

**Améliorer la performance d'un réseau
d'approvisionnement forestier par une
meilleure gestion de l'humidité dans les
cours de transit**

**Edith Brotherton
Marie-Lou Gravel
Luc LeBel**

Octobre 2020

Bureau de Montréal
Université de Montréal
C.P. 6128, succ. Centre-Ville
Montréal (Québec) H3C 3J7
Tél : 1 514 343-7575
Télécopie : 1 514 343-7121

Bureau de Québec
Université Laval
2325, rue de la Terrasse
Pavillon Palasis-Prince, local 2415
Québec (Québec) G1V 0A6
Tél : 1 418 656 2073
Télécopie : 1 418 656 2624

Améliorer la performance d'un réseau d'approvisionnement forestier par une meilleure gestion de l'humidité dans les cours de transit

Edith Brotherton^{1,2,3,*}, Marie-Lou Gravel^{2,4}, Luc LeBel^{1,2,4}

1. Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT)
2. Consortium de recherche FORAC, Université Laval, Québec, Canada G1V 0A6
3. Département de génie mécanique, Pavillon Adrien-Pouliot, 1065, avenue de la Médecine
4. Département des sciences du bois et de la forêt, Pavillon Abitibi-Price, 2405, rue de la Terrasse

Résumé. Habituellement, dans un réseau logistique, nous essayons d'aller vite, de raccourcir le délai entre la récolte et la livraison au client final. Or parfois, prendre son temps et laisser le bois attendre dans une cour de transit est la meilleure approche. Cette étude offre quelques perspectives sur comment une meilleure gestion du transport avec des charges réduites en humidité peut aider les industriels à améliorer les performances d'un réseau d'approvisionnement forestier. En utilisant des données historiques sur un an, nous avons créé un modèle mathématique qui a une visibilité complète des inventaires disponibles et qui peut guider les décisions de transport tant pour les flux Forêt-Cour que les flux Cour-Usine. Une meilleure gestion de l'humidité requiert de l'information sur l'humidité initiale du bois à la date de récolte ainsi que sur l'humidité finale à la suite du processus de séchage dans la cour. Ainsi de juillet à décembre 2017, nous avons documenté hebdomadairement la variation de masse d'un chargement dans une cour de transit opérée par notre partenaire pour en observer les variations d'humidité. Ces données nous ont permis de générer une matrice d'humidité reliant la date d'arrivée du chargement à la cour et son expédition vers l'usine. Notre modèle contient 45 sources d'approvisionnement (municipalités) et 5 configurations de camion (3 en période normale et 2 en période de dégel). Différents scénarios sont comparés avec la situation actuelle afin d'évaluer les gains financiers et environnementaux selon les degrés de flexibilité incluant la possibilité d'effectuer le séchage (réduction de l'humidité) dans la cour, d'ajouter de la flexibilité sur les volumes livrés par période, de modifier les dates de récolte et d'utiliser un réseau de cours. Pour chacun des sept scénarios proposés, les émissions de GES reliées au transport de bois rond (forêt-cour, cour-usine, forêt-usine) ainsi que celles reliées aux activités de manutention en forêt (chargement), dans les cours à bois (déchargement et chargement) et dans la cour de l'usine (déchargement) sont estimées. Nous avons calculé les réductions de GES en tonnes de CO₂ selon le facteur d'équivalence proposé par Transition Énergétique Québec. Pour l'ensemble des scénarios alternatifs, nous avons démontré des gains en réduction des GES par rapport à l'actuel. Une meilleure gestion de l'humidité seule permet des gains de 1,6% des GES/TMA alors que des réductions plus importantes, de 5,6% à 23,4% peuvent être obtenues lorsque la gestion de l'humidité est combinée à l'optimisation du transport (flexibilité des quantités livrées et/ou des dates de récolte) dans un réseau de cours. Annuellement pour une entreprise telle que celle du partenaire industriel, c'est entre 90,17 et 411,47 tonnes CO₂eq qui peuvent être réduites par l'utilisation d'une cour de transit dans ses activités d'approvisionnement en bois.

Mots-clés : Cour à bois, gaz à effets de serre, optimisation logistique, gestion de l'humidité, approvisionnement forestier

Remerciements. Les auteurs souhaitent remercier le consortium de recherche FORAC et ses partenaires, de même que le Centre d'innovation en logistique et chaîne d'approvisionnement durable (CILCAD) pour le soutien financier au projet. Ce projet n'aurait pas été un succès sans la participation de nos collaborateurs et partenaires industriels tout au long du projet.

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.

