impacts environnementaux de l'utilisation des produits du bois, sachant que cette méthodologie permet de comparer les résultats obtenus avec ceux des matériaux concurrents [Kunniger et Richter, 1995; Adalberth, 2000; Sartori et Hestnes, 2007; Sathre et O'Connor, 2008].

Comme l'indiquent Erlandsson et al. [1992] dans leur modèle d'ACV comparant des matériaux de construction, le cycle de vie d'un produit en bois est structuré en cinq phases :

1. extraction de matériel brut;
2. traitement;
3. opération et service;
4. destruction (*démolition*);
5. réutilisation (*fin de vie*).

2.1.1 Frontière du système à l'étude

Le modèle de la figure 2 a été adapté à la réalité des poutres en bois lamellé-collé à partir des informations obtenues auprès du partenaire industriel de l'étude. Le schéma reprend les neuf phases identifiées dans ce cas.

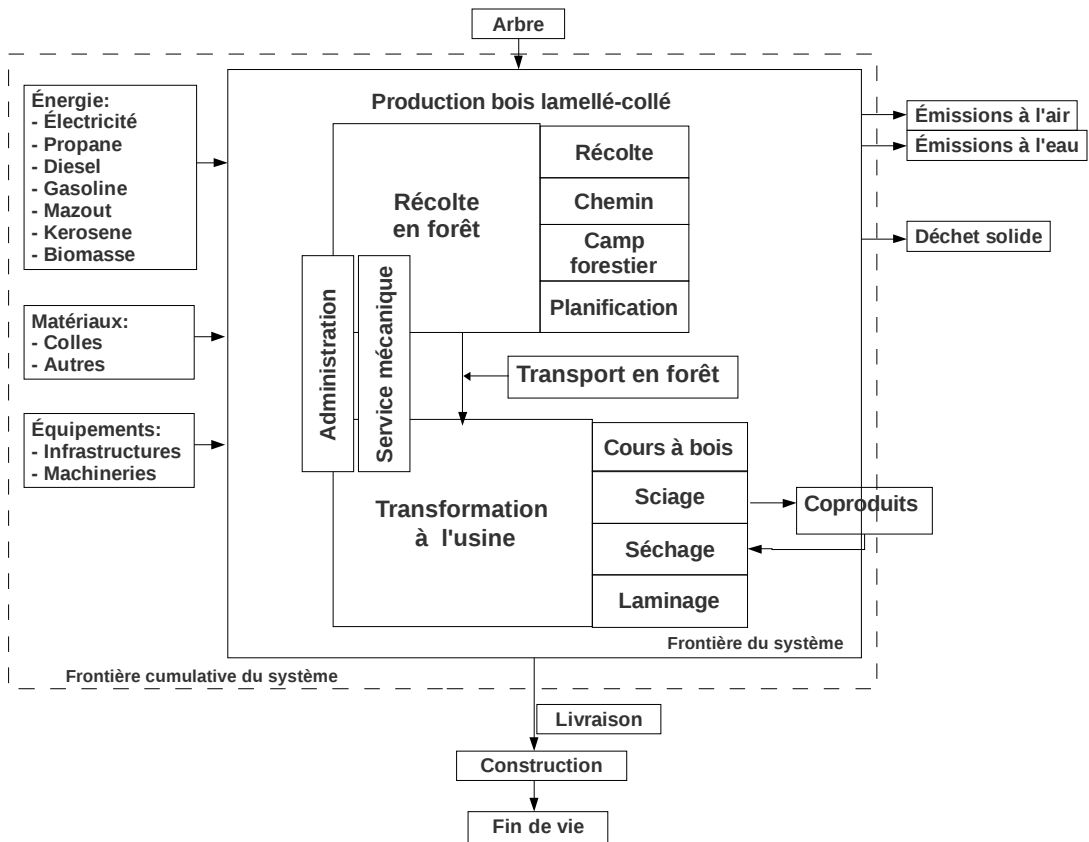


Figure 2. Schéma représentant les phases du cycle de vie de transformation d'une poutre en lamellé-collé

