

# Modèle de conception de chaînes logistiques vertes et collaboratives pour l'industrie des produits forestiers

MARIE-PHILIPPE NAUD<sup>1</sup>, SOPHIE D'AMOURS<sup>2</sup>

<sup>1</sup> CIRRELT

Université Laval  
1065 av. de la Médecine  
Québec, Canada  
G1V 0A6  
marie-philippe.naud@cirrelt.ca

<sup>2</sup> FORAC et CIRRELT

Université Laval  
1065 av. de la Médecine  
Québec, Canada  
G1V 0A6  
[sophie.damours@gmc.ulaval.ca](mailto:sophie.damours@gmc.ulaval.ca)

---

**Résumé** - L'omniprésence de l'environnement, la hausse du prix du pétrole et la crise du bois poussent les joueurs de l'industrie des produits forestiers à repenser leur chaîne logistique. C'est à travers l'intégration de bioproduits issus de la biomasse forestière, la collaboration et la gestion de l'environnement que plusieurs voient la prospérité, la compétitivité et la rentabilité recherchées par l'industrie. Cet article présente un modèle de programmation linéaire mixte permettant la conception de chaînes logistiques collaboratives et vertes. Il représente l'élaboration d'un cadre de travail, basé sur une revue de la littérature, s'inspirant de la vision de consortium d'entreprises du constructeur automobile Volkswagen et des principes de l'analyse de cycle de vie. Bien qu'aucun résultat n'ait encore été calculé et étudié, des discussions concernant les méthodes de résolution et des possibles avenues de recherches terminent le document.

**Abstract** - Environment omnipresence, soaring oil prices and wood crisis are forcing the forest industry players to rethink their supply chain. It is through bioproducts integration (from woody biomass), collaboration and environment management that many oversee the prosperity, competitiveness and profitability expected by the industry. This paper presents a mixed-integer linear programming model for collaborative and green supply chains design. It introduces a framework, based on a literature review, inspired by Volkswagen's vision of manufacturer clusters and life cycle analysis principles. No result has been calculated and studied yet however discussions about resolution methods and possible research avenues conclude the paper.

**Mots clés** - Produits forestiers, conception de chaînes logistiques, collaboration, gaz à effet de serre, bioproduits

**Keywords** - Forest products, supply chains design, collaboration, greenhouse gases, bioproducts

---

## 1 INTRODUCTION

L'heure est aux changements pour l'industrie du bois au Canada. En effet, depuis quelques années, les nombreux acteurs de l'industrie font face à des défis grandissants et toujours plus complexes. La compétition internationale, le ralentissement économique américain, la hausse du prix du pétrole et les considérations environnementales et sociales font pression sur les entreprises canadiennes. Afin d'améliorer leur situation, plusieurs d'entre elles ont entrepris de repenser leur chaîne logistique afin d'être compétitives, rentables ainsi qu'environnementalement et socialement responsables.

En mars 2009, l'Association des produits forestiers du Canada participait au lancement du Projet de la voie biotechnologique afin de proposer une solution permettant potentiellement à l'industrie forestière de se remettre de la crise actuelle. L'avenue étudiée par ce projet concerne l'intégration de la production de bioproduits (Biocarburant, biohuile, bioplastique, produit biopharmaceutique, etc.) à l'intérieur du système actuel et le développement de nouveaux marchés de produits à forte valeur ajoutée [FPAC, 2010].

Dans le but de rendre cette nouvelle opportunité accessible et profitable à un plus grand nombre de joueurs, l'industrie voit, en la collaboration, un levier collectif favorisant la concrétisation de cette vision. Dans son projet de la voie biotechnologique, l'Association des produits forestiers du Canada affirme que cette collaboration permettrait un développement plus rapide des biotechnologies et l'accès à de nouveaux marchés pour un bon nombre d'entreprises innovatrices [FPAC, 2010]. Les types de collaborations proposées se traduiraient par un partenariat entre entreprises et centres de recherches dans le but de partager leur savoir technologique ou par un partenariat entre plusieurs entreprises concernant le partage d'infrastructures, de ressources ou des volumes d'achats afin de bénéficier, par exemple, d'économies d'échelle et de participer à une mission plus environnementale concernant la réduction d'émissions de gaz à effet de serre.

L'intégration de cette bioéconomie est donc complémentaire à la conception de chaînes logistiques visant à minimiser l'impact environnemental des activités de l'entreprise afin de satisfaire un des trois aspects du développement durable.

L'article présenté se divise comme suit : en premier lieu, une revue de la littérature couvrant les concepts de collaboration et de chaînes logistiques vertes sera présentée. La section 3 résumera les problématiques de l'industrie du bois à la base de la création du modèle de cet article. Ensuite, un modèle de conception de chaînes logistiques collaboratives et vertes sera développé afin d'étudier l'apport de ces concepts au réseau déjà en place. Finalement, des discussions concernant les méthodes de résolution et des possibles avenues de recherches termineront le document.

