CIRRELT

Centre interuniversitaire de recherche
sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport

Interuniversity Research Centre
on Enterprise Networks, Logistics and Transportation

Carbonlab : un outil d'aide à la décision basé sur l'optimisation multicritère intégrant l'analyse de cycle de vie conséquentielle appliqué à une entreprise forestière

Achille-Benjamin Laurent
Marc-André Carle
Sophie D'Amours
Robert Beauregard

Octobre 2016

CIRRELT-2016-58

Document de travail également publié par la Faculté des sciences de l'administration de l'Université Laval, sous le numéro FSA-2016-014.

Bureaux de Montréal :
Université de Montréal
Pavillon André-Aisenstadt
C.P. 6128, succursale Centre-ville
Montréal (Québec)
Canada H3C 3J7
Téléphone : 514 343-7575
Télécopie : 514 343-7121

Bureaux de Québec :
Université Laval
Pavillon Palasis-Prince
2325, de la Terrasse, bureau 2642
Québec (Québec)
Canada G1V 0A6
Téléphone : 418 656-2073
Télécopie : 418 656-2624

www.cirrelt.ca

Université Laval · McGill · Université Concordia University · ÉTS · UQÀM Université du Québec à Montréal · HEC Montréal · Polytechnique Montréal · Université de Montréal

Carbonlab : un outil d'aide à la décision basé sur l'optimisation multicritère intégrant l'analyse de cycle de vie conséquentielle appliqué à une entreprise forestière

Achille-Benjamin Laurent[1,2,*], Marc-André Carle[1,3], Sophie D'Amours[1,2], Robert Beauregard[4]

[1] Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT)

[2] Département de génie mécanique, Pavillon Adrien-Pouliot, 1065, avenue de la Médecine, local 3348, Université Laval, Québec (Québec), G1V 0A6

[3] Département d'opérations et systèmes de décision, Pavillon Palasis-Prince, 2325, rue de la Terrasse, local 2527, Université Laval, Québec, Canada G1V 0A6

[4] Département des sciences du bois et de la forêt, Pavillon Gene-H.-Kruger, 2405, rue de la Terrasse, local 2367, Université Laval, Québec, Canada G1V 0A6

Résumé. La recherche opérationnelle a traditionnellement pour objectif de minimiser les coûts ou de maximiser les profits. Cet article présente un modèle d'aide à la décision basé sur l'optimisation multicritère qui intègre l'analyse de cycle de vie conséquentielle. Les options considérées sont d'ordre stratégique, car il est question des flux de matière entre les différents produits, les investissements permettant l'intégration de nouvelles technologies et leurs interactions. Grâce à une approche a priori, toutes les solutions ont été explorées, en faisant varier les pondérations de chacun des critères. Il est ainsi possible de générer des fronts de Pareto qui représentent les compromis entre les critères. Ce qui permet à l'industriel de faire une sélection des solutions les plus pertinentes. Le modèle est développé à partir de données spécifiques à une entreprise forestière, couvrant les activités de récolte en forêt et de transformation des produits du bois. Les résultats proposés sont donc propres au contexte de l'entreprise. Malgré cela, dans la partie discussion est présentée une courbe d'abattement des coûts marginaux. Il s'agit d'une représentation qui montre explicitement le coût de la réduction d'émissions de gaz à effet de serre par l'implantation d'une nouvelle technologie. Ce qui pourrait aider la gouvernance publique à fixer le prix de la tonne de carbone.

Mots-clés: Optimisation multicritère, réseau logistique, analyse de cycle de vie conséquentielle, industrie forestière**.**

Remerciements. Nous tenons à remercier l'équipe du FORAC pour le soutien financier et administratif. De plus, nous tenons à souligner la participation de Mathieu Bouchard, Sébastien Lemieux et François Barriault pour leurs travaux sur l'outil de conversion vers CPLEX, Gregory Paradis pour son aide pour la programmation en Python et Philippe Marier qui a révisé le modèle mathématique. Nous remercions également le CIRAIG, plus spécifiquement Laure Patouillard, Jean-François Menard et Pascal Lesage pour le soutien dans la réalisation de l'analyse conséquentielle.

Results and views expressed in this publication are the sole responsibility of the authors and do not necessarily reflect those of CIRRELT.

Les résultats et opinions contenus dans cette publication ne reflètent pas nécessairement la position du CIRRELT et n'engagent pas sa responsabilité.

---

* Corresponding author: Achille-B.Laurent@cirrelt.ca

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec
Bibliothèque et Archives Canada, 2016

© Laurent, Carle, D'Amours, Beauregard et CIRRELT, 2016

1. Introduction

Traditionnellement, la conception des chaînes de valeur a misé sur l'apport de la recherche opérationnelle et des modèles d'optimisation. Ces modèles ont pour objectif d'aider la prise de décision en lien avec des investissements et des désinvestissements dans les chaînes de valeur. Ils ont la particularité de modéliser l'ensemble de la chaîne afin de saisir les impacts d'investissements spécifiques de la chaîne, évitant ainsi que certaines décisions engendrent des coûts importants ailleurs dans l'entreprise. Les objectifs visés sont généralement de maximiser les gains économiques ou de minimiser les coûts (Goetschalcks et Fleischmann 2008). L'intégration des performances environnementales dans les systèmes d'aide à la conception de chaînes de valeur, parallèlement aux critères économiques, est assez récente (Azevedo, Carvalho, et Cruz Machado 2011; Srivastava 2007). Ces études visaient tout d'abord la réduction des déchets, des rejets d'eaux usées ou d'intégration des éléments environnementaux dans les critères économiques, comme le calcul des bénéfices de réduction de la génération de déchets et des coûts de traitement. Cependant, ces optimisations restent centrées sur les aspects économiques et considèrent les impacts environnementaux comme des coûts ou des contraintes dites « dures ».

Le présent modèle propose d'aider les industriels à choisir les investissements maximisant profits économiques, minimisant les impacts environnementaux ou des solutions offrant un compromis entre ces deux critères. Ce modèle recourt à la méthodologie normalisée de l'analyse de cycle de vie attributionnelle (ACV-A) afin de quantifier les aspects environnementaux du portefeuille de produit spécifique à un industriel forestier, présenté dans Laurent *et al.* (2016). Une analyse de cycle de vie de coûts, inspirée de la comptabilité par activités (ACVC-ABC), permet de déterminer le coût de revient de chacun des produits (Achille-Benjamin Laurent, D'Amours, et Beauregard 2016). Puis une analyse de cycle de vie de type conséquentielle (ACV-C) est utilisée pour estimer les impacts environnementaux des effets de substitutions des matériaux compétiteurs par des produits du bois, mais également pour l'intégration de nouvelles technologies dans le réseau logistique de notre partenaire industriel, qui est présenté dans la section 4.3 de l'étude de cas. Enfin, toutes ces données permettent de réaliser un modèle multicritère qui permet d'optimiser les flux de matières, mais aussi l'analyse d'investissement technologique.

L'optimisation multicritère est le sujet de plusieurs études scientifiques dans les dernières années, mais il n'existe que peu de publications portant sur des applications réelles. Greco *et al.* (2015) expliquent cette absence par la complexité de la préférence des critères, de la résolution du modèle d'optimisation, mais également de la mise en application. Les résultats du présent cas d'application, basé sur les données primaires d'un industriel forestier, permettent d'aider dans la prise de décision de ses futurs investissements technologiques. Afin de rendre compréhensibles les solutions obtenues à l'aide du modèle, plusieurs types de graphiques sont générés, tels qu'un front de Pareto et des schémas de flux de matières. Ce qui nous permet de considérer l'ensemble de cette méthode comme un outil d'aide à la décision stratégique pour la conception d'une chaîne de valeur durable d'un industriel forestier.

À partir des 150 scénarios de solutions générées par le modèle d'optimisation multicritères, nous avons également réalisé une courbe d'abattement des coûts marginaux des réductions d'émission de carbone net possible qui est présentée dans la section discussion.

2. Revue de littérature

Les prochains paragraphes présentent les différentes méthodologies utilisées dans cette analyse et appliquées dans l'étude de cas.

2.1. L'analyse de cycle de vie attributionnelle (ACV-A)

L'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. Par définition, le cycle de vie couvre toutes les étapes du berceau à la tombe, ou plus concrètement de l'extraction des ressources jusqu'à la disposition du produit. Cette méthodologie de recherche initiée dans les années 1980 fait aujourd'hui l'objet d'une normalisation internationale (ISO, 2006). Cette méthode est la plus utilisée pour déterminer l'ensemble des impacts environnementaux lors de l'utilisation des produits du bois (Kunniger et Richter, 1995 ; Adalberth, 2000; Sartori et Hestnes, 2007; Sathre et O'Connor, 2008).

2.2. L'analyse de cycle de vie de coûts basée sur la comptabilité par activités (ACVC-ABC)

De nombreuses méthodologies d'analyse de cycle de vie de coûts ont été développées dans les dernières décennies. Des revues de littérature exhaustives permettent de dresser une liste des méthodes ainsi qu'une description succincte (Asiedu et Gu, 1998; Durairaj et al., 2002; Gluch et Baumann, 2004). Parmi elles, la comptabilité basée sur les activités « *Activity Based Costing* » (ABC) a retenu l'attention pour ses similarités avec l'ACV-A, puisqu'elle permet de fournir des indications sur la profitabilité d'un produit ou d'un portefeuille de produits, selon la description faite par Emblemsvag (2003).

2.3. L'analyse de cycle de vie conséquentielle (ACV-C)

Le développement et l'utilisation de l'ACV-C sont principalement dus au besoin de connaitre les conséquences d'une prise de décision (Weidema 1993; Ekvall 1999; Wenzel 1998; Plevin *et al*. 2014). L'identification des conséquences de la décision se fait en décrivant les liens de causalité physiques et socio-économiques impliquant le système étudié. L'ACV-C décrit comment les flux physiques peuvent changer, permettant ainsi d'anticiper les conséquences d'une prise de décision (Ekvall et Andrea 2006). Cette différence fondamentale avec l'ACV-A, qui elle a pour objectif d'attribuer à un produit des impacts environnementaux sans portée prospective, a des conséquences sur la méthodologie, principalement sur la définition des frontières. En effet, les conséquences d'un changement, même mineur, affectent d'autres systèmes que celui du produit concerné. Cela se produit généralement pour des processus multifonctionnels, du recyclage en boucle ouverte ou lors d'utilisation de ressources pour lequel il peut y avoir de la concurrence. C'est le cas de la ressource bois, puisque des produits compétiteurs ont fait leur apparition depuis le début de l'ère industrielle. Il est alors nécessaire de procéder à l'extension des frontières afin d'inclure les parties des autres systèmes affectées par la décision (Weidema 2003 ; European Commission *et al*. 2010). Conformément à la norme ISO (2006), les frontières du système devront être étendues implicitement afin d'inclure les fonctions supplémentaires, telles que la substitution énergétique ou les matériaux de construction (Petersen et Solberg 2005).

2.4. L'intégration des critères environnementaux en recherche opérationnelle

Les pressions des consommateurs et les pressions législatives sur la prise de responsabilité sociétale n'ont jamais été aussi fortes, incitant ainsi les industriels à réduire les impacts environnementaux associés à

leurs chaînes d'approvisionnement. De nombreuses recherches ont également été menées sur les différents aspects du réseau logistique. Ainsi, des études se sont penchées sur les aspects de chaînes d'approvisionnement en boucle fermée et la logistique inverse (Srivastava, 2007). D'autres se sont intéressées à un ou plusieurs aspects, tels que la gestion des inventaires, l'écoconception, la planification de la production et du recyclage, la récupération de produit ou la réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) (Srivastava, 2007; Azevedo *et al.*, 2011; Chaabane *et al.*, 2012). Cependant, ces études restent centrées sur les centres de production sans considérer le cycle de vie (Azapagic, 1999). L'analyse de cycle de vie, couramment utilisée pour quantifier les impacts potentiels sur l'environnement d'un produit ou d'un service, semble appropriée pour répondre à ce besoin de vision globale (Azapazic, 1999). La première utilisation de l'approche de cycle de vie dans le domaine de la logistique remonte à 1996 (Bloemhof-Ruwaard et al., 1996). La problématique portait sur le potentiel de réduction de l'impact environnemental par l'utilisation de papier recyclé. Toujours dans le secteur des pâtes et papier, une optimisation recourant à une ACV complète, qui suivait le « Code of Pratice » de la Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) (1994), a été publiée en 1997 (Weaver *et al.*, 1997). Il s'agissait de minimiser l'empreinte environnementale de la chaîne logistique des pâtes et papiers européens. Dès 1999, Azapagic et Clift (1999) proposèrent une méthodologie d'intégration de l'ACV dans les systèmes d'optimisation en trois étapes. La première étape consiste à réaliser une ACV, puis de formuler un problème d'optimisation multicritère et enfin choisir la solution offrant le meilleur compromis. En revanche, il a fallu attendre 2011 pour voir les premières études de cas réelles. Parmi ces études certaines utilisent des données environnementales issues d'analyse qui ne suivent pas la norme sur l'ACV, ISO 14044 (2006) (Čuček *et al*., 2011). Certaines applications recourent à une agrégation des dommages sur l'environnement pour obtenir un score unique, réduisant ainsi le modèle à du bi-critères (Bernier, 2011 ; Cerri et al., 2013, Kostin, 2013). De plus, dans la littérature la résolution est réalisée soit grâce à des heuristiques (Bernier, 2011 ; Rivallain, 2013) ou par la méthode des contraintes Ɛ (Čuček *et al*., 2011 ; Cerri *et al.,* 2013 ; Kostin, 2013).