Récolte en forêt

La phase de récolte comporte plusieurs sous-étapes qui peuvent varier en fonction des pratiques sylvicoles. Dans cette étude, la récolte se fait par arbre entier. Ce mode de récolte se décline en différentes phases : l'abattage, le débardage, l'ébranchage et l'empilement en andains sur le bord du chemin [LeBel et al. 2009]. Il fut cependant impossible de documenter séparément ces sous-étapes en fonction des informations transmises par le département de gestion forestière du producteur de bois lamellé-collé. Toutes les données sont donc agrégées dans l'étape de récolte dans le présent inventaire. Avant de procéder à la récolte de matière première, des opérations de planification forestière sont indispensables. L'accès aux parterres de coupe n'est possible qu'après la construction de chemins forestiers. L'inventaire inclut également l'entretien de ces chemins. De plus, les parterres de coupe sont souvent très éloignés des lieux de résidence des ouvriers sylvicoles. Des camps forestiers sont donc érigés afin d'accueillir ces travailleurs. Les deux sous-étapes, soient l'administration et le service mécanique, sont situées à l'interface entre la récolte en forêt et la transformation à l'usine. L'ensemble des entrants de l'administration du producteur des poutres en lamellé-collé est inclus. Les impacts ont été répartis sur la totalité du cycle de production. La même approche s'applique au service mécanique dont les activités se répartissent entre le terrain et l'usine. En effet, un service de maintenance mécanique en

forêt est indispensable pour réparer les machineries forestières dans des délais raisonnables.

Transport de bois rond

Les camions employés pour le transport de bois rond ont une capacité de chargement hors norme, car ils n'ont pas à utiliser le réseau routier. Ce qui permet de réduire le nombre de voyages. Afin de rendre plus réaliste le modèle, les camions disponibles dans la base de données ecoinvent [Hedemann et König, 2007] ont été adaptés, en modifiant les masses et la consommation. De plus, les impacts liés à l'utilisation des infrastructures routières ont été retirés.

Transformation aux chantiers

Après un premier entreposage dans la cour de l'usine, les grumes sont traitées dans l'usine de sciage. Tout comme la récolte, les différentes sous-étapes qui composent le processus de sciage ont été agrégées, par manque d'information complémentaire. De façon générale, les billots sont tout d'abord écorcés avant d'être débités en fonction du diamètre du tronc, puis triés selon les défauts apparents. L'ensemble du bois d'œuvre produit à l'usine et vendu a été considéré comme coproduit. Les écorces générées ont longtemps été considérées comme un résidu. Cependant, au cours des dernières années de l'inventaire, elles ont acquis une certaine valeur, car elles ont été utilisées comme combustible. Chacun des résidus de sciage (écorces,

copeaux, sciures et planures) ont ainsi été considérés comme coproduits, car ils peuvent généralement avoir une valeur commerciale ou du moins être valorisables. La troisième étape de la transformation du bois est le séchage. Les chantiers de l'étude utilisent les planures générées à l'usine de sciage afin d'alimenter les séchoirs. Une fois le bois acheminé dans l'usine de seconde transformation, il est jointé dans le sens de la longueur avant d'être coupé à la longueur désirée. Vient ensuite la sous-étape de collage. Dans le cas de l'usine à l'étude, les colles utilisées sont à base d'isocyanate évitant ainsi l'usage de formaldéhyde. Le séchage est réalisé par un procédé à micro-ondes. Enfin le bois lamellé-collé est usiné afin de faciliter l'assemblage sur le chantier de construction.

2.1.2 Inventaire de cycle de vie

L'inventaire de cycle de vie (ICV) compile de façon quantitative les matières premières depuis leur extraction ainsi que les émissions polluantes dans l'air, l'eau et le sol [Jolliet et al., 2005]. La particularité de cette ACV sur le bois lamellé-collé est que l'inventaire est réalisé essentiellement à partir de données primaires, issues des informations transmises par le producteur. De plus, les données collectées s'étalaient sur une période de cinq années ce qui augmente leur robustesse et la représentativité de l'étude. En effet, les conditions de récolte, les essences composant l'approvisionnement ou les aides financières sont variables d'une année à l'autre et influencent les pratiques sylvicoles ainsi que les performances des étapes de transformations. La moyenne des résultats des cinq années a donc été utilisée afin d'atténuer ces fluctuations. Les données manquantes, incomplètes ou difficilement accessibles ont été remplacées par des données secondaires disponibles dans la littérature ou dans les bases de données, tel que le recommande les guides de meilleures pratiques [ISO, 2006a, 2006b]. La quantification de l'impact de différents processus, tels que les infrastructures et les machineries, est issue de la base de données *ecoinvent*. Ces données ont été adaptées au contexte québécois, afin de rendre la modélisation le plus réaliste possible.