*Auteure correspondante : Edith.Brotherton@cirrelt.ca

1. Introduction

1.1. Description de l'étude

Notre cas d'étude porte sur une usine de papiers d'impression située en Estrie. Elle est la plus grande utilisatrice de bois de trituration* feuillu au Québec et de bois issu de la forêt privée du Québec. Son réseau d'approvisionnement inclut différentes sources dont : le bois rond de forêt publique, les entrepreneurs sur des terrains privés de l'entreprise, le bois rond de syndicats de producteurs de bois, le bois rond et les copeaux provenant de particuliers et d'usines de transformations. En considérant toutes ces provenances, le rayon d'approvisionnement moyen est de 191 km (Lemelin, 2015). Dans certains cas, le bois récolté origine de la forêt et est livré directement à l'entrée de l'usine. Dans d'autres cas, le bois va transiter par un centre de tri (exemple : site Vallières en Mauricie) ou par une cour de transit.

- Un centre de tri (ou cour de triage) a pour but de maximiser la valeur du bois. C'est un lieu où le bois est concentré, où le potentiel de chaque tige est examiné, où une décision est prise à savoir quelles parties de la tige conviennent mieux à quels produits finis et où la tige est coupée en billes selon la décision prise (Blinn, 1984)
- Une cour de transit vise principalement à réduire les coûts de transport par une amélioration de l'efficacité du transport en amont et en aval. C'est un lieu où le bois est entreposé de façon temporaire avant d'être redirigé vers sa destination finale.

La consommation annuelle de l'usine est d'environ 900 000 tonnes anhydres de fibres (soit environ 1,7 M m³) dont 74 % provient du Québec. Notre projet vise plus spécifiquement l'allègement des charges par la gestion de l'humidité du bois rond dans les cours de transit et l'évaluation des réductions en GES associées.

L'humidité du bois rond varie selon sa durée de stockage dans la cour et la période de l'année où il est récolté. Sa réduction est une avenue prometteuse afin d'augmenter la quantité de bois transportée par livraison.

La gestion de l'humidité du bois rond dans les cours de transit a le potentiel de réduire les émissions de GES liées à l'approvisionnement en bois en ayant un impact sur le transport de bois rond en aval de la cour de transit, ainsi qu'aux manutentions dans la cour à bois. Actuellement, l'usine paie le bois reçu en tonne métrique anhydre (TMA). Ce choix implique une conversion de mesure, ainsi les chargements pesés en tonne métrique verte (TMV) sont ajustés d'après des taux d'humidité. Le bois provenant directement de la forêt est tributaire du transport et il est difficile d'en diminuer l'humidité sans recourir à une cour.

Dans certains cas, l'usine et ses fournisseurs de fibres utilisent des cours de transit pour faciliter le transport. Bien que certains gestionnaires de cours tiennent compte de l'humidité (selon leur expérience) afin de transporter le bois au moment le plus profitable, il n'y a pas de méthodes formelles de gestion de l'humidité actuellement en place dans l'ensemble des cours. Ainsi le taux d'humidité du bois en inventaire peut varier grandement d'une cour à l'autre. En mettant en place les incitatifs appropriés, il serait possible de mieux contrôler l'humidité de la matière première pour l'ensemble des cours qui approvisionnent l'usine.

Cette étude s'intéresse au défi de l'approvisionnement en bois de trituration feuillu au Québec. La réduction des GES nécessite une compréhension des processus d'approvisionnements du partenaire ainsi qu'une compréhension des contraintes et particularités de son approvisionnement en matière première (bois rond et copeaux).

* Bois de faible qualité ou d'essence peu recherchée pour le sciage ou le déroulage.

1.2. Potentiel et défi de l'utilisation des cours de transit

Les cours de transit s'insèrent dans une stratégie d'approvisionnement dans le but principal d'optimiser les activités de transport. « C'est un lieu où le bois est entreposé de façon temporaire avant d'être redirigé vers sa destination. »[†]. Toutefois, le simple fait de faire passer le bois rond par une cour de transit ne garantit pas des gains.

La gestion de l'humidité nécessite de prendre en compte le transport de bois rond en amont et en aval de la cour de transit, ainsi que les manutentions dans la cour à bois. Il faut également déterminer la durée de stockage selon les paramètres du site (exemple : température, soleil, vent) en considérant l'humidité initiale à la date de récolte. L'exploitation maximale de la capacité de transport est une bonne pratique d'opération des cours qui a aussi été soulevée dans une étude précédente (Brotherton, Gravel, LeBel, & Trzcianowska, 2017). Un roulement adéquat du bois pourrait permettre une baisse de la masse brute d'un camion standard quatre essieux de 3 à 9 % pour le feuillu selon les observations préliminaires effectuées.