L'industrie forestière n'échappe pas aux pressions sociales, qui portent principalement sur les préoccupations environnementales. Ceci influe sur le marché des produits du bois et le développement de nouveaux produits, comme l'utilisation de cette ressource à des fins énergétiques ou comme matériaux de construction. Le bois est une ressource renouvelable, pour autant que sa gestion soit faite de façon durable, comme c'est le cas par l'approche écosystémique mise en place par le gouvernement du Québec (MRNF 2008). De plus, grâce au phénomène de photosynthèse, le bois à la propriété de séquestrer du carbone tout au long de sa vie utile. Ce matériau a le potentiel donc d'éviter des émissions de carbone lorsqu'il est utilisé en substitution aux combustibles fossiles ou de matériaux de construction tels l'acier ou le béton (Nabuurs *et al*. 2007). Dans la littérature scientifique, la modélisation et l'optimisation du réseau logistique de l'industrie forestière ont fait l'objet de plusieurs publications (D'Amours, Rönnqvist, et Weintraub 2008; Rönnqvist 2003; Rönnqvist *et al*. 2015; Shahi et Pulkki 2013). Les réseaux sont généralement morcelés pour être optimisés. Ainsi des études optimisent distinctement la récolte, le transport ou des activités de transformations (Shahi and Pulkki, 2013). Au niveau stratégique, les publications présentent des modèles d'optimisations portant généralement sur la gestion durable des forêts et la localisation d'entrepôt (Rönnqvist *et al*., 2015). Peu de papier présente une étude de cas portant les activités de sciage, comme celle de Vila (2005), et à notre connaissance seuls Tronscoso et Garrido (2005) présente un modèle couvrant l'ensemble du réseau de l'industrie forestière. En revanche, les modèles proposant l'implantation de nouvelles technologies sont principalement utilisés dans le secteur des pâtes et papiers, avec les bioraffineries forestières intégrées (Machani 2014; Mansoornejad, Chambost, et Stuart 2010; Stuart 2006).

Dans sa publication Rönnqvist et ces collaborateurs ont soulevé 33 problèmes ouverts en recherche opérationnelle sur l'industrie forestière (2015). Il est intéressant de constater que 7 des problèmes énoncés touchent les problématiques environnementales. Des pistes de solutions peuvent être inspirées des autres secteurs d'activités, comme l'utilisation de résultat d'ACV dans un modèle d'optimisation multicritère. En revanche, on propose ici d'utiliser 4 critères environnementaux, en plus de l'aspect économique. Les impacts sur la santé humaine, la qualité des écosystèmes, les changements climatiques et la consommation de ressources ont des portées et des intérêts distincts. Il revient au décideur de choisir les solutions en fonction des résultats pour chaque critère.

3. Méthodologie

La méthodologie proposée a pour intérêt de prendre en considération les aspects économiques et environnementaux pour aider l'industriel dans les choix d'investissements. Tel que le montre la figure 1, cette méthodologie comporte quatre étapes et s'appuie sur quatre méthodes qui ont été respectivement présentées dans la littérature scientifique (1) ACV-A (Sartori et Hestnes, 2007; Sathre et O'Connor, 2008) ; (2) ACVC-ABC Emblemsvag (2003) ; (3) ACV-C (Petersen et Solberg 2005) et (4) l'optimisation multicritère (Bernier, 2011 ; Rivallain, 2013). Leur intégration est présentée dans les paragraphes suivants.

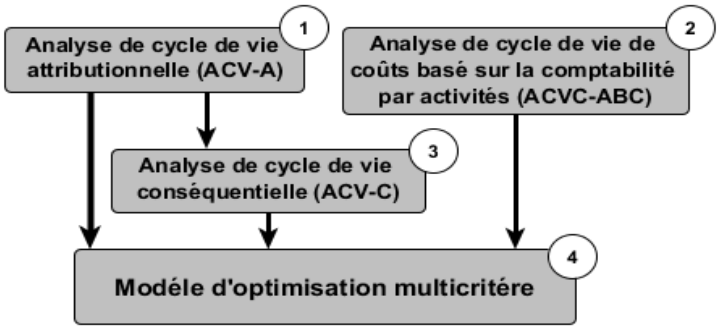

Figure 1: Schématisation du modèle d'aide à la décision proposé

La première étape consiste à réaliser une ACV-A et ainsi avoir une quantification des impacts sur l'environnement. La seconde étape permet de quantifier les coûts grâce à une ACVC-ABC. Cette méthode comptable moderne permet de calculer les coûts de revient de l'ensemble du portefeuille de produit et de faire un parallèle avec les impacts environnementaux. La troisième étape consiste à utiliser une approche conséquentielle de l'ACV. L'ACV-C a pour intérêt de déterminer les impacts environnementaux dus aux effets substitutions et à l'implantation de nouvelles technologies. Une fois que la quantification environnementale et économique réalisée, toutes ces données sont enfin intégrées dans un modèle d'optimisation multicritères, dans une quatrième étape. Une résolution par une méthode exacte de ce modèle d'optimisation, en varier l'ensemble des pondérations possible (entre 0 et 1) pour chacun des critères, ce qui permet d'obtenir l'ensemble de solutions non dominées. Ces solutions sont ensuite présentées dans un graphique appelé front de Pareto qui représente les compromis entre deux critères (Camaria et Dell'Olmo 2008; Pereyra, Saunders, et Castillo 2013). Les paragraphes suivants présentent le modèle mathématique permettant de générer les solutions de l'optimisation mathématique.

3.1. Le modèle mathématique

Le réseau logistique est une classe de problèmes d'optimisation que se modélise sous forme d'un graphe orienté. Le modèle mathématique présenté ci-dessous est de la programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP). Le modèle permet de considérer la possibilité d'ouvrir de nouvelles unités de

production générant des produits qui ne sont pas encore dans le portefeuille de l'entreprise. Le modèle MILP que nous proposons est multicritère, ce qui signifie que la fonction objective vise à optimiser plusieurs critères simultanément. De plus, afin de permettre de prendre en considération les aspects temporels et dynamiques la modélisation est également multi périodes.

La résolution d'un problème de réseau consiste à calculer pour chaque arc du graphe un flux de matière à transférer d'une unité (ou nœud) *U* à une autre unité *U'* avec une contrainte de conservation de flux, de telle sorte que la quantité de matière entrante soit égale à la quantité de matière sortante. Une solution optimale pour ce réseau est une solution qui maximise la fonction objective qui soustrait aux gains les pertes, les achats et l'ouverture d'une nouvelle technologie.

Le modèle mathématique est composé de 5 éléments. Les ensembles (3.1.1) sont présentés en premier lieu afin de faciliter la lecture. Suivent les variables de décision (3.1.2) les paramètres (3.1.3) la fonction objective (3.1.4) qui sert à trouver la meilleure solution en fonction des critères. Puis en dernier lieu sont présentées les contraintes (3.1.5). Dans les paragraphes suivants, une présentation précède la présentation de chacun des éléments.

3.1.1. Ensembles

U	Ensemble des unités de production (Une unité est un site où se déroule une activité de transformation générant un ou plusieurs produits).
A	Ensemble des critères (économique, santé humaine, qualité des écosystèmes, changements climatiques, consommation de ressources).
F	Ensemble des arcs entre les paires d'unités.
T	Ensemble des périodes (5 périodes de 1 an)
H^{α}, H^{b}	Ensemble des sites d'approvisionnements permis, l'exposant indiquant s'il s'agit de bois rond *α* ou de biomasse *β.*
S	Ensemble des sites de vente permis.
R_u	Recettes à l'unité *u.*
P	Ensemble des produits (fabriqués et consommables).
J	Sous-ensemble de produit *P* pouvant être utilisé comme consommable énergétique.
Q	Sous-ensemble de produit *P* de consommable énergétique acheté à l'externe.

3.1.2. Variables de décision

Les variables de décision sont les éléments sur lesquels le solveur fait varier les valeurs afin de calculer un optimum. On y retrouve donc les flux de matière et l'ouverture de nouvelles technologies. Les paramètres sont exprimés pour correspondre à l'unité fonctionnelle définie dans les analyses environnementales et économiques, le mètre cube.

$\alpha_{u,t}$	Récolte de bois en m^3 à l'unité $u \epsilon H$ à la période *t.*
$\beta_{u,t}$	Récolte de biomasse en m^3 à l'unité $u \epsilon H$ à la période *t*.
$\varphi_{u \rightarrow u',p,t}$	Flux de matière en m^3 pour le produit *p* de l'unité *u* à l'unité *u'* à la période *t.*
$\omega_{r,u,t}$	Nombre de fois que la recette *r* est utilisée à l'unité *u* à la période *t.*
$\vartheta_{p,u,t}$	Volume de consommable externe *p* utilisé à l'unité *u* à la période *t.*

$\sigma_{u,t}$	Binaire qui indique l'ouverture initiale (1ière ouverture) de l'unité *u* à la période *t*. Cette variable applique le coût d'ouverture une seule fois dans la fonction objectif.
$o_{u,t}$	Binaire qui indique l'état d'ouverture de l'unité *u* à la période *t* (0 si fermé, 1 si ouvert). Cette variable permet d'assurer le respect de la capacité.

3.1.3. Paramètres

$IV_{p,t}$	Impacts de la vente du produit *p* à la période *t.*
$IP_{r,u,t}$	Impacts de la production de la recette r dans l'unité *u* à la période t.
$IA_{p,t}$	Impacts d'approvisionnement du produit *p* à la période t.
$IO_{u,t}$	Impacts d'ouverture de l'unité *u* à la période t.
ρ_a	Pondération appliquée pour les critères $a \epsilon A$ (variant de 0 à 1; $\sum \rho_a = 1$).
Z_t	Flux maximum d'approvisionnement en bois à la période *t* (possibilité forestière en bois commercial).
B_t	Flux maximum d'approvisionnement en biomasse à la période *t* (possibilité forestière en biomasse).
$V_{r,p,u}$	Volume transformé ou sortant selon la recette *r* du produit *p* dans l'unité *u,* par unité de volume traité.
$I_{r,p,u}$	Volume consommé du produit *p,* par unité fonctionnelle, selon la recette *r* dans l'unité *u.*
$I^{\alpha}_{r,u,}$	Volume consommé à l'unité d'approvisionnement $u \epsilon H^{\alpha}$, par unité fonctionnelle, d'approvisionnement de bois issu de H^{α} selon la recette *r* (les recettes étant ici les différentes méthodes de récoltes).
$I^{\beta}_{r,u}$	Volume consommé à l'unité d'approvisionnement $u \epsilon H^{\beta}$, par unité fonctionnelle, d'approvisionnement de biomasse issu de H^{b} selon la recette *r* (les recettes étant ici la méthode de récoltes de biomasse).
L_i	Energie potentielle (en GJ) par unité fonctionnelle de la transformation thermico-chimique de $i \epsilon J \cup Q$. L'énergie potentielle est déterminée par le pouvoir calorifique du combustible et l'efficacité des systèmes de combustion correspondants.
$K_{r,u,t}$	Energie requise à l'unité *u* à la période *t* par exécution de la recette *r.*
N	Nombre de périodes.
$Q^{min}_{u,t}$	Seuil minimum de production à respecter pour l'ouverture de l'unité *u* à la période *t.*
$Q^{max}_{u,t}$	Capacité maximum de transformation à l'unité *u* à la période *t.*

3.1.4. Fonction objectif

La fonction objective est formulée afin d'obtenir la valeur à optimiser. Dans le présent modèle, l'objectif est de maximiser différentes pondérations de la mesure économique et environnementale pour un réseau donné considérant un ensemble de stratégies d'investissements. Puisque le modèle considère des critères variés, nous avons choisi de recourir à la notion « d'utilité », car elle permet l'inclusion notamment des critères économiques et environnementaux. On réfère généralement à une fonction d'utilité, à travers de laquelle les bénéfices et les pertes pour chacun des critères sont pondérés. Le modèle intègre les multiples impacts des achats externes et de l'implantation de nouvelles technologies.

$$Max\ Z = \rho_a \sum_{p\epsilon P} \sum_{t\epsilon T} \sum_{(u\to s)\ |\ s\epsilon S} IV_{p,t}\varphi_{u\to s,p,t}$$

Revenus d'utilités : représentent l'ensemble des gains réalisés par le produit *p* à la période *t*.

$$-\sum_{r\epsilon R_u} \sum_{u\epsilon U} \sum_{t\epsilon T} IP_{r,u,t}\omega_{r,u,t}$$

Pertes d'utilités : représentent l'ensemble des coûts de production de la recette r dans l'unité u à la période t.

$$-\sum_{p\epsilon P} \sum_{u\epsilon P} \sum_{t\epsilon T} IA_{p,t}\vartheta_{p,u,t}$$

Dépenses d'utilités : l'utilisation d'un produit externe *p* à la période *t*.

$$-\sum_{u\epsilon U} \sum_{t\epsilon T} IO_{u,t}\sigma_{u,t}$$

Ouvertures d'utilités : représentent l'ensemble des coûts d'investissement amorti de l'unité *u* à la période *t*.