2.1.3 L'évaluation de l'impact du cycle de vie

L'évaluation de l'impact du cycle de vie (ÉICV) estime l'impact environnemental de l'extraction des matières premières et des émissions polluantes [Jolliet et al., 2005].

Pour ce faire, quatre sous-étapes sont proposées : la classification, la caractérisation, la normalisation et la pondération. La classification permet de déterminer dans quelles catégories d'impact s'inscrivent les émissions et l'extraction des matières premières. L'étape de caractérisation évalue la contribution des impacts dans chacune des catégories. En fonction du niveau d'analyse désiré, il est possible d'ajouter une étape de catégorisation par dommage à la suite de celle sur les impacts. Quant à la normalisation, elle permet de réaliser une évaluation à partir d'un système de référence alors que la pondération vise une évaluation en fonction d'un choix de valeur. Comme la plupart des ACV, l'évaluation des impacts potentiels a été calculée avec le logiciel *SimaPro*, développé par *Pré Consultants* (Pré Consultants bv, Amersfoort, The Netherlands), avec la méthode la plus couramment employée, *Impact 2002+*.

2.1.4 Interprétation

L'étape d'interprétation présente l'ensemble des résultats de façon cohérente en fonction des objectifs de l'étude, mais également de façon objective par rapport aux limites et aux hypothèses retenues. Afin de respecter la norme ISO, il faut clairement identifier les points significatifs, la conclusion et les recommandations. Cette étape a été complétée par des calculs d'incertitude et une analyse de sensibilité afin d'identifier les paramètres les plus influents. Puisque les pratiques courantes s'appliquaient au présent projet de recherche, les calculs d'incertitudes ont été réalisés par une analyse statistique de type Monte-Carlo avec 1000 itérations [Jolliet et al., 2005].

3 RÉSULTATS

La production des colles est responsable d'environ 30 % de l'impact environnemental, et ce, en dépit des efforts consentis par le producteur notamment en ce qui a trait à l'utilisation d'un adhésif à base d'isocyanate en lieu et place des formaldéhydes. Le second plus important contributeur est commun à l'ensemble des phases du cycle de vie, il s'agit de l'utilisation de combustibles fossiles, comme le montre la figure 3. Cette figure présente les contributions par « couche », la première par une association aux activités de la chaîne de valeur, la deuxième par une association aux ressources de la chaîne de valeur.

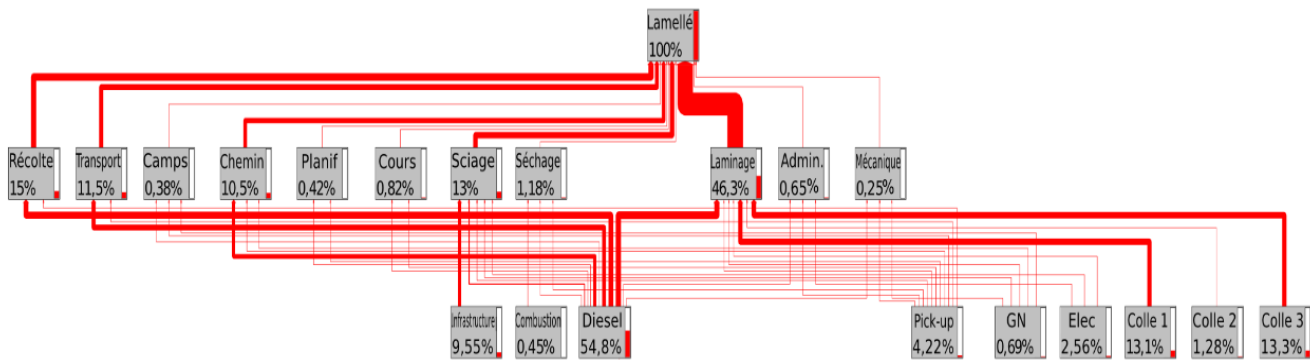


Figure 3. Réseau des contributions de la transformation de bois lamellé-collé. Il est intéressant de constater que les colles et l'énergie fossile sont les ressources ayant les plus fortes contributions. Elles deviennent donc des cibles pour l'amélioration de la performance environnementale