Une meilleure gestion des approvisionnements permettrait d'utiliser plus efficacement les cours de transit et ainsi s'assurer d'un bilan économique plus favorable. Les gains peuvent être influencé par le contexte d'approvisionnement (provenance du bois, produits acceptés, saisonnalité, flotte de transport, réseau de cours en place). Nous allons ainsi proposer une méthode de gestion de l'humidité du bois transitant (ou non) par une cour afin d'alléger la charge transportée et ainsi réduire la consommation en carburant des camions approvisionnant l'usine.

1.3. Limites et portée de l'étude

Dans le cadre de cette étude, nous avons développé une approche permettant de produire des résultats concrets tout en offrant la possibilité de reproduire la méthodologie pour d'autres cas industriels. Les analyses et résultats présentés portent sur le **bois rond d'essences feuillues, excluant le tremble**. Le tremble a des caractéristiques (densité, humidité) qui diffèrent suffisamment des autres essences feuillues pour nécessiter une stratégie d'approvisionnement distincte. Le partenaire pourrait cependant reproduire la méthodologie pour cette essence.

Lors de l'étude précédente CILCAD sur les centres de tri et les cours de transit en Mauricie, nous avons observé quelques différences fondamentales entre les cours de transit gérée par notre partenaire industriel et celles appartenant à une tierce partie (Brotherton, Gravel, LeBel, & Trzcianowska, 2017). En effet, le point de découplage dans la chaîne de valeur n'est pas au même endroit. Dans les cours appartenant à un tiers, les flux de bois sont poussés vers les cours et notre partenaire n'a pas de données précises sur ce bois tant qu'il n'est pas livré à l'usine après un transit dans la cour. De plus, il ne peut pas gérer les décisions de transport vers les cours. Dans les cours de transit gérées par notre partenaire, il possède une visibilité de l'inventaire de la cour et peut influencer les décisions de transport tant pour les flux Forêt-Cour que les flux Cour-Usine. Compte tenu de cette réalité, **nous avons exclu le bois passant par les cours d'un tiers. Nous tenons compte du bois provenant directement de la forêt, ainsi que du bois transitant déjà via une cour gérée par notre partenaire.**

[†] Définition proposée dans le CILCAD 1

2. Méthodologie utilisée

Pour évaluer le potentiel d'une meilleure gestion de l'humidité dans les cours de transit, plusieurs étapes doivent être franchies. Tout d'abord, nous avons fait le **portrait actuel de l'approvisionnement** afin de créer un scénario initial représentatif de la réalité du partenaire pour une année de référence. Ce scénario initial a été utilisé comme comparatif avec les autres scénarios. La **documentation de l'humidité réelle** pour un chargement ainsi que des recherches documentaires nous ont permis de créer une matrice de variation du taux d'humidité du bois durant l'année et de définir certains facteurs d'influence pour notre cas d'étude. Cela a nécessité la mise en place d'un protocole de collecte de données. Ainsi, un chargement de bois a été pesé à intervalle régulier sur une période de 6 mois pour connaître la variation réelle de masse. En parallèle, le taux d'humidité d'échantillons du chargement a été mesuré en laboratoire. Durant la même période, une sonde météo a fourni de l'information en temps réel sur les conditions atmosphériques. Par la suite, connaissant les différentes options alternatives de gestion en lien avec l'humidité, nous avons **élaboré des scénarios** qui ont ensuite été quantifiés. La méthode utilisée pour le calcul des GES est la même pour tous les scénarios actuels et elle est conforme à la norme ISO 14064.

Les mouvements de marchandises pertinents ont été identifiés et quantifiés autant pour le scénario de départ que pour la version améliorée incluant la gestion de l'humidité du bois. La réduction des émissions a été calculée à partir du facteur de consommation des véhicules utilisés et du facteur d'émission du carburant diesel selon la distance totale parcourue. L'étude réalisée a recensé les réceptions issues du transport de bois rond feuillu sur un an (données réelles de 2016). Nous avons considéré que ces données sont représentatives des années à venir.

Les émissions de GES prises en compte dans cette étude sont celles reliées au transport de bois rond et celles reliées aux activités de manutention en forêt (chargement), dans les cours à bois (déchargement et chargement) et dans la cour de l'usine (déchargement). L'estimation de la quantité de carburant liée au transport est faite à partir des flux de bois et du CO₂ équivalent émanant du diesel et est formulé comme suit (Équation 1).

Équation 1: Émissions de GES liées au transport de bois pour le projet

$$E = F \sum_i \sum_j \sum_k N_{ijk} 2D_i \sum_n P_{in} C_{jkn}$$

E = Émissions totales (gCO₂eq)

F = Facteurs canadiens d'émissions canadien du diesel (g/L)

N_{ij} = Nombre de voyages sur la paire Origine/Destination i, du type de camion j

D_i = Longueur de la paire Origine/Destination i (km/100)

C_j = Consommation du type de camion j, (L/100km)

i = Paire origine/destination

j = Type de camion

L'estimation de la quantité de carburant liée aux manutentions dans ce projet est faite à partir des heures machines productives liées au chargement et au déchargement de camions et de la consommation de diesel des équipements (Équation 2).