3.1.5. Contraintes

$$\sum_{u\epsilon H^\alpha} \alpha_{u,t} \leq Z_t\ \forall t\epsilon T \tag{1}$$

L'équation 1 limite la capacité de récolte bois rond (possibilité forestière) à chaque période *t*.

$$\sum_{u\epsilon H^\beta} \beta_{u,t} \leq B_t\ \forall t\epsilon T \tag{2}$$

L'équation 2 limite la capacité de récolte biomasse (cimes et branches) à chaque période *t*.

$$\alpha_{u,t} = \sum_{r\epsilon R_u} I^{\alpha}_{r,u}\,\omega_{r,u,t}\ \forall u\epsilon H^\alpha,\ \forall t\epsilon T \tag{3}$$

L'équation 3 permet d'assurer l'utilisation du volume d'approvisionnement de bois rond *α* consommé pour la recette *r*.

$$\beta_{u,t} = \sum_{r\epsilon R_u} I^{\beta}_{r,u}\,\omega_{r,u,t}\ \forall u\epsilon H^\beta,\ \forall t\epsilon T \tag{4}$$

L'équation 4 permet d'assurer l'utilisation du volume d'approvisionnement de biomasse *β* consommé pour la recette *r*.

$$\vartheta_{p,u,t} + \sum_{(u'\to u)\epsilon F} \varphi_{u'\to u,p,t} = \sum_{r\epsilon R_u} I_{r,p,u}\omega_{r,u,t}\ \forall p\epsilon P,\ u\epsilon U,\ \forall t\epsilon T \tag{5}$$

L'équation 5 assure la conservation de flux de volume consommé entre les unités pour générer le produit *p*. Ainsi le volume de consommable et le flux de matière provenant de l'unité précédente *u'* à l'unité *u* doit être égale au volume de consommé pour le produit *p*.

$$\sum_{r\epsilon R_u} V_{r,p,u}\omega_{r,u,t} = \sum_{(u\to u')\epsilon F} \varphi_{u\to u',p,t} + \sum_{(u\to s)\epsilon S} \varphi_{u\to s,p,t}\ \forall p\epsilon P,\ \forall u\epsilon U, \forall t\epsilon T \tag{6}$$

La conservation de flux du volume transformé est assurée par l'équation 6. Le volume de matière transformé par recette à l'unité *u* doit être transféré à l'unité qui suit *u'* ou doit être vendu à l'unité *s.* Ceci s'applique également aux produits énergétiques *J* qui sont des sous-produits de *P.*

$$\sum_{r\epsilon R_u} K_{r,u,t}\,\omega_{r,u,t} = \sum_{j\epsilon J}\ \sum_{(u\prime\to u)\epsilon F} L_j \varphi_{u\prime\,\to\,u,\,j,\,t} + \sum_{q\epsilon Q} L_q \vartheta_{q,u,t} \quad \forall u\epsilon U, \forall t\epsilon T \tag{7}$$

L'équation 7 assure les besoins énergétiques nécessaires à la réalisation de la recette *r*. Ce qui dépend de l'énergie potentielle L_i des produits énergétiques qui peuvent provenir de source *J* ou de source externe *Q.*

$$o_{u,0} = \sigma_{u,0}\ \forall u\epsilon U \tag{8}$$

La variable d'état d'ouverture initiale (à la période *t0*) de l'unité *u* est assurée par l'équation 8.

$$o_{u,t} Q_{u,t}^{min} \leq \sum_{r\epsilon R_u} I_{r,p,u}\,\omega_{r,u,t} \leq o_{u,t} Q_{u,t}^{max}\ \forall p\epsilon P, \forall u\epsilon U, \forall t\epsilon T \tag{9}$$

La contrainte l'équation 9 assure qu'une unité ne peut produire que si elle est ouverte à la période *t*. Si l'unité est ouverte, la production totale doit respecter les limites supérieures et inférieures imposées à la capacité.

$$o_{u,t} - o_{u,t-1} = \sigma_{u,t}\ \forall u\epsilon U, \forall t\epsilon\{1..N\} \tag{10}$$

L'équation 10 assure de ne pas ouvrir plusieurs fois la même unité *u*.

4. Étude de cas

Le modèle d'aide à la décision proposé a été appliqué à une entreprise forestière qui opère depuis plus de 60 ans dans la forêt boréale québécoise. Les Chantiers Chibougamau ltée (CCltée) ont la particularité d'avoir un portefeuille de produit plus diversifié que les autres entreprises forestières de la région, car ils produisent, en plus des bois d'œuvre, des produits d'ingénieries. En effet, comme le montre la figure 2 les CCltée fabriquent des poutres en I, des poutres en lamellé-collé, des panneaux de lamellé-croisé (CLT) en plus de produits et sous-produits d'une scierie traditionnelle.

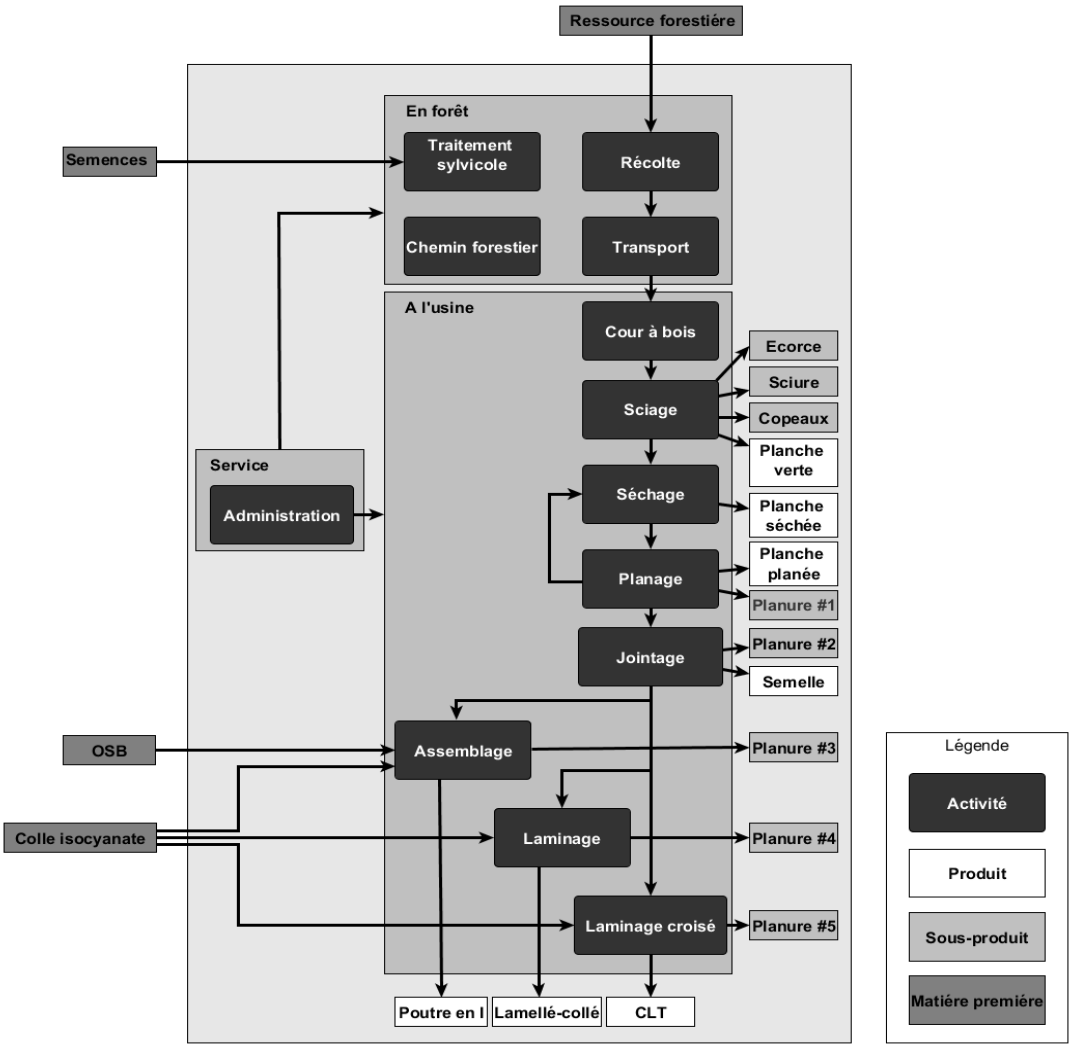

Figure 2: Schéma des activités de l'étude de cas

L'approvisionnement en bois rond se fait dans les forêts publiques du Québec. C'est le ministère qui donne les attributions annuellement, c'est pour cette raison que nous avons placé une contrainte d'approvisionnement en bois et en biomasse qui représente les cimes et les branches des arbres abattues. Les 4 activités en forêt permettent de récolter et de transporter le bois à l'usine. Après une étape de tri à la cour à bois, les billes sont sciées. Ce processus divergent génère de l'écorce, des copeaux, des sciures et des planches vertes. Les planches qui ne sont pas vendues vertes sont séchées. Après le séchage, les planches sont planées. Ceci activités sont appelées de première transformation d'une scierie traditionnelle. Les activités de jointage, d'assemblage, le lamellage et lamellage-croisé sont-elles appelées des activités de seconde transformation. Les produits fabriqués sont respectivement des semelles, des poutres en I, du lamellé-collé et du CLT. Ces produits d'ingénierie ont une valeur ajoutée supérieure au bois d'œuvre et présente des gains aussi sur les aspects environnementaux puisqu'ils peuvent substituer des matériaux de construction, tels que l'acier et le béton, plus énergivores.

L'ensemble de ces activités génère également des sous-produits. L'écorce est cédée à une centrale de cogénération à proximité. Les copeaux sont utilisés par l'industrie des pâte et papier et sont vendus au plus offrant. Une partie de planures sert à produire l'énergie nécessaire au séchage, le reste et les sciures

sont mélangés aux copeaux. Un des enjeux de cette analyse est de proposer des alternatives pour ces sous-produits permettant d'améliorer le bilan économique et environnemental de l'entreprise.

Les paragraphes suivants présentent les paramètres de l'étude de cas en suivant la chronologie des éléments méthodologiques.