La figure 4 compare les résultats obtenus à d'autres ACV consacrées au bois lamellé-collé [Puettmann et Wilson, 2005a ; Weidema et Hischier, 2010]. La prise en compte de données primaires donne des résultats suffisamment différents de l'utilisation de données génériques pour montrer qu'il est beaucoup plus prudent de traiter les ACV sur une base régionalisée. L'effort de la régionalisation dans cette étude peut avoir un impact positif sur la performance environnementale comme éléments de compétitivité pour l'entreprise étudiée. Elle permet un meilleur positionnement par rapport aux matériaux substitués (ex. acier, béton), mais

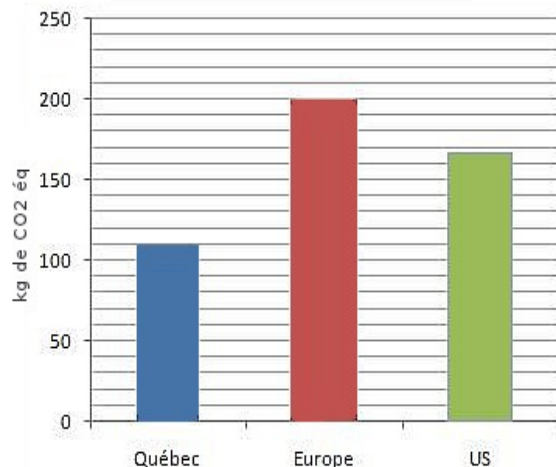


Figure 4. Comparaison des émissions de GES des trois ACV portant sur la production de bois lamellé-collé (la production de bois lamellé-collé en Europe est issue deecoinvent et celle aux États-Unis est tirée de l'USLCI (Puettmann and Wilson, 2005a; Weidema and Hischier, 2010)).

aussi par rapport aux producteurs européens et des autres juridictions nord-américaines.

Trois explications permettent de comprendre cette différence. La plus importante en terme de réduction des

impacts environnementaux, et particulièrement des émissions de GES, est le recours à l'hydroélectricité, qui au Québec présente une très faible intensité carbonique dans toutes les opérations de seconde et troisième transformation. La seconde explication, un peu moins courante au Québec, est que le producteur de bois lamellé-collé valorise les planures de l'usine de sciage afin d'alimenter ses séchoirs. L'utilisation à des fins thermiques de matière renouvelable, en lieu et place de combustibles fossiles, permet de réduire les émissions de GES ainsi que d'autres polluants atmosphériques. La dernière raison est un procédé de récolte tout à fait particulier à ce producteur. En effet, lors de l'étape d'ébranchage, les arbres ne sont pas éêtés à partir de la partie normalement non marchande de la tige. Ainsi, les tiges presque complètes sont acheminées jusqu'à l'usine réduisant de l'ordre de 5 % les impacts sur l'ensemble de la production de bois lamellé-collé. Cette contribution est représentée par la partie bleu clair dans le haut de la barre des émissions de GES du bois lamellé-collé produit au Québec de la figure 4.

Discussion

Il apparaît pertinent de mettre l'accent sur deux phases particulières qui ne font pas partie intégrante du système étudié. Cela permettra d'avoir une vision plus globale des impacts environnementaux, en élargissant les frontières du système.