## 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Traditionnellement, les modèles de conception de chaînes logistiques déterminent la configuration optimale de l'ensemble des installations du réseau de l'entreprise de l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la livraison du produit final à la zone de demande. Les flux d'énergies, de combustibles fossiles et de biomasse sont généralement ignorés [Feng et al., 2010]. Or, la forêt et la transformation de la biomasse jouent un rôle significatif pour l'industrie en permettant la réduction de la consommation d'énergies non-renouvelables ainsi que la dépendance au pétrole [Feng et al., 2010]. Ces types de flux doivent donc être considérés et intégrés dans la conception de chaînes logistiques. C'est avec ces nouvelles considérations que l'on a vu naître, tout récemment, un modèle de conception de chaînes logistiques intégrées pour le bioraffinage et les produits forestiers actuels [Feng et al., 2010]. Ce modèle de décisions optimales concernent la localisation, l'allocation, la détermination des technologies et des options de capacité des unités de la chaîne logistique de produits traditionnels et de biocarburants tout en considérant les différents flux de produits, de bioproduits, d'énergie, de combustibles et de résidus de coupe et de transformation [Feng et al., 2010].

Avec l'application du protocole de Kyoto, les industries subissent une pression environnementale venant perturber la façon de construire leur réseau. En effet, la réglementation concernant les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'énergie et de ressources naturelles ainsi que la production de matières destinées à l'enfouissement poussent les entreprises à considérer l'empreinte écologique de leurs produits tout en tentant de la diminuer. L'analyse du cycle de vie est une méthode évaluant les impacts environnementaux potentiels associés à un produit, un processus ou une activité. Cette méthode identifie et quantifie l'énergie et les ressources utilisées ainsi que les déchets relâchés dans l'environnement, les converties en CO<sub>2</sub> équivalent et finalement, leur associe des impacts environnementaux ou dommages potentiels. Elle couvre le cycle de vie entier d'un produit, soit de l'extraction des matières premières en passant par le transport, la distribution et le recyclage pour terminer à la disposition du produit en fin de vie [Chaabane et al., 2010].

Depuis quelques années déjà, des recherches ont été effectuées dans le but de développer des modèles de décisions intégrant les principes de l'analyse de cycle de vie aux principes de conception de chaînes logistiques donnant lieu à l'apparition des chaînes logistiques vertes [Seuring et Muller, 2008]. La conception d'une chaîne logistique verte implique l'ajout, à l'objectif traditionnel de minimisation des coûts, d'un deuxième objectif de minimisation des impacts environnementaux des produits et processus de l'entreprise [Frota Neto et al., 2008]. Bien sûr, la notion de compromis est introduite étant donné les investissements nécessaires pour les entreprises dans des nouvelles technologies permettant la

réduction de ses émissions. Le résultat final permet de créer une courbe d'efficacité illustrant toutes les solutions possibles obtenues lors de la combinaison des deux objectifs selon le degré d'importance accordé à l'un ou l'autre des fonctions à optimiser [Frota Neto et al., 2008]. En plus d'intégrer la gestion des gaz à effet de serre dans la chaîne logistique, certaines recherches ont exploré l'intégration du marché du crédit de carbone lié au protocole de Kyoto. En effet, le modèle résultant intègre les crédits de carbone aux objectifs économiques et environnementaux en considérant l'achat et la vente de ces crédits tout en respectant les émissions maximales imposées par la réglementation [Chaabane et al., 2010].

Les articles de la littérature mentionnés précédemment présentent des modèles de conception de chaînes logistiques conventionnels se concentrant sur une entreprise en particulier sans évaluer l'impact que pourrait avoir la collaboration de cette entreprise avec une ou plusieurs autres sur leur rentabilité respective. Pour une industrie où la dispute des marchés est plus que féroce, comme l'industrie du bois, il devient important d'évaluer les avantages que peuvent retirer les différents joueurs en adoptant ce concept. La logistique et le transport, entre autre, comportent plusieurs opportunités de collaboration. Ce partenariat, à travers le partage d'infrastructures, d'informations et de savoir, vise la réduction des coûts des opérations, le gain de parts de marché, l'augmentation de la capacité ainsi que la diminution des impacts négatifs des activités industrielles sur l'environnement [Simchi-levi et al., 1999]. Effectivement, cette association, fortement profitable pour les petites et moyennes entreprises selon la littérature, permettrait à celles-ci de profiter d'économies d'échelle et surtout de concentrer leur expertise sur le développement de nouveaux produits prometteurs [Giuliani et al., 2005]. Plusieurs concepts collaboratifs ont été analysés pour l'industrie forestière tels que le partage de la demande et de l'approvisionnement entre 8 compagnies forestières [Frisk et al., 2006], le regroupement du transport pour quatre entreprises manufacturières de meubles [Audy et al., 2008], le partage d'informations et de gestion des inventaires entre un fournisseur et son client [Lehoux et al., 2007] et finalement, l'agglomération géographique et sectorielle d'usines interagissant entre elles [Schmitz, 1999].