4.1. L'analyse de cycle de vie attributionnelle (ACV-A)

Dans la présente étude, les dommages environnementaux sont issus d'une ACV-A jusqu'à la barrière de l'usine « *Cradle-To-Gate* » de l'ensemble du portefeuille de produit de notre partenaire industriel (Laurent et al. 2016). Nous avons restreint les frontières du système à l'étude de l'ACV-A aux activités sous le contrôle de l'industriel puisque l'objectif est de fournir le portrait environnemental et des pistes d'amélioration à l'industriel. Rien n'empêche par la suite d'additionner les étapes subséquentes « Gate-To-Grave », afin de réaliser une analyse du cycle de vie complète « Cradle-to-Grave » d'un bâtiment par exemple. L'unité fonctionnelle choisie pour évaluer les impacts environnementaux du portefeuille de produits est le mètre cube de bois solide et sec utilisé en entrée de production. Conformément aux recommandations des règles par catégorie de produits du secteur forestier, l'allocation est réalisée sur une base volumique (Institut Bauen und Umwelt e.V., 2009; The Norwegian EPD Foundation, 2009). Nous avons utilisé ses données primaires pour les activités de premier plan. Les activités de second plan ont été modélisées à partir de la base de données ecoinvent (version 2.2) (Hedemann et König 2007), en les adaptant au contexte québécois. La méthode que nous avons utilisée pour quantifier les impacts environnementaux est *IMPACT 2002+* (Jolliet, 2003) via le logiciel Simapro v7.0 (édité par *Pré consultant*). Ainsi, nous avons obtenu des résultats pour quatre catégories d'impacts orientés comme dommage sur l'environnement (santé humaine, qualité des écosystèmes, changements climatiques et consommation de ressources).

4.2. L'analyse de cycle de vie de coûts basée sur la comptabilité par activités (ACVC-ABC)

Les résultats économiques utilisés dans cette étude sont déterminés selon les principes de la méthode d'ACVC basé sur l'ABC proposé par d'Emblemsvag (2003). Nous avons choisi de recourir à cette méthode de quantification économique pour ses similarités avec l'ACV-A environnementale afin de faciliter l'intégration des résultats de ces deux analyses. En utilisant les mêmes paramètres que pour l'ACV-A, nous avons déterminé les coûts de revient de chaque activité, aussi bien en forêt qu'à l'usine (Laurent, D'Amours, et Beauregard 2016). Nous avons ensuite attribué les coûts aux 15 produits générés par les activités sur une base volumique, soit le mètre cube de bois solide.

4.3. L'analyse de cycle de vie conséquentielle (ACV-C)

La décision et l'unité fonctionnelle de cette ACV-C que nous avons choisi d'étudier est : « La production prospective du portefeuille de produits d'une industrie forestière sur un horizon de 5 ans ». Cette production prospective comprend le réseau actuel des CCLtée, que l'on appelle scénario initial. Ainsi que l'ajout de nouvelles technologies potentielles qui sont détaillées dans le tableau 1.

L'approche de substitution, entre-deux produits différents qui offrent une équivalence fonctionnelle, est reconnue dans les principaux guides nommant l'ACV-C (European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability 2010; ISO 2006b; Weidema 2003). Nous avons donc choisi

d'utiliser une approche conséquentielle afin de prendre en considération les effets de substitution de l'utilisation des produits du bois par les matériaux usuellement utilisés dans le domaine de la construction (béton ou l'acier) et de la production énergétique (combustibles fossiles). L'identification des conséquences et les substitutions associées sont basées sur les pratiques les plus courantes en Amérique du Nord. Nous avons donc déterminé les matériaux de substitutions les plus vraisemblables. Les équivalences des volumes à service équivalent ont été calculés grâce à la version 5.1 du logiciel Athena impact estimator (édité par *l'institut Athena*).

- Les poutres en I offrent une alternative aux poutrelles en l'acier qui dominent dans les structures légères ;
- Le bois lamellé-collé et le CLT permettent la construction d'ossature massive (ou lourde) ce qui rentre en compétition avec le béton.

Nous avons ensuite déterminé les impacts environnementaux à partir des quantités équivalentes d'acier et de béton pour substituer les trois produits d'ingénierie. Pour ce faire nous avons recouru à la base de données ecoinvent (version 2.2) (Hedemann et König 2007), avec des adaptations aux contextes nord-américains. Nous avons utilisé la méthode *IMPACT 2002+* afin d'obtenir les 4 mêmes dommages sur l'environnement que précédemment, à savoir la santé humaine, la qualité des écosystèmes, les changements climatiques et la consommation de ressources.

Le tableau suivant présente les nouvelles technologies proposées au modèle ainsi que les substitues correspondants. Les CCLtée produisent déjà des produits d'ingénieries, ne laissant pas beaucoup de disponibilité de matière pour intégrer de nouveaux matériaux de construction. Nous avons donc privilégié les produits énergétiques. Les équivalences énergétiques sont intégrées dans le modèle grâce au paramètre L_p. Nous avons utilisé les pouvoirs calorifiques des différentes sources énergétiques auxquels nous avons appliqué un facteur d'efficacité de combustion, car celle-ci peut varier en fonction du combustible. Comme précédemment les impacts environnementaux des substituts ont été déterminés dans Simapro, avec la méthode *IMPACT 2002+* (Jolliet et al. 2003) grâce à la base de données ecoinvent (version 2.2) (Hedemann et König 2007) et des adaptations aux contextes québécois.

Tableau 1: Listes de nouvelles technologies proposées

Nouvelles technologies	Sources des données environnementales	Sources des données économiques	Substitut
Récolte de biomasse	ACV sur la récolte de biomasse dans la vallée de la Matapédia (Laurent et Dessureault 2015)	(Desrochers 2008)	
Granules industriels	Spécifiques à une entreprise de granule de bois du Lac-Saint-Jean (Laurent 2010) + ecoinvent (version 2.2) (Hedemann et König 2007) et des adaptations aux contextes québécois.	(Brodeur *et al.* 2008; Pellet.org 2015; Scott 2012)	Mazout lourd (#6)
Granules domestiques			Mazout léger

Cogénération	ecoinvent (version 2.2) (Hedemann et König 2007) et des adaptations aux contextes québécois.	(FPInnovations, FPAC (Association canadienne des produits forestiers, et SCF (service canadien des forêts) 2011; HydroQuébec 2015)	L'énergie thermique est utilisée à la scierie pour le séchage L'électricité est modélisée pour être envoyée sur le réseau d'Hydro-Québec (HydroQuébec 2015)
Éthanol cellulosique	Ethanol, 95% in H2O, from wood, at distillery/CH U (Althaus et al. 2007; Borrion, McManus, et Hammond 2012; Murphy et Kendall 2015)	(Edenhofer, Pichs-Madruga, et Sokona 2012; FPInnovations, FPAC (Association canadienne des produits forestiers, et SCF (service canadien des forêts) 2011; Koch 2008)	Essence fossile (peut être vendu ou être utilisé dans les pickups des CCltée)
Biodiesel à partir d'huile pyrolytique	Données confidentielles et Infrastructures équivalentes à celle de l'éthanol	(Clark et al. 1999; FPInnovations, FPAC (Association canadienne des produits forestiers, et SCF (service canadien des forêts) 2011; Meier et Faix 1999; Wakker et al. 2005)	Petrodiesel (peut être vendu ou être utilisé machineries diesel de récolte ou de manutention)

4.4. L'optimisation multicritère

Les données primaires utilisées pour les analyses environnementale et économique sont basées sur des moyennes annuelles. Afin de conserver les variations interannuelles dans les recettes et de considérer l'augmentation des coûts annuels, 5 périodes d'une année chacune ont été modélisées. Un taux de 2% d'augmentation du coût de la vie a été appliqué à l'ensemble des données économiques. Également pour rendre le modèle réaliste, nous avons ajouté quelques contraintes concernant l'ouverture de nouvelles technologies. Nous avons considéré un délai de 6 mois pour la construction des installations de granulation. Si bien que lorsque le modèle décide d'ouvrir la granulation, il paye les infrastructures, mais ne produit que la moitié de la capacité annuelle. Ces délais de construction sont de 1 an pour la cogénération et de 2 ans pour l'éthanol et le biodiesel. De plus, les frais d'implantation des technologies de production d'éthanol et de biodiesel dépassant les centaines de millions de dollars, nous avons donc ajouté une contrainte limitant les implantations à une seule de ces deux technologies.

L'optimisation multicritère est réalisée avec les données de l'ACV-C. Les résultats directement issus de CPLEX Version 12.5 (édité par *IBM*) indiquent non seulement le résultat de la fonction objective, mais également les flux de matières et l'ouverture de technologie. Afin d'explorer l'ensemble des solutions possibles, nous avons choisi de recourir à une analyse a *posteriori*, en générant l'ensemble des solutions non dominées, en faisant varier les pondérations des critères entre 0 et 1 (Yalcinoz et Köksoy 2007). Ce

qui nous permet de générer les fronts de Pareto présentés dans la section suivante présentant les résultats.

5. Résultats

La taille du problème étant modeste, la résolution du modèle d'optimisation a généré plus de 150 solutions différentes en moins de 2 minutes. Même s'ils présentent des différences, il n'est pas pertinent de faire une présentation détaillée de toutes ces solutions aux décideurs. La présente section des résultats suit le processus de sélection des solutions pertinentes. Elle se compose de trois parties :

- La première présente graphiquement les résultats de l'ensemble des solutions non dominées, les fronts de Pareto ;
- La seconde représentation graphique est un pentagone présentant les solutions pour les 5 critères simultanément, permettant ainsi de voir si un des critères n'est pas négligé ;
- La troisième partie de l'analyse consiste à présenter les schémas du réseau de solutions proposées incluant les flux de matières, les ouvertures ainsi que l'empreinte carbonique et les profits nets.

Tous ces résultats sont présentés sous forme de graphiques afin de faciliter la visualisation et la compréhension par les décideurs. En effet, cette difficulté de compréhension est due à la complexité induite par l'optimisation multicritères dans un premier temps (Greco et al. 2015), mais également par l'approche de cycle de vie, surtout lorsqu'on choisit de ne pas recourir à un score unique, agrègent les impacts environnementaux en une seule valeur sans unité (Hermann, Kroeze, et Jawjit 2007). C'est pour ces raisons que nous avons privilégiées présenté les résultats sous forme graphique. De plus, la méthodologie de sélection de solutions proposées repose sur le principe de comparaison qui rend plus facile l'interprétation (Curran 2006). Les fronts de Pareto permettent de visualiser les résultats du modèle d'optimisation, deux critères à la fois. Une fois la sélection d'un petit nombre de solutions pertinentes réalisées, l'analyse des résultats s'apparente également à une comparaison, mais entre solutions.

Les résultats présentés sont issus de notre étude de cas. Les échelles ont été conservées pour montrer les gains possibles entre les différents scénarios. En revanche, la forme des fronts de Pareto obtenus est uniquement représentative des activités des CCLtée et pourrait être différente pour une autre entreprise. Pour des raisons de confidentialité, nous avons retiré l'échelle des abscisses des graphiques présentant les bénéfices économiques.

5.1. Les fronts de Pareto

Afin de faciliter la compréhension, nous avons choisi de présenter les fronts de Pareto représentant les solutions ainsi que les compromis entre deux critères à la fois uniquement. De plus, nous avons gardé le critère économique comme abscisse commune. Les quatre représentations graphiques suivantes montrent les résultats obtenus lors de la génération des scénarios prospectifs basés sur les données de notre partenaire industriel. Ainsi, les paragraphes suivants présentent 4 fronts de Pareto, représentant les compromis entre le critère : l'économie ainsi que les changements climatiques (1), la santé humaine (2), puis la biodiversité (3) et enfin la consommation de ressources (4).

5.1.1. Compromis entre le critère économique et de changements climatiques

L'optimisation est réalisée avec les résultats de l'ACV-C, prenant en considération les effets de substitution. Le matériau bois à la particularité d'avoir un double avantage dans la lutte aux changements climatiques. En effet, le bois est composé de 50% de carbone, qui est séquestré tout au long de la vie utile du produit. De plus, la transformation des produits du bois est moins énergivore, et moins émettrice de GES, que les matériaux compétiteurs (Nabuurs et al. 2007). Ainsi, l'utilisation de produit du bois dans la construction substitut du béton ou de l'acier. Cet évitement est profitable aux produits du bois sur le critère des changements climatiques. Il en va de même pour la substitution de combustible fossile, la biomasse à des fins énergétiques étant considérée comme carboneutre (IEA 2002). Nous avons tout de même soustrait les GES émis lors de la récolte et la transformation de la biomasse.

La figure 3 est la représentation des scénarios non dominés du compromis entre le critère économique (en abscisse) et les changements climatiques (en ordonné). Ainsi la solution maximisant le critère économique (solution 1) est représentée par le point nommé S1 à l'extrême gauche. À l'opposé, la solution maximisant la séquestration de carbone (solution 4) est représentée par le point noté S4 en bas à droite de la courbe. La solution S1407 est un intermédiaire qui semble intéressant, puisqu'il permet d'augmenter la séquestration de carbone tout en conservant le critère économique.