4.1 Impact des livraisons

Puisque les données de livraison du bois lamellé-collé depuis la scierie jusqu'aux chantiers de construction ont également été collectées, il a été possible de réaliser une analyse de cette phase de cycle de vie. En moyenne, le bois lamellé-collé est transporté sur une distance de 1 000 km par camion à travers toute l'Amérique du Nord. Même en prenant pour hypothèse que les transporteurs ne font pas de retour totalement à vide, en attribuant seulement la moitié du retour à la phase de livraison, les émissions de GES de cette étape sont une 1,5 fois supérieure à l'ensemble du cycle de transformation. Cette constatation s'avère plus

qu'intéressante puisque les émissions « à la source » sont largement surpassées par le transport. Une bonne partie du potentiel de réduction se situe donc dans cette phase. Par conséquent, la proximité entre la forêt, l'usine de transformation et le lieu de montage est un élément de premier ordre. Des réductions significatives pourraient aussi être envisageables en favorisant le transport ferroviaire pour la livraison des produits puisque le facteur d'émission par tonne-kilomètre est nettement plus faible pour ce dernier [Frey et Kuo, 2006].

4.2 La fin de vie utile

La valorisation des ressources forestières en bois lamellé-collé est infime au Québec et une minorité est utilisée dans le marché intérieur [Triboulot, 2011]. Les quantités de bois dans les résidus de démolition non résidentiel sont donc faibles, ce qui rend la valorisation plus complexe en fin de vie. L'enfouissement est l'avenue la plus répandue à travers le Québec, avec un taux de récupération de 29 % sur l'ensemble des matériaux de construction [Vachon et al., 2009]. Reste qu'il est reconnu que l'enfouissement de matière ligneuse peut être considéré de la séquestration à long terme, la décomposition étant lente [Chen et al., 2008]. Tout comme l'ensemble des résidus de sciage, considérés dans cette étude comme des coproduits, les résidus de déconstruction pourraient être utilisés à des fins énergétiques. Les propositions gouvernementales laissent présager que la cogénération est la voie de valorisation énergétique privilégiée au Québec pour la biomasse résiduelle, mais le lamellé-collé étant considéré par les réglementations européennes comme du bois traité, si de telles lois étaient en vigueur au Québec cette biomasse devrait être incinérée.

Malheureusement, il faut noter que dans le cas où ce bois serait utilisé pour la cogénération, une très faible partie du potentiel thermique des centrales en place est consommée, par manque de preneur à des distances raisonnables. Cela réduit cette cogénération à une simple production d'électricité à partir de turbine à vapeur avec des efficacités médiocres [van den Broek et al., 1996]. Si bien que l'empreinte carbonique de cette production d'électricité est plus élevée que le scénario de référence de source hydraulique, et cela même en considérant la combustion de biomasse carboneutre. Il semble donc que dans le contexte québécois, la valorisation énergétique ne soit pas déterminante pour réduire l'empreinte carbonique de la fin de vie comme cela peut être le cas ailleurs et comme l'a fait remarquer Sedjo [2002] dans un contexte plus général. D'autres possibilités de revalorisation devraient donc être explorées, par exemple le recyclage en d'autres matériaux de construction, comme les panneaux particules, afin de maximiser la durée du carbone biogénique séquestré [Sathre et Gustavsson, 2006]. En toute fin de vie, la substitution de combustible fossile reste la solution offrant les gains carboniques les plus intéressants [Gustavsson et Sathre, 2006].

Cette analyse de cycle de vie a permis de mettre en évidence certaines particularités sur l'aspect environnemental de l'industrie forestière au Québec. Notamment, l'intérêt qu'apporte la production d'électricité à partir de source hydraulique lors de la transformation des produits au Québec. Cette conclusion montre la nécessité de déterminer l'impact environnemental de l'ensemble des produits du bois confectionnés au Québec. L'industrie forestière est un employeur important dans la province et cela est particulièrement vrai dans certaines régions à forte vocation forestière. Des analyses de cycle de vie sociales et économiques, en complément aux ACV environnementales, permettraient d'avoir un portrait plus complet des impacts de l'utilisation de la ressource forestière, en touchant les trois enjeux du développement durable.

4 REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les Chantiers Chibougamau Ltée sans qui cette analyse n'aurait pas été possible, en particulier Frédéric Verreault, Pascal Ouellet et Daniel Turcotte. Cette étude fait partie d'un programme Carbone boréal qui est financé par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG)-Rio Tinto Alcan dont les titulaires sont J-F Boucher et S. D'Amours. Nos remerciements au CIRAIG pour leurs précieuses aides.