## 3 PROBLÉMATIQUE

Afin de se démarquer de la concurrence internationale et maximiser l'utilisation de la matière première récoltée, l'industrie du bois s'intéresse au développement de produits à forte valeur ajoutée tels que les bioproduits [FPAC, 2010]. Présentement, ces produits ne représentent qu'un faible pourcentage des opérations canadiennes, mais ils connaissent une demande croissante et retiennent l'attention des gouvernements pour leur contribution à maximiser la valeur des produits du bois tout en créant de l'emploi.

Avec l'émergence grandissante de ces produits, de nouveaux joueurs s'ajouteront à l'industrie. Ces nouvelles entreprises, de toutes tailles, viendront diversifier et étendre le champ d'action de l'industrie du bois. Ce développement rapide occasionnera un besoin important en main d'œuvre spécialisée, une grande variété de procédés et surtout une rapidité d'innovation et de partage du savoir technologique. Au tout début de la transformation, une importante quantité de ressources financières devra être mobilisée pour la modification d'usines existantes ainsi que la création de multiples entreprises de biotechnologies afin de positionner le Canada face à la compétition internationale. Cependant, même en présence de produits innovateurs, les plus petits joueurs

auront difficilement accès à la technologie de pointe demandée étant donné leur faible pouvoir d'investissement. De plus, avec le système d'approvisionnement actuel et par leur volume d'achat, ces entreprises des nouvelles transformations achèteront une matière première à prix élevé étant donné leur petite quantité commandée.

De plus, la faible progression du concept de regroupement géographique collaboratif dans le domaine du bois freine le développement des stratégies proposées par l'Association des produits forestiers bien qu'il pourrait palier à ces difficultés. Il ne suffit qu'à penser au secteur de l'automobile pour mieux comprendre ce concept de collaboration et observer ses bénéfices. Par exemple, Volkswagen dans une de ses usines du Brésil, a intégré les travailleurs de ses fournisseurs de sous-assemblages dans sa chaîne de montage afin qu'ils travaillent à même la chaîne de montage des voitures pour diminuer les intermédiaires [Holmes, 2003]. Dans le même ordre d'idée, au Mexique, le constructeur a développé une agglomération industrielle avec quelques-uns de ses fournisseurs dans le but de minimiser les délais de livraison [Holmes, 2003]. Pour le moment, en ce qui concerne l'industrie forestière, très peu d'articles de la littérature ont couvert cette vision.

#### 4 MODELE

Cet article présente un modèle de conception de réseau englobant plusieurs entreprises composant l'industrie du bois en utilisant les notions de collaboration entre entreprises. Il vise à analyser l'impact qu'aurait une agglomération physique, voire un consortium, de plusieurs entreprises sur leurs coûts de gestion et d'opérations. De plus, afin d'actualiser celui-ci, des notions environnementales sont aussi couvertes. La figure 1 montre la structure du réseau étudié comprenant un ensemble de fournisseurs, de regroupement d'entreprises, de producteurs et de clients ainsi que les flux possibles entre les nœuds du système. De plus, le modèle intègre les émissions gazeuses générées par les différentes opérations du système de production-distribution. Pour le développement du modèle et la compréhension de celui-ci, un environnement déterministe et statique a été supposé.

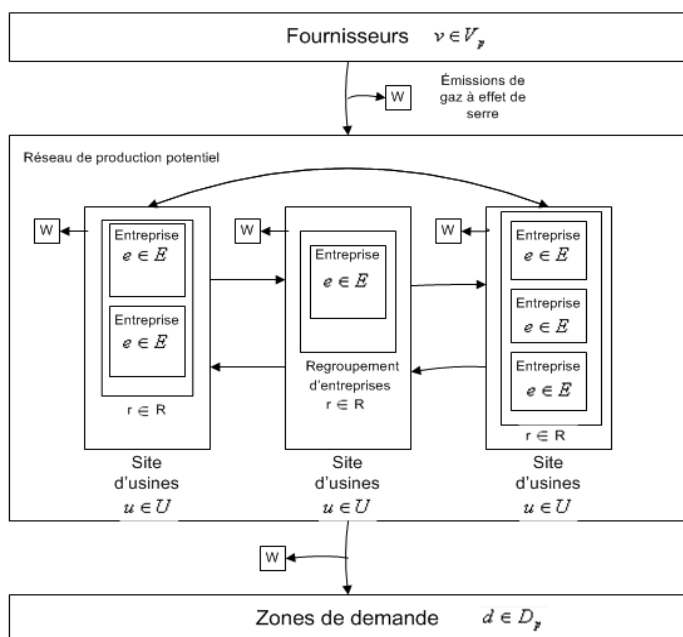
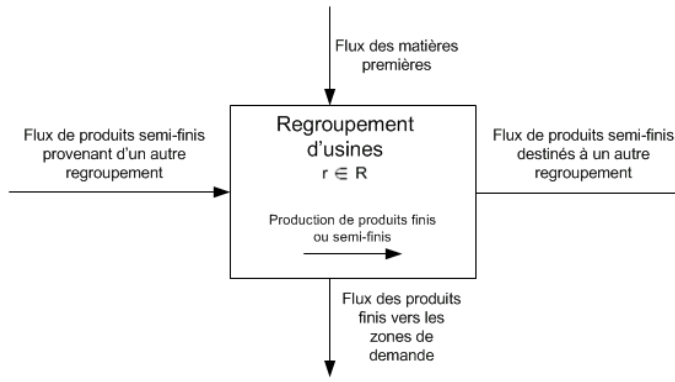