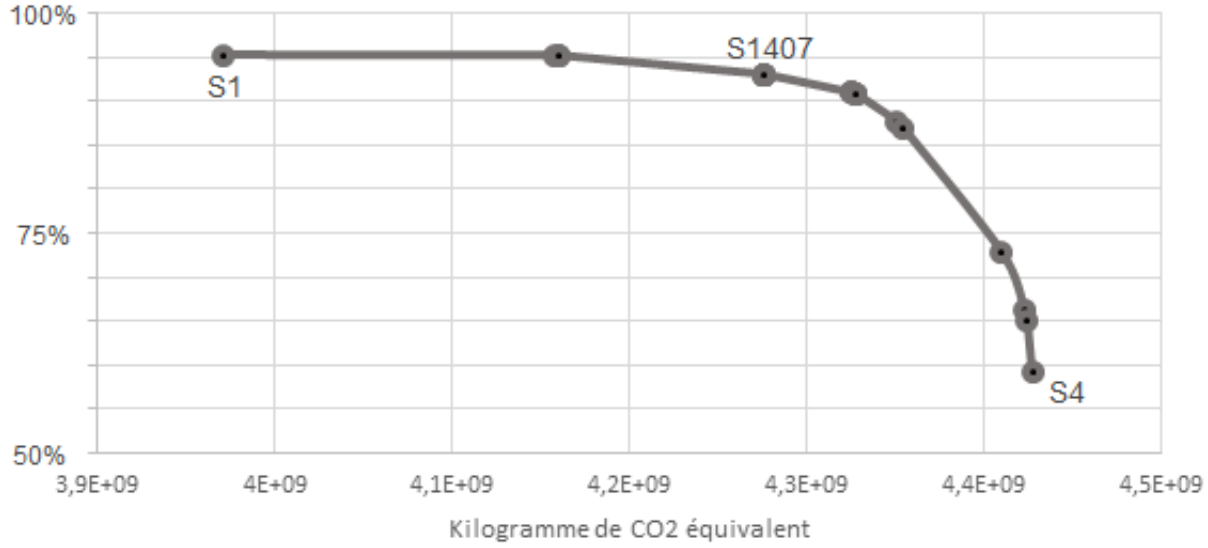

Figure 3 Front de Pareto entre le critère économique et de changements climatiques

Les variations sur le critère économique sont plus importantes que ceux sur les changements climatiques. En effet, les gains économiques entre le scénario maximisant la séquestration de carbone et celui maximisant les profits sont supérieurs à 60%. Entre ces deux mêmes solutions, l'augmentation de la séquestration de carbone est de 10%. À titre indicatif, la variation de l'ordre de 0.5^{E}+09 kilo de CO_2 équivalent représente la consommation d'environ 150 millions de litres de diesel.

Les solutions prospectives se tournent rapidement vers la production de bioénergie. Ce qui permet des réductions significatives d'émission de GES. Le type de bioénergie en revanche influe sur les coûts d'investissements, ce qui explique les écarts dans les revenus et coûts associés au critère économique.

5.1.2. Compromis entre le critère économique et de santé humaine

Dans l'ACV-A, les dommages sur la santé humaine sont exprimés en DALY (Disability Adjusted Life Years), qui est une unité utilisée par l'organisation mondiale pour la santé afin d'évaluer les pertes d'espérance de vie. Dans l'étude de cas, les dommages sur la santé humaine sont principalement issus des impacts sur la respiration ionique. Ces impacts sont dus aux émissions de particules, de NO_x et de SO_2 qui sont générés par les produits pétroliers non brûlés, autrement dit les différentes colles. Comme mentionné précédemment, les scénarios prospectifs sont favorables aux bioénergies, réduisant d'autant les dommages sur les changements climatiques. Ce qui explique la corrélation importante entre les critères de changements climatiques et la santé humaine, comme le montrent les allures des deux fronts de Pareto, de la figure 3 et 4. Cette dernière présentant la frontière des solutions non dominées faisant un compromis entre l'économie et la santé humaine.

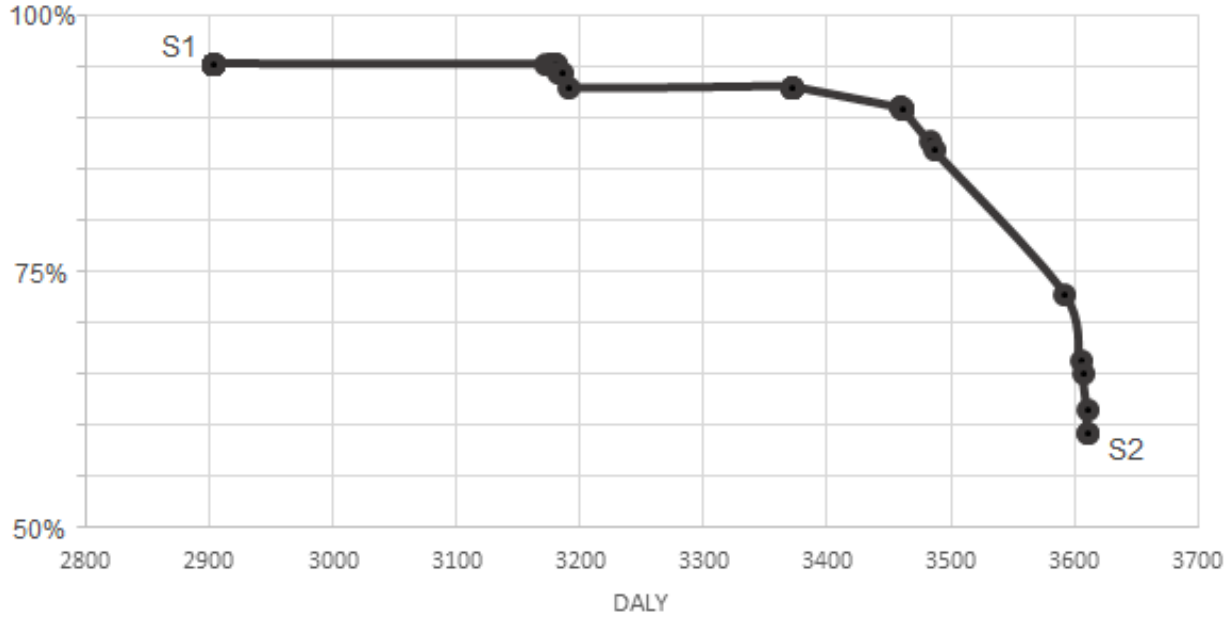

Figure 4: Front de Pareto entre le critère économique et de santé humaine

On notera la présence d'un palier dans le haut de la courbe. Là aussi, cet impact est dû aux colles. Le scénario maximisant les revenus génère autant de poutres en I que la capacité de production le permet. Ce qui entraine une augmentation directe de la consommation de colle pour fabriquer les panneaux OSB.

Les écarts de profit monétaire entre les scénarios maximisant les critères économiques (S1) et sur la santé humaine (S2) sont identiques à ceux présentés dans la figure précédente, soit 60%. En revanche, les gains sur le dommage sur la santé humaine sont légèrement supérieurs pour atteindre 20%.

5.1.3. Compromis entre le critère économique et de qualité des écosystèmes

La qualité des écosystèmes est exprimée en PDF.m^2.an (Potentially Disappeared Fraction of species), et représente la perte potentielle de biodiversité pour un durée et une surface. La récolte de bois en forêt a un impact sur la qualité des écosystèmes et comme on contraint le modèle à produire, la solution

maximisant les retombées positives sur la qualité des écosystèmes (S3) minimise autant que possible la récolte en forêt. Dans cette solution seule, la biomasse est récoltée pour faire de la cogénération et des granules industrielles. Le peu d'impact sur les écosystèmes en forêt par le faible volume récolté est compensé par la substitution énergétique. En revanche, le manque à gagner par rapport à la solution maximisant l'économie (S1) est de l'ordre de 65%.

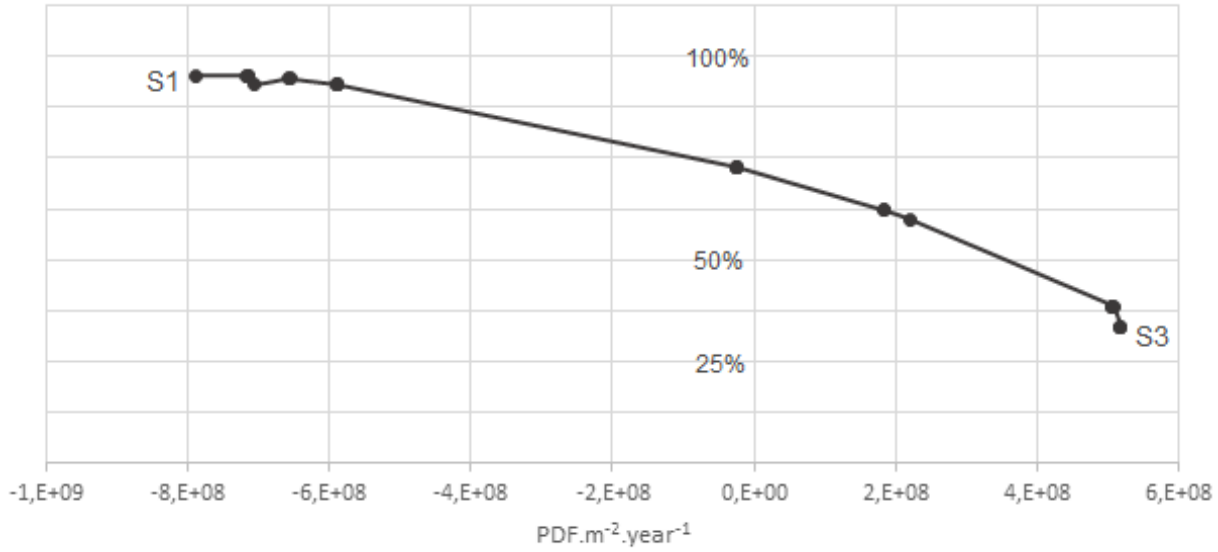

Figure 5 Front de Pareto entre le critère économique et de la qualité des écosystèmes

5.1.4. Compromis entre le critère économique et de consommation de ressources

La figure 6 présente le compromis entre le critère économique et la consommation de ressources. Ce dernier critère est exprimé en Giga Joule, une unité énergétique. Les écarts entre la solution maximisant l'économie (S1) et celui minimisant la consommation de ressource (S5) sont de l'ordre de 25% sur les deux critères. De plus, comme le front de Pareto, il y a une agglomération de solutions non dominées dans la zone maximisant les retombées positives pour la consommation de ressources. Ce regroupement de solutions s'explique par l'ouverture de technologie produisant des biocarburants. Les coûts d'investissements de ces technologies sont élevés, ce qui affecte directement les profits possibles.

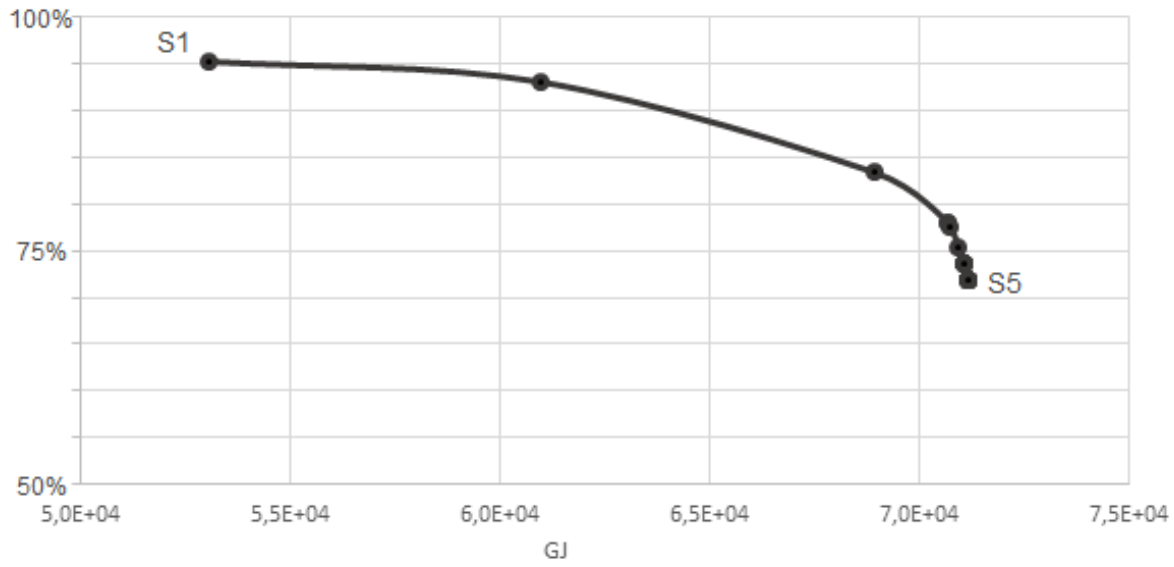

Figure 6 Front de Pareto entre le critère économique et consommation de ressources

5.2. Analyse des scénarios retenus

À partir de l'analyse des 4 fronts de Pareto présentés précédemment, un petit nombre de solutions ont été choisies afin d'approfondir l'analyse de ces solutions.