5 RÉFÉRENCES

- Adalberth, K., (2000) Energy Use and Environmental Impact of New Residential Buildings. Department of Building Physics, Lund University.
- Agence d'Efficacité Énergétique (AEE) (2008) Dépliant du programme de réduction de consommation de mazout lourd.
- Baral, A., Guha, G.S., (2004) Trees for carbon sequestration or fossil fuel substitution: the issue of cost vs. carbon benefit. *Biomass and Bioenergy*, pp. 41-55.
- van den Broek, R., Faaij, A. & van Wijk, (1996) A. Biomass combustion for power generation. *Biomass and Bioenergy* 11, pp. 271-281.
- Buchanan, A.H., Honey, B.G., (1994) Energy and carbon dioxide implications of building construction. *Energy and Buildings*, pp. 205-217.
- Canadian Wood Council (CWC) (2004) « Série des bâtiments durables ».
- Chen, J., Colombo, S.J., Ter-Mikaelian, M.T., Heath, L.S., (2008) Future carbon storage in harvested wood products from Ontario's Crown forests. *Canadian Journal of Forest Research*, pp. 1947-1958.
- Environment Canada Greenhouse Gas Division, (2009). National Inventory Report 1990–2007: Greenhouse Gas Sources and Sinks in Canada (National Inventory No. En 81-4/2007E-PDF). Env. Canada.
- Environnement Canada (2010) Le Canada annonce la cible de réduction des émissions visée au titre de l'accord de Copenhague.
- Eriksson, E., Gillespie, A.R., Gustavsson, L., Langvall, O., Olsson, M., Sathre, R., Stendahl, J., (2007) Integrated

- carbon analysis of forest management practices and wood substitution. *Canadian Journal of Forest Research*, pp. 671-681.
- Erlandsson M., Odeen K., Edlund M., (1992) Environmental consequences of various materials in utility poles - A life cycle analysis. *The international research group on wood preservation, working group III*.
- Frey, H.C., Kuo, P.-Y., (2006). Assessment of potential reduction in greenhouse gas (GHG) emissions in freight transportation. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- Grahn, M., Azar, C., Lindgren, K., (2009) The role of biofuels for transportation in CO2 emission reduction scenarios with global versus regional carbon caps. *Biomass and Bioenergy*, pp. 360-371.
- Gustavsson, L., Pingoud, K., Sathre, R., (2006) Carbon Dioxide Balance of Wood Substitution: Comparing Concrete- and Wood-Framed Buildings. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, pp. 667-691.
- Gustavsson, L., Sathre, R., (2006) Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. *Building and Environment*, pp. 940-951.
- Hedemann, J., König, U., (2007). Technical Documentation of the ecoinvent Database.
- Hennigar, C.R., MacLean, D.A., Amos-Binks, L.J., (2008). A novel approach to optimize management strategies for carbon stored in both forests and wood products. *Forest, Ecology and Management* 256, pp. 786-797.
- IEA, T3 (2002) Greenhouse Gas Balances of Biomass and Bioenergy Systems.
- IPCC (2003) Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry.
- ISO, (2006a). ISO 14044:2006 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigence et lignes directrices (Norme). International Standards Organization.
- ISO, (2006b). ISO 14040:2006 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre (Norme). International Standards Organization.
- Jolliet, O., Saadé, M., Crettaz, P., (2005). Analyse du cycle de vie, Comprendre et réaliser un écobilan, collection gérer l'environnement. ed. presse polytechniques et universitaire romandes, Suisse.
- Karjalainen, T., Pussinen, A., Kellomäki, S., Mäkipää, R., (1999) Scenarios for the carbon balance of Finnish forests and wood products. *Environmental Science & Policy*,
- Kirschbaum, M.U.F., (2006). Temporary carbon sequestration cannot prevent climate change. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11, pp. 1151-1164.
- Klein, R., Hug, S., Denton, F., Downing, T., Richels, R., Robinson, J., Toth, F. (2007) Inter-relationships between adaptation and mitigation. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 745-777.
- Koch, P., (1992) Wood versus non-wood materials in residential construction : some energy-related global implications. *Forest products journal*, pp. 31-42.
- Kunniger, T., Richter, K., (1995) Life Cycle Analysis of Utility Poles, A Swiss Case Study. *Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research*.
- LeBel, L., Cormier, D., Dubeau, D., Dunnigan, J., Favreau, J., Gingras, J.-F., Hamel, M., Meek, P., Michaelsen, J., Sarthou, C., Thiffault, N., 2009. Opérations forestières et transport des bois, in: *Ordre Des Ingénieurs Forestiers Du Québec, Manuel De Foresterie, 2e éd. Ouvrage Collectif*. 1245-1304.
- Levine, M., Åøerge-Vorsatz, D., Blok, K., Geng, L., Harvey, D., Lang, S., Levermore, G., Mongameli Mehlwana, A., Mirasgedis, S., Novikova, A., Rilling, J., Yoshino, H., (2007). Residential and commercial buildings. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs du Québec (2009) Cible de réduction des émissions de GES.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) (2008). Stratégie d'utilisation du bois dans la construction au Québec. *Direction du développement de l'industrie des produits forestiers*.
- Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF) (2009) Consommation totale d'énergie au Québec.
- Nabuurs, G.J., Sikkema, R., (2001). International Trade in Wood Products: Its Role in the Land Use Change and Forestry Carbon Cycle. *Climatic Change* 49, pp. 377-395.
- Nabuurs, G.J., Masera, O., Andrasko, K., Benitez-Ponce, P., Boer, R., Dutschke, M., Elsiddig, E., Ford-Robertson, J., Frumhoff, P., Karjalainen, T., Krankina, O., Kurz, W.A., Matsumoto, M., Oyhantcabal, W., Ravindranath, N.H., Sanz Sanchez, M.J., Zhang, X., (2007). Forestry. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Niles, J.O., Schwarze, R., (2001) The value of careful carbon accounting in wood products. *Climatic change*, pp. 371-376.
- Puettmann, M.E., Wilson, J.B., (2005a). Gate-to-gate life-cycle inventory of glued-laminated timbers production. *Wood and Fiber Science 37 Corrim Special Issue*, pp. 99-113.