Figure 1. Exemple de réseau potentiel

Comme dans la conception de chaînes logistiques, le modèle permet la prise de décisions stratégiques. Il détermine la localisation des entreprises sur différents sites et leur alloue une famille de produits. Des décisions d'ouverture ou de fermeture de sites et d'usines sont aussi intégrées au modèle. De plus, afin de couvrir le volet collaboratif, des regroupements possibles d'usines, sous forme de complexes industriels ou consortiums, sont étudiés pour chaque site existant ou potentiel. À titre d'exemple, il est possible de penser au regroupement d'une usine de pâtes, une scierie et une usine de production de biocarburants par pyrolyse afin d'utiliser les résidus d'une installation comme matière première de l'autre tout en minimisant le transport de celle-ci. Aussi, la liqueur noire produite par l'usine de pâtes et utilisée comme combustible afin de produire de l'électricité pourrait fournir de l'énergie aux autres usines du regroupement. Dans ce cas, les usines pourraient appartenir à une ou plusieurs entreprises. Le partage du transport entre les membres d'un même regroupement est aussi considéré tant pour l'approvisionnement des matières premières communes que pour le transport vers une zone de demande. Finalement, la quantité de production par famille de produits par chaque entreprise comprise à l'intérieur d'un regroupement est déterminée ainsi que les flux de produits dans tout le réseau. Le modèle généré prend ainsi la forme d'un modèle multi-objectifs. Le premier objectif traite de la partie économique du problème en minimisant les coûts d'installation, de production, de transport, d'approvisionnement et de crédits de carbone. La deuxième partie, quant à elle, se concentre sur l'aspect environnemental du problème en tentant de minimiser les émissions de gaz à effet de serre.

La modélisation du deuxième objectif s'inspire de l'analyse de cycle de vie d'un produit. En effet, il utilise le concept d'unité fonctionnelle afin d'exprimer la fonction d'un produit ou d'un service et son accomplissement en terme d'émissions de gaz à effet de serre. Pour obtenir ce résultat, l'énergie utilisée, les ressources consommées et les déchets générés pour répondre à cette fonction sont quantifiés et transformés en  $\text{CO}_2$  équivalent. Cette conversion est possible en utilisant différentes bases de données internationales. Il est donc important de bien définir ce paramètre, car, par la suite, les unités des données du système et celles des bases de données doivent être adaptées à cette unité fonctionnelle pour l'obtention d'une valeur d'émissions finale en  $\text{CO}_2$  équivalent. De façon complémentaire, il est possible d'inclure, à l'objectif économique, la notion d'achat et de vente de crédits de carbone. Ce marché est aussi ajouté à l'objectif environnemental afin de respecter les limites d'émissions permises par les gouvernements et la législation existante. La figure 2, à la page suivante, représente les activités qui ont été considérées dans le calcul des émissions de gaz à effet de serre en  $\text{CO}_2$  équivalent pour un regroupement.

En plus des objectifs, plusieurs contraintes viennent définir le domaine du modèle. Tout d'abord, les contraintes de conception de chaînes logistiques traditionnelles sont introduites au modèle telles que les contraintes de respect des besoins en matières premières, de capacités des fournisseurs, de capacités des centres de production, d'équilibre des flux au nœud du système et de respect de la demande. En ce qui concerne le regroupement des usines, une contrainte d'espace disponible a été ajoutée au modèle ainsi qu'une contrainte limitant la sélection d'un seul regroupement par site sélectionné. Finalement, pour l'aspect environnemental, une limite d'émissions de gaz à effet de serre est imposée ainsi que des limites d'achat et de vente de crédits de carbone.