Pour des fins de présentation, nous avons choisi de vous présenter les solutions extrêmes ainsi qu'une solution intermédiaire qui a l'avantage d'obtenir un résultat intéressant sur les 5 critères. Afin de représenter les 5 critères sur un seul schéma, nous avons généré un graphique en forme de pentagone. Une fois les résultats pondérés, ce type de graphique permet d'avoir un aperçu des résultats des solutions analysées pour les 5 critères, comme le montre la figure 7.

Un simple calcul de la superficie des pentagones permet de déterminer le scénario qui obtient le meilleur compromis entre les 5 critères. Dans cet exemple, il s'agit de la solution numérotée 1407, dont la pondération est de 93% économiques et de 7% sur les changements climatiques. Il est à noter également que le scénario minimisant les dommages sur les changements climatiques (S4) et celui minimisant les dommages sur la santé humaine (S2) obtiennent les mêmes résultats sur les 5 critères. Les différences sont négligeables au point où nous avons regroupé ces deux scénarios dans le graphique. Pourtant les flux de matières de ces deux scénarios ne sont pas rigoureusement les mêmes. Il doit donc s'agir d'un cas particulier.

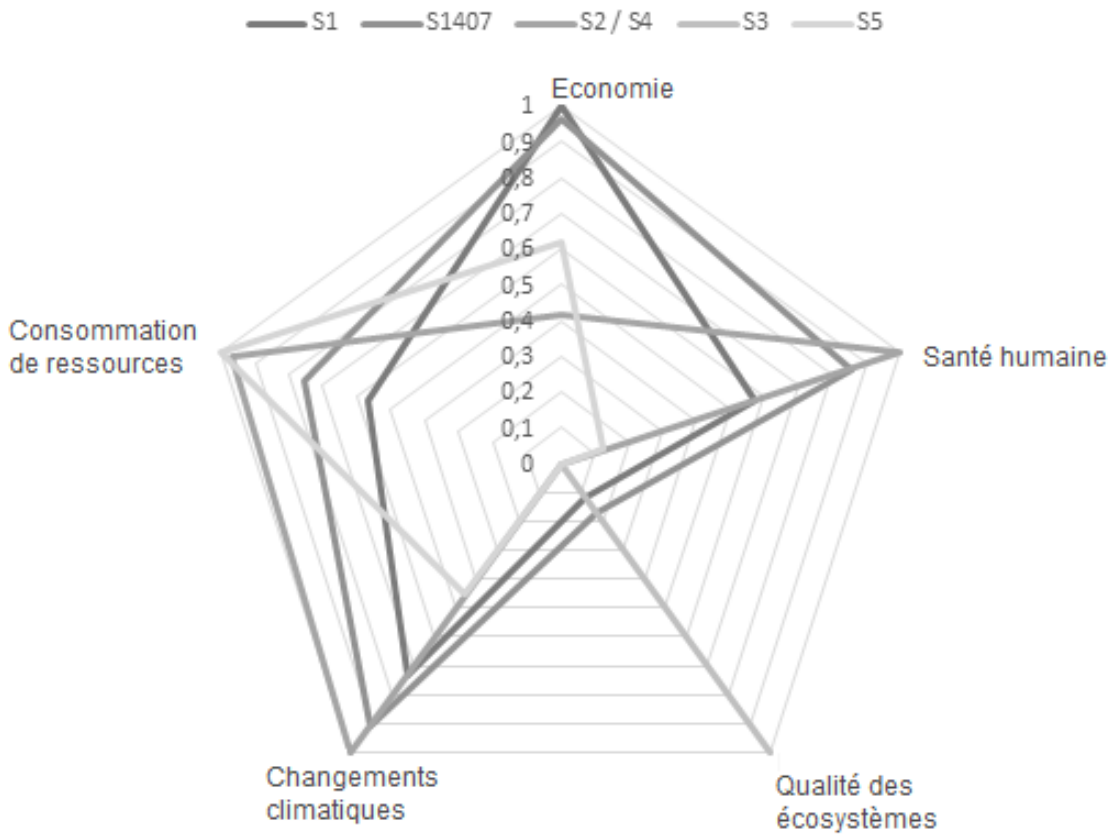

Figure 7: Pentagone présentant les résultats pondérés sur les 5 critères

5.3. Schéma du réseau

En complément au graphique en pentagone, et pour rendre plus concrète la représentation des solutions modifiant le réseau logistique, nous proposons de présenter les schémas du réseau des solutions.

Comme le montre la figure 8, cette représentation des réseaux permet de donner une idée des flux de matières (par l'épaisseur des traits) et de voir quelles technologies sont implantées. De plus, ces schémas de réseau sont accompagnés des profits nets et les émissions de GES nets aux solutions qui leurs correspondent. Les profits nets sont les résultats de la soustraction de coûts totaux (opération, achat et implantation de technologie) aux gains faits par la vente de produits. Les GES sont recalculés et représentent les émissions nettes des activités des solutions, sans les effets de substitution. Contrairement aux résultats bruts de l'optimisation multicritère présentée précédemment, qui sont déterminés par une approche conséquentielle, ces résultats de type attributionnels indiquent à notre partenaire industriel les impacts réels de l'implantation de la solution proposée. Il nous semble que ce sont des éléments de comparaison pertinents pour les décideurs.

Les schémas des réseaux et les calculs sont générés pour tous les scénarios par un script en Python. Dans cette section seule la solution 1407 est présentée afin de ne pas surcharger le document. En revanche, afin de constater les impacts dus à l'implantation de nouvelles technologies nous présentons la solution

1407 du scénario initial optimisé. Contrairement aux scénarios prospectifs, les scénarios initiaux n'optimisent que sur le flux de matière, l'ouverture de nouvelles technologies n'étant pas permise.

5.3.1. Scénario prospectif optimisé

La figure 8 présente le schéma du réseau de la solution 1407 du scénario prospectif optimisé. Nous avons représenté la frontière entre le scénario initial par un cadre en pointillé afin de mettre en évidence les nouvelles technologies qui sont proposées au modèle.

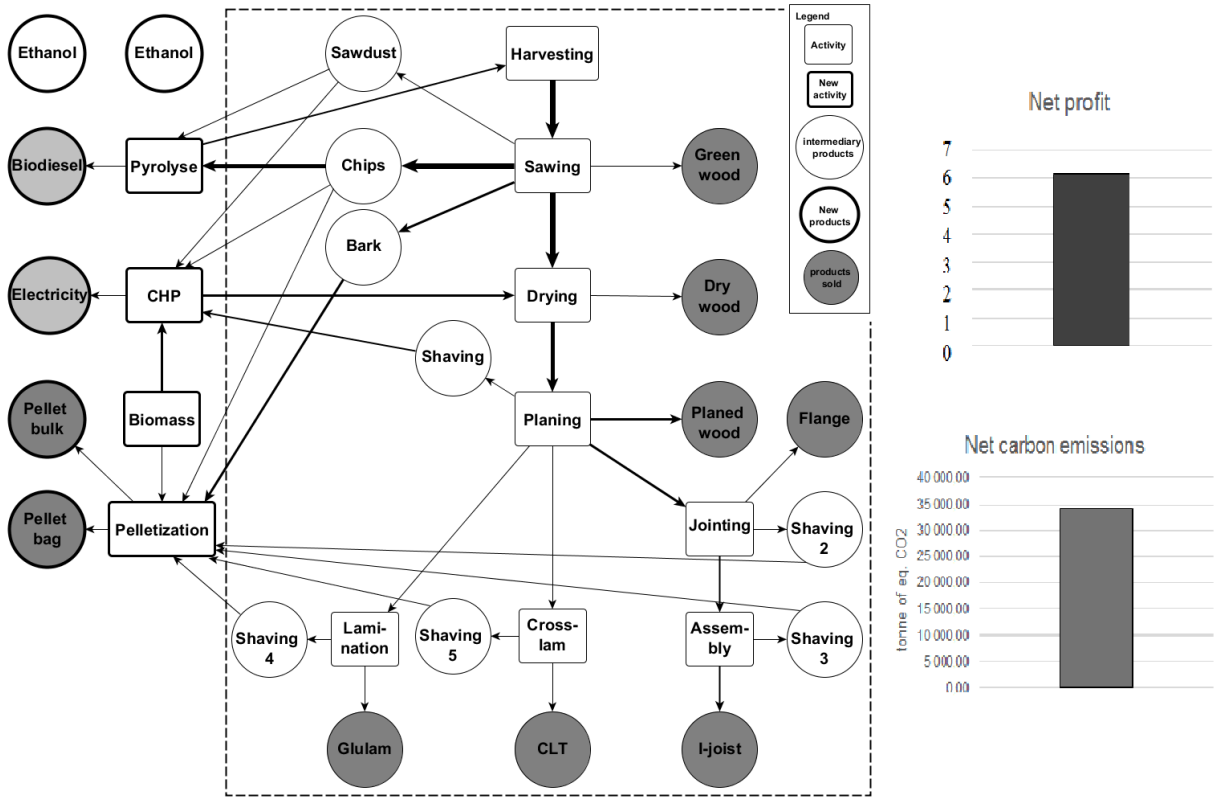

Figure 8: Schéma du réseau de la solution 1407 du scénario prospectif

La solution proposée implante la récolte de biomasse forestière, et se sert de cette nouvelle ressource pour alimenter la centrale de cogénération. La production thermique de celle-ci est utilisée pour les séchoirs et la production électrique est vendue sur le réseau national. Le reste de la biomasse permet de produire des granules de type industriel, car il y a de l'écorce, un substitut du mazout lourd. La matière blanche (sans écorce) issue des planures est densifiée et ensachée pour être vendue comme granule domestique, car le prix de vente est plus élevé que pour les granules industriels. Ce scénario propose également de produire du biodiesel qui sera utilisé directement dans les machineries forestières et les camions de débardage. Comme le montrent les histogrammes de la figure 8 et 9, cette solution permet de doubler les profits en comparaison avec le scénario initial, sans augmenter de façon significative les émissions de GES. Ce qui est rendu possible grâce à la production et l'utilisation à l'interne de biocarburant.

5.3.2. Scénario initial optimisé

La figure 9 présente le résultat de l'optimisation d'un scénario initiale. Dans cette optimisation, il n'y a pas d'ouverture de technologie possible, seuls les flux de matières sont des variables de décision. Comme le montre le schéma, tous les produits sont vendus directement. Les produits énergétiques produits dans les scénarios prospectifs permettent d'augmenter la valeur ajoutée de ces ressources, et de doubler les profits escomptés par l'entreprise. Ceci démontre l'intérêt de proposer l'implantation de nouvelles technologies.