- Puettmann, M., Wilson, J., (2005b) Life-cycle analysis of wood products : Cradle-to-gate lci of residential wood building materials. *Wood and fiber science*, pp. 18-29.
- Sathre, R., Gustavsson L., (2006) Energy and carbon balances of wood cascade chains. *Resources, Conservation and Recycling*, pp. 332-355.
- Sathre, R., O'Connor, J., (2008) A Synthesis of Research on Wood Products & Greenhouse Gas Impact.
- Sartori, I., Hestnes, A., (2007) Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy and Buildings*, pp. 249-257.
- Schlamadinger, B., Marland, G., (1999) Net effect of forest harvest on CO₂ emissions to the atmosphere: a sensitivity analysis on the influence of time. *Tellus B*, pp. 314-325.
- Sedjo, R.A., (2002) Wood materials used as a means to reduce greenhouse gases (GHGs): An examination of wooden utility poles. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, pp. 191-200.
- Ter-Mikaelian, M.T., Colombo, S.J., Chen, J., (2008). Fact and fantasy about forest carbon. *The forestry chronicle* 84, pp. 166-171.
- Triboulot, P., (2011). Pour une dynamique nouvelle dans la construction bois : contribution de l'UQAC (No. 1), État des lieux et scénarios. UQAC-DEC.
- Vachon, J.L., Beaulne-Bélisle, K., Rosset, J., Gariépy, B., McGrath, K., (2009) Profil des gestion des débris de construction, rénovation et démolition (CRD) au Québec.
- Valsta, L.,Lippke, B., Perez-Garcia, J., Pingoud, K., Pohjola, J., Solberg, B., (2008) Use of Forests and Wood Products to Mitigate Climate Change. *Managing Forest Ecosystems: The Challenge of Climate Change*, pp.137-149.
- Wells, J.-R., Boucher, J.-F., Laurent, A.-B., Villeneuve, C., (In press). Carbon footprint assessment of a paper book: can planned integration of deink market pulp be detrimental to climate? *Journal of Industrial Ecology*.
- Weidema, B., Hischier, R., (2010). ecoinvent data v2.2 the 2010 version of the most comprehensive andmost popular public LCI database. Ecoinvent centre, Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- World Steel Association (2010) A global approach to CO₂ emissions reduction for the steel industry.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., Meida, L.O., (2001) Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, pp. 303-329.