**Figure 2. Représentation des activités utilisées pour quantifier les émissions de gaz à effet de serre**

#### 4.1 Notation

- $P$  : Ensemble des familles de produits ( $p \in P$ )  
 $U$  : Ensemble de sites d'usines ( $u \in U$ )  
 $E$  : Ensemble d'entreprises de l'industrie du bois ( $e \in E$ )  
 $R$  : Ensemble de configuration de regroupement d'entreprises ( $r \in R$ )  
 $V_p$  : Ensemble de sources externes ( $v \in V_p$ )  
 $RM$  : Ensemble de matières premières ( $RM \subset P$ )  
 $D_p$  : Ensemble des zones de consommation du produit  $p$  ( $d \in D_p$ )  
 $A_{eur}$  : Coût fixe associé à l'exploitation de l'entreprise  $e$  sur le site  $u$  selon le regroupement  $r$   
 $c_{peur}$  : Coût de production du produit  $p$  par l'entreprise  $e$  sur le site  $u$  selon le regroupement  $r$   
 $f_p$  : Coût de transport du produit  $p$  sur les arcs du réseau  
 $a_{pvur}$  : Coût d'achat de la matière première  $p$  provenant du fournisseur  $v$  pour le site  $u$  selon le regroupement  $r$   
 $P_u^{CC}$  : Prix d'achat d'un crédit de carbone pour le site  $u$   
 $S_u^{CC}$  : Prix de vente d'un crédit de carbone pour le site  $u$   
 $E_{pvur}^t$  : Quantité d'émissions de gaz à effet de serre lors du transport d'une unité de matière première  $p$  d'un fournisseur  $v$  vers un site  $u$  selon le regroupement  $r$  pour un kilomètre  
 $E_{pnun'}^t$  : Quantité d'émissions de gaz à effet de serre lors du transport d'un produit  $p$  d'un regroupement  $n$  sur un site  $u$  vers un regroupement  $n'$  sur un site  $u'$  pour un kilomètre  
 $E_{pn'u'nu}^t$  : Quantité d'émissions de gaz à effet de serre lors du transport d'un produit  $p$  d'un regroupement  $n$  sur un site  $u'$  vers un regroupement  $n$  sur un site  $u$  pour un kilomètre  
 $E_{peurd}^t$  : Quantité d'émissions de gaz à effet de serre lors du transport d'un produit  $p$  d'une entreprise  $e$  sur un site  $u$  selon le regroupement  $r$  vers une zone de demande  $d$  pour un kilomètre  
 $E_{peur}^p$  : Quantité d'émissions de gaz à effet de serre lors de la production d'un produit  $p$  pour une entreprise  $e$  sur un site  $u$  selon le regroupement  $r$   
 $d_{vu}$  : Distance, en km, entre un fournisseur  $v$  et un site  $u$   
 $d_{u'u}$  : Distance, en km, entre un site  $u'$  et un site  $u$

- $d_{uu'}$  : Distance, en km, entre un site  $u$  et un site  $u'$   
 $d_{ud}$  : Distance, en km, entre un site  $u$  et une zone de demande  $d$   
 $b_{pv}$  : Capacité maximale pouvant être fournie de matière première  $p$  par le fournisseur  $v$   
 $g_{pp'}$  : Quantité de produit  $p$  requise pour fabriquer une unité de produit  $p'$   
 $b_{eur}$  : Capacité de production du produit  $p$  pour l'entreprise  $e$  sur le site  $u$  selon le regroupement  $r$   
 $e_{eur}$  : Espace requis pour implanter l'entreprise  $e$  sur le site  $u$  selon le regroupement  $r$   
 $E_u$  : Espace totale disponible au site  $u$   
 $X_{pd}$  : Quantité de produit  $p$  demandé par la zone de demande  $d$   
 $L_{CO_2}$  : Limite d'émissions de  $CO_2$  imposée au réseau  
 $L_{CO_2}^P$  : Limite d'achats de crédits de carbone imposée au réseau  
 $L_{CO_2}^S$  : Limite de ventes de crédits de carbone imposée au réseau