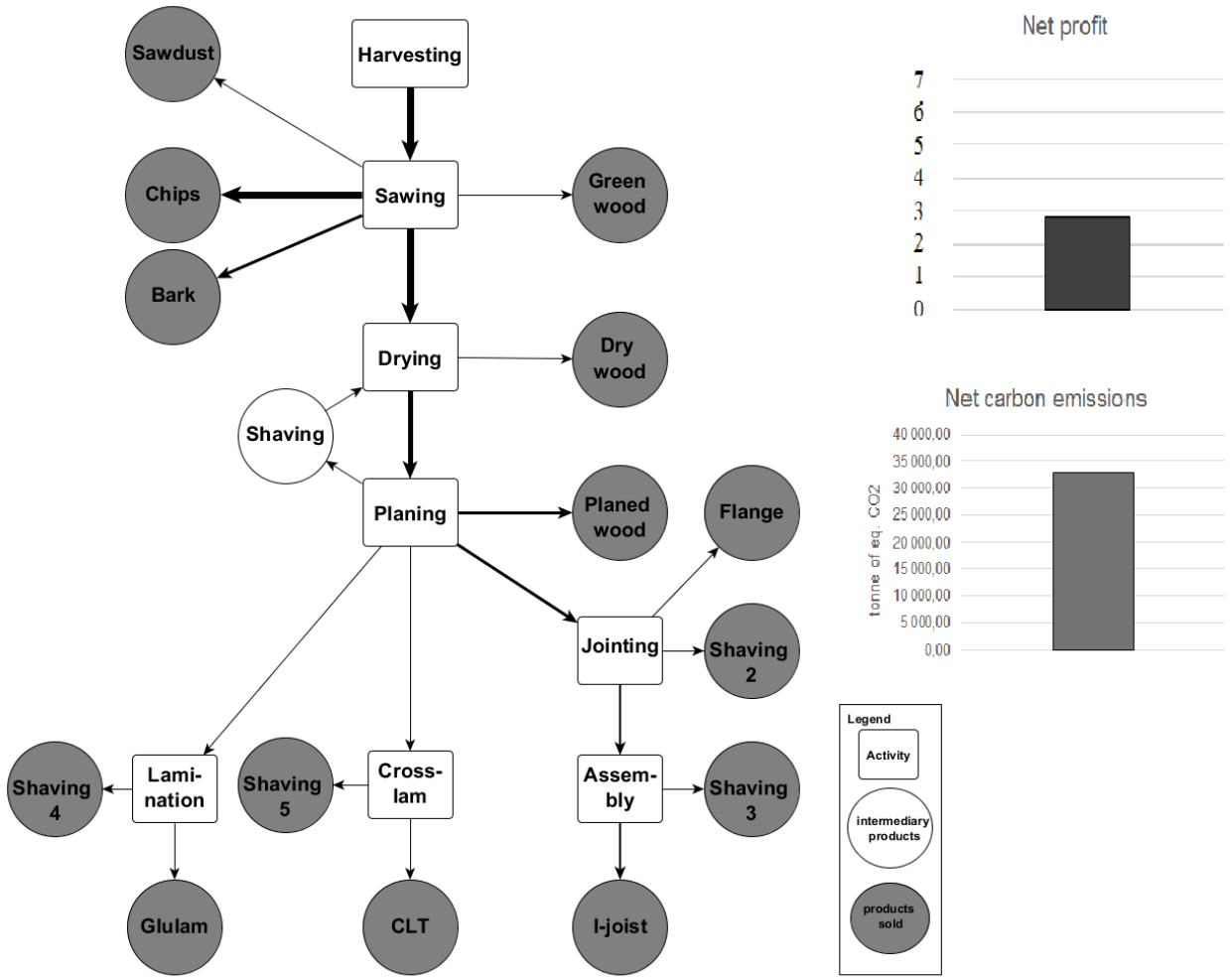

Figure 9: Schéma du réseau de la solution 1407 du scénario initial optimisé

6. Discussion

Il est possible de calculer les coûts de la réduction de GES obtenus par l'ouverture de nouvelles technologies, en soustrayant les gains des scénarios initiaux -sans ouverture de technologie- aux scénarios prospectifs. À partir de ces résultats, nous avons généré une courbe d'abattement de coûts marginaux (CACM) présentée dans la figure 10. Une CACM est une représentation graphique qui montre explicitement le surcoût de l'implantation d'une technologie permettant la réduction d'émissions de GES, exprimé en pourcentage, par rapport à un scénario de référence (Kesicki et Strachan 2011).

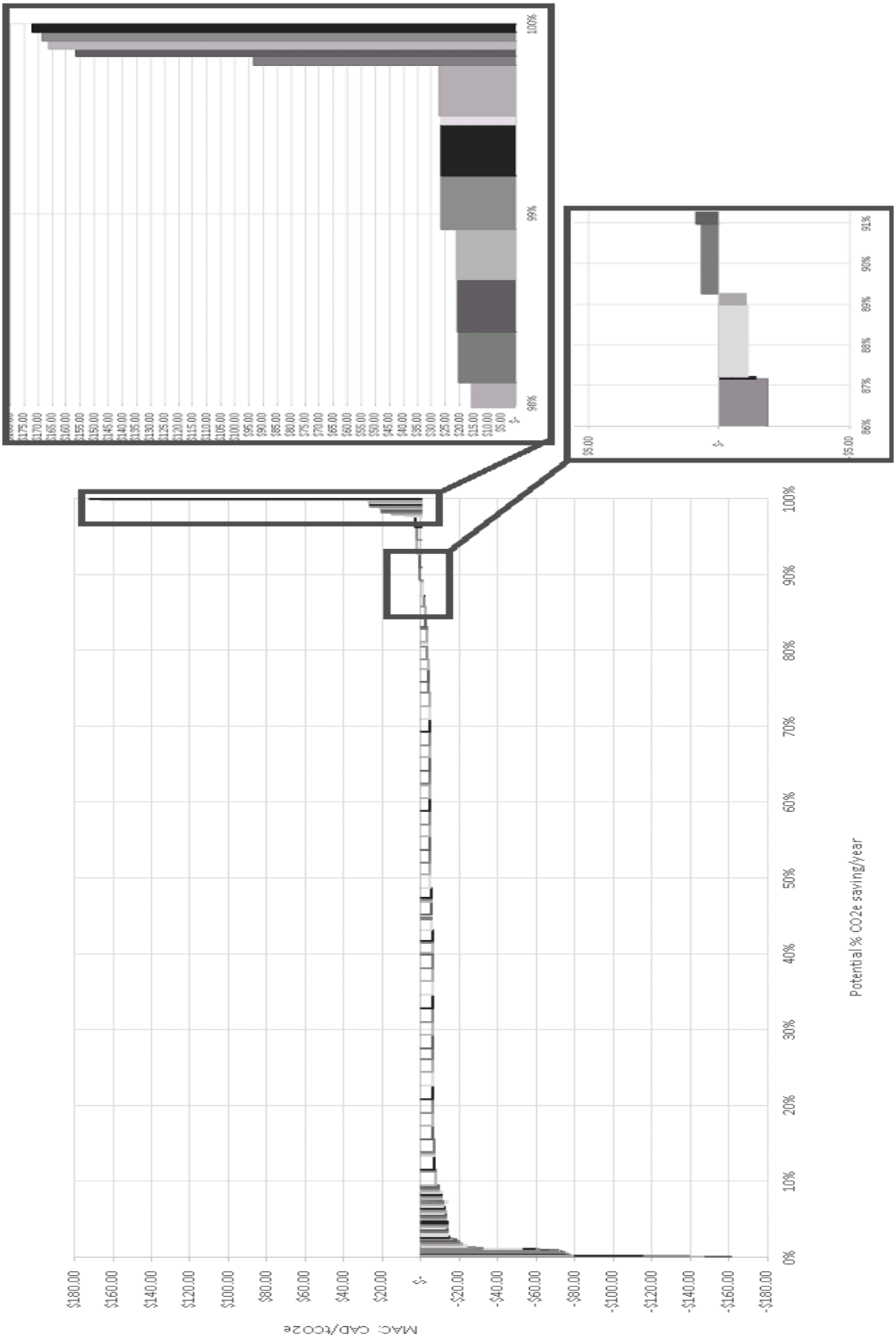

Figure 10: Courbe d'abattement des coûts marginaux

Comme on peut le voir sur la CACM, 89% des scénarios prospectifs permettent de réduire les émissions des GES, tout en augmentant les profits. Nous avons zoomé sur la zone (en bas), ce qui permet de voir quand la courbe coupe l'axe des abscisses. On constate, dans la casse du haut, qui zoome sur la partie droite de la CACM, que 99% des scénarios ont un coût inférieur à 50$ la tonne de CO_2 équivalent.

La CACM était initialement prévue comme complément d'information aux industriels. Il semble que cette représentation graphique serait également utile aux pouvoirs publics. Dans le contexte de lutte aux changements climatiques, et le débat sur le prix de la tonne de carbone sur les marchés, il serait pertinent de trouver des moyens de réduire les incertitudes du prix de la tonne de carbone (Mizrach 2012). La multiplication des exercices comme celle présentée dans ce document pourrait être pertinente, afin de déterminer les montants par tonne de carbone séquestré facilitant la mise en place de nouvelles technologies. En se basant uniquement sur ce cas d'étude, une aide de 25$ par tonne permettrait la mise en place de 98% des technologies proposées.

7. Conclusion

L'objectif de ce projet de recherche est de proposer un outil d'aide à la décision stratégique qui se distingue par son approche a posteriori ainsi que par l'utilisation de résultat d'analyses économiques et environnementales permettant d'anticiper les changements et basé sur des données spécifiques. Les résultats démontrent que l'intégration de critères environnementaux permet de générer des solutions qui n'auraient pas été visibles en regardant uniquement les aspects économiques et probablement en agrégeant tous les critères environnementaux en un score unique. La combinaison a pour intérêt de pouvoir présenter un panel de compromis entre les solutions extrêmes, qui optimise un seul des critères. Ceci permet d'offrir aux décideurs un portrait plus complet des possibilités, qui peuvent ainsi prendre une décision plus éclairée dans la planification de leurs développements futurs.

Les bâtiments sont identifiés comme une responsable de 3% d'émissions de GES mondiales par le groupe intergouvernemental d'expert sur l'évolution du climat (IPCC 2014). Plusieurs initiatives visent à réduire ces émissions, ce qui commence par la quantification des impacts de chacun des composants. Ainsi, depuis janvier 2014, la France a mis en place dans sa législation l'obligation de réaliser une déclaration environnementale de produit (DEP) (ISO 2006a) pour tous les matériaux de construction. Une DEP est basée sur les résultats d'une ACV-A. En Amérique du Nord, la réalisation d'une ACV permet d'obtenir des points pour l'obtention de la certification LEED (U.S. Green Building Council 2013). Dans ce secteur où la compétition est particulièrement vive, la détention d'une quantification environnementale est un avantage concurrentiel et la capacité de présenter une offre à plus faible impact environnemental peut permettre d'augmenter considérablement les parts de marché.

Les avantages des effets de substitution des produits du bois ont une influence sur les résultats présentés ainsi que sur les corrélations entre les critères. Il est probable que chaque catégorie de produit donne une réponse différente. Comme l'avait observé Bernier (2012) dans son analyse sur les produits pétroliers, pour lesquels les dommages sur les changements climatiques étaient prédominants. L'intérêt de ce modèle d'aide à la décision n'est pas de générer des comparaisons sectorielles, mais bien de fournir des solutions spécifiques à un industriel, quel que soit le secteur d'activité.

L'optimisation multicritère présentée ici intègre les aspects économiques et environnementaux. Afin de tendre vers outil d'aide à la décision de développement durable, il resterait à intégrer les aspects sociaux (Kloepffer 2008). Même si ceux-ci sont implicites dans le cas de cette étude, puisque dans les régions

éloignées du Québec, la bonne santé économique des entreprises permet des retombées à toute la communauté locale. Le développement de l'analyse de cycle de vie sociale est en cours depuis quelques années (Benoît et Mazijn 2013). Lorsque celui-ci sera généralisé et offrira des quantifications représentatives, malgré les difficultés de mise en contexte, l'ajout de critères ne devrait pas présenter de difficultés, autres que lors de l'interprétation des résultats.

Remerciements :
Nous tenons à remercier l'équipe du FORAC pour le soutien financier et administratif. De plus, nous tenons à souligner la participation de Mathieu Bouchard, Sébastien Lemieux et François Barriault pour leurs travaux sur l'outil de conversion vers CPLEX, Gregory Paradis pour son aide pour la programmation en Python et Philippe Marier qui à réviser le modèle mathématique. Nous remercions également le CIRAIG, plus spécifiquement Laure Patouillard, Jean-François Menard et Pascal Lesage pour le soutien dans la réalisation de l'analyse conséquentielle.

8. Bibliographie

Althaus, Hans-Jörg, Gabor Doka, Roberto Dones, Thomas Heck, Stefanie Hellweg, Roland Hischier, Thomas Nemecek, Gerald Rebitzer, Michael Spielmann, et G Wernet. 2007. « Overview and Methodology ecoinvent report No. 1 ». Dübendorf. https://www.pre-sustainability.com/download/manuals/EcoinventOverviewAndMethodology.pdf.

Azevedo, Susana G., Helena Carvalho, et V. Cruz Machado. 2011. « The influence of green practices on supply chain performance: A case study approach ». *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 47 (6): 850–871. doi:10.1016/j.tre.2011.05.017.