#### 4.2 Variables de décision

- $Y_u$  : 1 si le site  $u$  est utilisé, 0 autrement  
 $Y_{eur}$  : 1 si l'entreprise  $e$  s'installe sur le site  $u$  selon le regroupement  $r$ , 0 autrement  
 $X_{peur}$  : Quantité de produit  $p$  fabriqué par l'entreprise  $e$  sur le site  $u$  selon le regroupement  $r$   
 $F_{pnun'}$  : Quantité de produit  $p$  transporté d'un noeud  $n$  sur un site  $u$  vers un noeud  $n'$  sur un site  $u'$   
 $F_{pn'u'nu}$  : Quantité de produit  $p$  transporté d'un noeud  $n$  sur un site  $u'$  vers un noeud  $n$  sur un site  $u$   
 $F_{peue'}$  : Quantité de produit  $p$  transporté d'un noeud  $e$  sur un site  $u$  vers un noeud  $e'$  sur un site  $u'$   
 $F_{pe'u'eu}$  : Quantité de produit  $p$  transporté d'un noeud  $e$  sur un site  $u'$  vers un noeud  $e$  sur un site  $u$   
 $F_{pvur}$  : Quantité de matière première  $p$  provenant du fournisseur  $v$  selon le regroupement  $r$  sur le site  $u$   
 $F_{pveur}$  : Quantité de matière première  $p$  provenant du fournisseur  $v$  envoyée à l'entreprise  $e$  sur le site  $u$  selon le regroupement  $r$   
 $F_{peurd}$  : Quantité de produit  $p$  envoyé d'une entreprise  $e$  sur un site  $u$  selon un regroupement  $r$  vers une zone de demande  $d$   
 $CC_u^+$  : Quantité de crédits de carbone achetés par le site  $u$   
 $CC_u^-$  : Quantité de crédits de carbone vendus par le site  $u$

#### 4.3 Objectif économique ( $F_1$ )

$$F_1 = \min \underbrace{\sum_{(e,u,r)} A_{eur} Y_{eur}}_{\text{Coût des installations}} + \underbrace{\sum_{(p,e,u,r)} c_{peur} X_{peur}}_{\text{Coût de production}} + \underbrace{\sum_{(p,n,u,n',u')} f_p F_{pnun'}}_{\text{Coût des flux}} \\
 + \underbrace{\sum_{(p,v,u,r)} a_{pvur} F_{pvur}}_{\text{Coût d'acquisition}} + \underbrace{\left( \sum_u CC_u^+ P_u^{CC} - \sum_u CC_u^- S_u^{CC} \right)}_{\text{Coût crédits de Carbone}}$$

#### 4.4 Objectif environnemental ( $F_2$ )

$$F_2 = \min \sum_{(p,v,u,r)} d_{vu} E_{pvur}^t F_{pvur} + \sum_{(p,e,u,r)} E_{peur}^p X_{peur}$$

$$+ \sum_{(p,n',u',n,u)} d_{u'u} E_{pn'u'nu}^t F_{pn'u'nu} + \sum_{(p,n,u,n',u')} d_{uu'} E_{pnun'u'}^t F_{pnun'u'}$$

$$+ \sum_{(p,e,u,r,d)} d_{ud} E_{peurd}^t F_{peurd}$$

Cette fonction transforme l'énergie et les ressources consommées ainsi que les déchets produits durant les activités de transport et de production en émissions de gaz à effet de serre.

#### 4.5 Contraintes

##### 4.5.1 Contraintes de demande :

$$\sum_{r \in R} \sum_{u \in U} \sum_{e \in E} F_{peurd} = X_{pd} \quad p \in P, d \in D_p$$

##### 4.5.2 Contraintes sur l'approvisionnement en matière première :

$$\sum_{r \in R} \sum_{u \in U} F_{pvur} \leq b_{pv} \quad p \in RM, v \in V_p$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{e \in E} F_{pveur} = F_{pvur} \quad p \in RM, v \in V_p, u \in U$$

La deuxième contrainte concerne les achats groupés de chaque site. Cette équation redistribue, à travers toutes les entreprises présentes sur le site, la matière première initialement achetée en groupe.

##### 4.5.3 Contraintes d'équilibre des flux aux entreprises :

$$\sum_{e' \neq e} F_{pe'u'eu} + \sum_{v \in V} F_{pveur} - \sum_{e' \neq e} F_{peue'u'}$$

$$- \sum_{p' > p} g_{pp'} X_{peur} - \sum_{d \in D_p} F_{peurd} \geq 0$$

$$p \in P - RM, e \in E, u \in U, r \in R$$

##### 4.5.4 Contraintes de capacité des usines :

$$\sum_{p \in P} X_{peur} \leq b_{eur} Y_{eur} \quad e \in E, u \in U, r \in R$$

##### 4.5.5 Contraintes d'un seul regroupement par site :

$$\sum_{r \in R} Y_{eur} \leq 1 \quad e \in E, u \in U$$

##### 4.5.6 Contraintes d'espace

$$\sum_{e \in E} Y_{eur} e_{eur} \leq E_u Y_u \quad u \in U, r \in R$$

##### 4.5.7 Contraintes de limites d'émission de CO<sub>2</sub> :

$$\sum_{(p,v,u,r)} d_{vu} E_{pvur}^t F_{pvur} + \sum_{(p,e,u,r)} E_{peur}^p X_{peur}$$

$$+ \sum_{(p,n',u',n,u)} d_{u'u} E_{pn'u'nu}^t F_{pn'u'nu} + \sum_{(p,n,u,n',u')} d_{uu'} E_{pnun'u'}^t F_{pnun'u'}$$

$$+ \sum_{(p,e,u,r,d)} d_{ud} E_{peurd}^t F_{peurd} + \sum_u CC_u^+ + \sum_u CC_u^- \leq L_{CO_2}$$

##### 4.5.8 Contraintes d'achat et de vente de crédits de carbone :

$$\sum_u CC_u^- \leq L_{CO_2}^s \quad \sum_u CC_u^+ \leq L_{CO_2}^p$$

Pour les points 4.5.8 et 4.5.9, une limite environnementale est imposée concernant l'émission de gaz

afin de traduire les protocoles gouvernementaux en cours ou à venir et aussi concernant la vente et l'achat de crédits de carbone.

##### 4.5.9 Contraintes de non-négativité :

$$Y_u \in \{0,1\}, \forall u \in U$$

$$Y_{eu} \in \{0,1\}, \forall e \in E, u \in U$$

$$X_{peu} \geq 0, \forall p \in P, e \in E, u \in U$$

$$F_{pnn'} \geq 0, \forall (p,n,n') \in RM \times V_p \times U \cup P \times U \times U' \cup P \times U \times D_p$$

## 5 RESOLUTION

Pour cet article, aucune résolution ou étude de cas n'a été effectuée. Cependant, étant donné la nature multi-critères du modèle, deux méthodes de résolution sont présentées.

Premièrement, il serait possible de résoudre le modèle à l'aide de la méthode de Goal Programming. Cette méthode de résolution est une adaptation de la programmation linéaire afin de répondre à plusieurs objectifs. Tout d'abord, elle consiste en la résolution des objectifs du problème de façon séparée. Cette étape permet de déterminer la solution optimale reliée à chacun des objectifs, soit les buts à atteindre. L'étape suivante procède, quant à elle, à la résolution de la combinaison des deux objectifs en minimisant les écarts entre les solutions proposées et les solutions optimales obtenues lors de la première étape. Afin d'obtenir un éventail de solutions, il est possible d'accorder des poids à chacun des objectifs lors de la deuxième résolution afin de mesurer l'impact ou l'influence d'un des objectifs sur la solution retenue.

Une autre possibilité serait de construire une courbe d'efficience à partir d'une enveloppe de Pareto. La méthode de Pareto considère un résultat  $x$  d'un ensemble réalisable  $X$  comme étant efficient lorsqu'il n'y a pas d'autre résultat permettant de satisfaire autant, sinon plus, tous les joueurs. C'est donc de cette façon que l'enveloppe est construite. Pour le modèle présenté, il serait possible de tirer cette courbe en considérant les compromis coût/environnement acceptés par la société.

Dans les deux cas, ces méthodes de résolution permettraient de comparer les résultats obtenus au réseau actuel avec les coûts et émissions qu'il engendre présentement. De cette façon, il serait possible de mesurer l'intervalle présente entre la situation réelle et la solution optimale.

## 6 AVENUES DE RECHERCHES

Tout d'abord, plusieurs simulations pourront être effectuées en parallèle afin d'observer la réaction du réseau face aux changements. En effet, des scénarios résultant d'études prospectives concernant la hausse des coûts du pétrole, la demande grandissante des produits issus de la biomasse, les législations environnementales plus restrictives ou la fin du ralentissement des exportations américaines seraient à considérer. De façon complémentaire, la résolution du modèle selon différentes bases de données utilisées pour accomplir une analyse du cycle de vie finaliserait la construction d'un éventail de solutions. En effet, il existe, encore aujourd'hui, plusieurs écarts entre les bases de données à travers le monde. Ces écarts résultent, en partie, du contexte du pays dans lequel ces données sont recueillies et aussi des difficultés de conversion des unités à notre contexte canadien. Il serait tout aussi enrichissant de transformer le modèle initial en modèle stochastique afin de mieux représenter la réalité et capter le comportement du système de conception proposé.

Une contribution majeure pourrait être effectuée en modifiant le modèle dans le but d'y intégrer le troisième aspect du développement durable, soit le volet social. En effet, jusqu'à maintenant, la conception de chaînes logistiques vertes s'effectue avec l'union des sphères économique et environnementale. Or, en aucun cas, ces modèles ne considèrent l'aspect social. Il n'y a qu'à penser aux programmes de développement des régions éloignées mis de l'avant par les gouvernements pour constater une contradiction avec les modèles aux objectifs strictement économiques favorisant l'utilisation de centres de production ou de distribution près des grandes villes afin de bénéficier d'une masse de travailleurs et d'un accès rapide aux plus grandes zones de demande. Le modèle de conception de chaînes logistiques durables élaboré répondrait donc à des questions telles que : un emploi a-t-il plus de valeur lorsqu'il se situe dans la région de Montréal ou dans la région du Témiscouata ? La création d'emploi est-elle favorable dans les grandes villes ou dans les régions éloignées ?