Benoît, Catherine, et Bernard Mazijn. 2013. « Lignes directrices pour l'analyse sociale du cycle de vie des produits ». Paris, France: Programme des Nations Unies pour l'environnement. http://site.ebrary.com/id/10667003.

Borrion, Aiduan Li, Marcelle C. McManus, et Geoffrey P. Hammond. 2012. « Environmental Life Cycle Assessment of Lignocellulosic Conversion to Ethanol: A Review ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (7): 4638-50. doi:10.1016/j.rser.2012.04.016.

Brodeur, Catherine, Jacques Cloutier, David Crowley, Xavier Desmeules, Sylvain Pigeon, et Rosalie-Maude St-Arnaud. 2008. « La production de biocombustibles solides à partir de biomasse résiduelle ou de cultures énergétiques ». EVC 032. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. https://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/EVC032.pdf.

Camaria, M., et P. Dell'Olmo. 2008. *Multi-Objective Management in Freight Logistics: Increasing Capacity, Service Level and Safety with Optimization Algorithms*. London: Springer London. http://link.springer.com/10.1007/978-1-84800-382-8.

Clark, Nigel, Mridul Gautam, Donald Lyons, Chris Atkinson, Wenwei Xie, Paul Norton, Keith Vertin, Stephen Goguen, et James Eberhardt. 1999. « On-Road Use of Fischer-Tropsch Diesel Blends ». SAE/TPS-1999-01-2251. West Virginia University (US). http://www.osti.gov/scitech/biblio/771099-road-use-fischer-tropsch-diesel-blends.

Curran, Mary Ann. 2006. « Life Cycle Assessment: principle and practice ». EPA/600/R-06 / 060. EPA. https://pdfs.semanticscholar.org/5f99/a6900925d095d6251092ce771e07a5df3d42.pdf.

D'Amours, Sophie, Mikael Rönnqvist, et Andres Weintraub. 2008. « Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry ». *INFOR: Information Systems and Operational Research* 46 (4): 265–281. doi:10.3138/infor.46.4.265.

Desrochers, Luc. 2008. « Résultats de recherches : coûts d'approvisionnement dans le Bas-Saint-Laurent et en Outaouais ». Présenté à 2e Symposium sur la valorisation de la biomasse forestière et des résidus de transformation, Gatineau.

Edenhofer, Ottmar, Ramón Pichs-Madruga, et Youba Sokona. 2012. *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Summary for Policymakers and Technical*

Summary. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate change. https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf.

Emblemsvåg, Jan. 2003. *Life-Cycle Costing: Using Activity-Based Costing and Monte Carlo Methods to Manage Future Costs and Risks*. John Wiley & Sons.

European Commission, Joint Research Centre, et Institute for Environment and Sustainability. 2010. *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General Guide for Life Cycle Assessment - Detailed Guidance.* Luxembourg: Publications Office.

FPInnovations, FPAC (Association canadienne des produits forestiers, et SCF (service canadien des forêts). 2011. « Rapport de synthèse sur la bioénergie et les produits biochimiques ». http://www.fpac.ca/publications/Bio%20Energy%20Final_Fr.pdf.

Goetschalcks, Marc, et Bernhard Fleischmann. 2008. « Strategic Network Design ». In *Supply Chain Management and Advanced Planning*, édité par Hartmut Stadtler et Christoph Kilger, 117–132. Springer Berlin Heidelberg. http://www.springerlink.com/content/rt462423l0145723/abstract/.

Greco, Salvatore, Kathrin Klamroth, Joshua D. Knowles, et Günter Rudolph. 2015. « Understanding Complexity in Multiobjective Optimization (Dagstuhl Seminar 15031) ». *Dagstuhl Reports* 5 (1). http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2015/5037/.

Hedemann, J., et U. König. 2007. *Technical Documentation of the ecoinvent Database*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.

Hermann, B. G., C. Kroeze, et W. Jawjit. 2007. « Assessing environmental performance by combining life cycle assessment, multi-criteria analysis and environmental performance indicators ». *Journal of Cleaner Production* 15 (18): 1787-96. doi:10.1016/j.jclepro.2006.04.004.

HydroQuébec. 2015. « Achats d'électricité | Marché québécois | Hydro-Québec ». http://www.hydroquebec.com/distribution/fr/marchequebecois/.

IEA, Task 38. 2002. « Greenhouse Gas Balances of Biomass and Bioenergy Systems ».

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, éd. 2014. *Climate change 2014: mitigation of climate change: Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, NY: Cambridge University Press.

ISO. 2006a. « ISO 14025 Marquages et déclarations environnementaux — Déclarations environnementales de Type III — Principes et modes opératoires ». Genève.

ISO. 2006b. *ISO 14044 Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes*. Vol. 2006. Genève.

Jolliet, Olivier, Manuele Margni, Raphaël Charles, Sébastien Humbert, Jérôme Payet, Gerald Rebitzer, et Ralph Rosenbaum. 2003. « IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 8 (6): 324–330. doi:10.1007/BF02978505.

Kesicki, Fabian, et Neil Strachan. 2011. « Marginal abatement cost (MAC) curves: confronting theory and practice ». *Environmental Science & Policy* 14 (8): 1195-1204. doi:10.1016/j.envsci.2011.08.004.

Kloepffer, Walter. 2008. « Life cycle sustainability assessment of products ». *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13 (2): 89–95. doi:10.1065/lca2008.02.376.

Koch, David. 2008. « Mixed alcohol, diesel and syngas synthesis from forest residues via gasification - an economic analysis ». Georgia Institute of Technology. https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/28131/koch_david_r_200812_mast.pdf.

Laurent, Achille-B. 2010. « Bilan énergétique et de gaz à effet de serre de la production de Granules de l'usine de Granule LG de Saint-Félicien ». http://www.granuleslg.com/public/img/userfiles/files/fiches/Granuleslg_BilanEnergetique.pdf.

Laurent, Achille-B, et Pierre-Luc Dessureault. 2015. « Analyse du cycle de vie comparative entre l'utilisation de la biomasse forestière à des fins énergétiques avec les autres sources énergétiques utilisées péalablement au CSS d'Amqui, Vallée de la Matapedia ». Chicoutimi, Qc: Chaire en éco-conseil, UQAC. http://www.reseau-biomasse.com/images/ACV_Rapport_final_Chaire_validation_Quantis_int%C3%A9gr%C3%A9_s%C3%A9curis%C3%A9.pdf.

Laurent, Achille-B., Sophie D'Amours, et Robert Beauregard. 2016. « Analyse de cycle de vie de coût basée sur la comptabilité par activités appliquée au portefeuille de produit d'une entreprise forestière innovante ». Document de travail du CIRRELT n° 2016-48. www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2016-48.pdf

Laurent, Achille-B., Jean-François Menard, Pascal Lesage, et Robert Beauregard. 2016. « Cradle-to-Gate Environmental Life Cycle Assessment of the Portfolio of an Innovative Forest Products Manufacturing Unit ». *BioResources* 11 (4): 8981-9001. doi:10.15376/biores.11.4.8981-9001.

Machani, Mahdi. 2014. « Approches d'aide à la décision pour une transformation efficace de l'industrie forestière au Canada Cas des compagnies de pâtes et papiers ». Québec, Canada: Université Laval. http://theses.ulaval.ca/archimede/meta/30789.

Mansoornejad, Behrang, Virginie Chambost, et Paul Stuart. 2010. « Integrating product portfolio design and supply chain design for the forest biorefinery ». *Computers & Chemical Engineering*, Selected papers from the 7th International Conference on the Foundations of Computer-Aided Process Design (FOCAPD, 2009, Breckenridge, Colorado, USA., 34 (9): 1497-1506. doi:10.1016/j.compchemeng.2010.02.004.

Meier, D, et O Faix. 1999. « State of the art of applied fast pyrolysis of lignocellulosic materials — a review ». *Bioresource Technology*, Bioprocessing and Characterization of Lignocellulosics, 68 (1): 71-77. doi:10.1016/S0960-8524(98)00086-8.

Mizrach, Bruce. 2012. « Integration of the global carbon markets ». *Energy Economics* 34 (1): 335-49. doi:10.1016/j.eneco.2011.10.011.

MRNF. 2008. « Critères et Indicateurs d'aménagement durable des forêts ». Québec: Ministére de Ressources Naturelles et de la Faune du gouvernement du Québec.

Murphy, Colin W., et Alissa Kendall. 2015. « Life Cycle Analysis of Biochemical Cellulosic Ethanol under Multiple Scenarios ». *GCB Bioenergy* 7 (5): 1019-33. doi:10.1111/gcbb.12204.

Nabuurs, G. J., O. Masera, K. Andrasko, P. Benitez-Ponce, R. Boer, M. Dutschke, E. Elsiddig, et al. 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.

Pellet.org. 2015. « Markets | Wood Pellet Association of Canada ». http://www.pellet.org/about/markets.

Pereyra, Victor, Michael Saunders, et Jose Castillo. 2013. « Equispaced Pareto Front Construction for Constrained Bi-Objective Optimization ». *Mathematical and Computer Modelling* 57 (9-10): 2122-31. doi:10.1016/j.mcm.2010.12.044.

Petersen, Ann Kristin, et Birger Solberg. 2005. « Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: a review of micro-level analyses from Norway and Sweden ». *Forest Policy and Economics* 7 (3): 249–259. doi:10.1016/S1389-9341(03)00063-7.

Rönnqvist, Mikael. 2003. « Optimization in forestry ». *Mathematical Programming* 97 (1): 267–284. doi:10.1007/s10107-003-0444-0.

Rönnqvist, Mikael, Sophie D'Amours, Andres Weintraub, Alejandro Jofre, Eldon Gunn, Robert G. Haight, David Martell, Alan T. Murray, et Carlos Romero. 2015. « Operations Research Challenges in Forestry: 33 Open Problems ». *Annals of Operations Research* 232 (1): 11-40. doi:10.1007/s10479-015-1907-4.

Scott, Chris. 2012. « The beginners guide to making pellets ». UK: Pelheat.com. http://www.pelheat.com/The_Beginners_Guide_To_Making_Pellets.pdf.

Shahi, Shashi, et Reino Pulkki. 2013. « Supply Chain Network Optimization of the Canadian Forest Products Industry: A Critical Review ». *American Journal of Industrial and Business Management* 3 (7): 631. doi:10.4236/ajibm.2013.37073.

Srivastava, Samir K. 2007. « Green Supply-Chain Management: A State-of-the-Art Literature Review ». *International Journal of Management Reviews* 9 (1): 53–80. doi:10.1111/j.1468-2370.2007.00202.x.

Stuart, Paul. 2006. « The Forest Biorefinery : Survival Strategy for Canada's Pulp and Paper Sector? » *Pulp & Paper Canada* 107 (6): 13-16.

Troncoso, Juan J., et Rodrigo A. Garrido. 2005. « Forestry production and logistics planning: an analysis using mixed-integer programming ». *Forest Policy and Economics* 7 (4): 625-33. doi:10.1016/j.forpol.2003.12.002.

U.S. Green Building Council. 2013. « LEED: Reference guide for buiding design and construction v4 ». Washington,: U.S. Green Building Council. http://www.usgbc.org/sites/all/assets/section/files/v4-guide-excerpts/Excerpt_v4_BDC.pdf.

Vila, Didier. 2005. « La modélisation mathématique des réseaux logistiques: procédés divergents et positionnement par anticipation. Application à l'industrie du bois d'euvre ». Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Laval. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00778631/.

Wakker, A., R. Egging, E. Van Thuijl, X. Van Tilburg, E. P. Deurwaarder, T. J. De Lange, G. Berndes, et J. Hansson. 2005. « Biofuel and Bioenergy Implementation Scenarios. Final Report of VIEWLS WP5, Modelling Studies ». ECN-RX--05-141. Energy research Centre of the Netherlands ECN. http://inis.iaea.org/Search/search.aspx?orig_q=RN:37032122.

Weidema, Bo. 2003. « Market information in life cycle assessment ». Environmental project 863. Danish Environmental Protection Agency. http://www.miljoestyrelsen.dk/udgiv/Publications/2003/87-7972-991-6/pdf/87-7972-992-4.pdf.

Yalcinoz, Tankut, et Onur Köksoy. 2007. « A multiobjective optimization method to environmental economic dispatch ». *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 29 (1): 42-50. doi:10.1016/j.ijepes.2006.03.016.