## 7 CONCLUSION

Il est important de spécifier que le développement de ce modèle représente la définition d'une cadre de travail pour des recherches futures. Il fait partie d'une phase d'exploration des différentes visions de conception et de gestion de chaînes logistiques. De plus, cet article vise à créer un modèle excluant la prémisse qu'il ne peut y avoir qu'une seule entreprise sur un site d'affaires. Bref, il se veut une inspiration du modèle de consortiums établi par Volkswagen au Mexique et au Brésil. Pour ce faire, une révision des concepts de modélisation de chaînes logistiques traditionnelles, collaboratives, biotechnologiques et vertes a été effectuée. À l'aide de cette étape, il a été possible de créer un modèle de conception de chaînes logistiques vertes et collaboratives en y intégrant des principes provenant de la bioéconomie et du marché des crédits de carbone. Évidemment, comme l'article représente une réflexion sur des notions émergentes, la complexité a été limitée. À titre d'exemple, dans le modèle présenté, les émissions de gaz à effet de serre ont été considérées seulement lors des opérations de production et de distribution.

De plus, une grande problématique dans le concept de collaboration ou partenariat est le partage des bénéfices, car certains peuvent être difficiles à évaluer. Par exemple, supposons qu'une collaboration permette à un joueur d'accéder à un marché plus facilement et rapidement, quel sera le gain monétaire associé et partagé à l'intérieur de l'association ? Aussi, le transfert de connaissances d'une entreprise du regroupement vers une autre impliquerait-il une redevance dans l'éventualité où l'entreprise apprenante diminuerait ses coûts de production ? De telles questions laissées en suspens pourraient forcer les entreprises à se demander : pourquoi collaborer ?

## 8 REFERENCES

- Audy J.-F., D'Amours, S., Rousseau, L.-M. (2007) Collaborative planning in a log truck pickup and delivery problem. 6<sup>th</sup> Triennial Symposium on Transportation Analysis, June 10-15, Phuket Island, Thailand, 6p.
- Chaabane, A., Ramudhin, A., Paquet, M. (2010) Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. *International Journal of Production Economics*, doi:10.1016/j.ijpe.2010.10.025
- Feng, Y., D'Amours, S., Lebel, L., Noureifath, M. (Novembre 2010) Integrated Bio-Refinery and forest Products Supply Chain Network Design Using Mathematical Programming Approach (Available as a working paper CIRRELT, CIRRELT-2010-50)
- FPAC Association des Produits Forestiers du Canada (Février 2011) Le nouveau visage de l'industrie forestière canadienne : une biorevolution en devenir, Le Projet de la voie biotechnologique
- FPAC Association des produits forestiers du Canada (February 2010) Transforming Canada's Forest Products Industry Summary of findings from the future Bio-pathways Project
- Frisk M., Jömsten, K., Göthe-Lundgren, M., Rönnqvist, M. (2006) Cost allocation in collaborative forest transportation, *Scandinavian Working Papers in Economics*, NHH Discussion Paper 15/2006.
- Frota Neto J., Bloemhof-Ruwaard, J., Van Nunen, J., Van Heck, E., (2008) Designing and evaluating sustainable logistics networks, *International Journal of Production Economics*, Vol. 111, pp.195-208
- Giuliani E., Pietrobelli, C., Rabellotti, R. (2005) Upgrading in Global Value Chains: Lessons from Latin American Clusters, doi:10.1016/j.worlddev.2005.01.002
- Holmes J. (2003) Re-scaling collective bargaining: union responses to restructuring in the North American auto industry, doi:10.1016/j.geoforum.2003.06.001
- Johnson E, Heinen R, (2004) Carbon trading: time for industry involvement. *Environment International*, 30: 279-288.
- Khorringa P., Meyer-Stamer, J. (1998) New dimensions in local enterprise co-operation and development: from clusters to industrial districts, *ATAS Bulletin XI*.
- Lehoux N., D'Amours, S., Langevin, A. (2007) Vers une approche collaborative profitable pour tous les joueurs : une application à l'industrie des pâtes et papiers. (available as a Working paper CIRRELT-2007-39)
- McCormick D. (1999) African enterprise clusters and industrialization: theory and reality, *World Development*, Vol. 27, No. 9, pp. 1531-1551
- Rabellotti R., Giuliani, E., Pietrobelli, C. (2005) Upgrading in global value chains: lessons from latin American clusters, *World Development*, vol. 33, No. 4, pp. 549-573
- Seuring S., Muller, M. (2008) Core issues in sustainable supply chain management a Delphi study, *Business Strategy and the Environment* 17(8), 455-466.
- Schmitz H. (1999) Global competition and local cooperation: success and failure in the Sinos Valley, Brazil, *World Development*, Vol. 27, No. 9, pp.1627-1650
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., Simchi-Levi, E. (1999) *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Cases*, McGraw-Hill/Irwin, 321 p.