Équation 2 : Émissions de GES liées aux manutentions pour le projet

$$E = FCH$$

E = Émissions totales (gCO₂eq)

F = Facteurs d'émissions canadien du diesel (g/L)

C = Consommation d'une chargeuse, (L/hmp)

H = Heures-machines productives des chargeuses (h)

Le facteur d'émissions du diesel utilisé est présenté au Tableau 1.

Tableau 1 : Facteur d'émissions du diesel utilisé (Transition Énergétique Québec, 2014)

Type d'énergie	Facteur d'émission
	(g/L)
	CO _{2eq}
Diesel	2790

2.1. Modèles mathématiques

Pour ce projet, nous avons adaptés et combiné les avantages de trois modèles mathématiques d'optimisation dans la plateforme LogiLab afin d'arriver à un outil qui répond aux objectifs de l'étude qui sont de réduire le coût d'approvisionnement tout en diminuant la quantité de GES émis (comparativement à la situation initiale). Le modèle retenu devait permettre une traçabilité du bois dans le temps et inclure la notion de chargement complet d'une flotte de transport hétérogène. La prise compte de chargement complet complexifie la résolution du modèle mathématique, mais elle est nécessaire pour permettre le calcul précis des émissions de GES. La notion de dégel devait aussi être prise en compte pour offrir des solutions cohérentes avec la réalité du réseau routier québécois. Les modèles qui ont servi de base sont présentés au Tableau 2

Tableau 2 : Comparaison des modèles existants

Référence	Fonction objectif	Avantages	Lacunes
(de Almeida Sfeir, Junior, Ruiz, & LeBel, 2019)	Minimisation des coûts (transport, manutentions et opération des cours)	Inclus les restrictions de charge durant le dégel et le séchage du bois durant le stockage Notion de truckload, et de zones de dégel	- Le fait d'utiliser des <u>pénalités</u> de coûts pour tenir compte du séchage et du dégel fait que le nombre de camion réel utilisé est difficilement calculable (ceci est requis pour la consommation de carburant et le calcul des GES)
(Gautam, LeBel, & Carle, 2017)	Minimisation des coûts (transport, manutentions et opération des cours)	Inclus les restrictions de charge durant le dégel et le séchage du bois durant le stockage. - Utilisation d'une courbe d'humidité - Tient compte du coût supplémentaire de maintenir des opérations en forêt.	- Coût de transport agrégé (taux horaire) qui ne fournit pas d'information sur le carburant consommé - Aucune notion de « truckload », ce qui est critique pour évaluer le carburant consommé. - Aucune notion de période de dégel
(Morneau-Pereira, Arabi, Ouhimmou, Gaudreault, & Nourelfath, 2014)	Maximisation de la valeur	- Modèle utilisé, testé, validé, utilisé dans d'autres projets.	- Maximisation de valeur et non minimisation des GES
Plateforme LogiLab	Maximisation de la valeur	- Soutien technique à l'interne - Plate-forme conviviale évitant la programmation fastidieuse du cas - En évolution (notion de truckload sur la liste des développements)	- N'est pas conçu initialement pour permettre la traçabilité des périodes (complexifie la gestion de l'humidité) - Notion de truckload partiellement prise en compte

Après avoir fait l'évaluation des options disponibles et des modèles existants, un nouveau modèle a été créé dans la plateforme LogiLab. Le modèle permet de considérer le bois provenant de différentes sources, de simuler une flotte de transport par camion hétérogène, d'intégrer une cour de transit pour le conditionnement du bois, de tenir compte des périodes de gel et dégel ainsi que d'une variation de l'humidité dépendant de (i) la date de disponibilité du bois en forêt et de (ii) le temps passé dans la cour.

Le modèle est utilisé afin de déterminer : quand s'approvisionner de chacune des sources de bois, si le chargement doit transiter (ou non) par une cour, combien de temps le bois doit passer dans la cour, quel camion utiliser par chargement tant de la forêt vers la cour, que de la cour vers l'usine.

Le modèle est soumis à certaines contraintes opérationnelles dont notamment une quantité maximum de bois disponible pour chaque source, pour chaque période, le nombre de camions de chaque type (nous considérons la flotte actuelle et sa limite en b-train), la quantité maximum de bois pouvant être stocké dans la cour.

2.2. Provenance des données et hypothèses

L'information nécessaire au calcul des émissions de GES provient de trois sources :

- Des données réelles obtenues auprès du partenaire (historiques des transactions 2013-2016 principalement)
- Des données génériques obtenues à partir de FPInterface[‡]
- De l'information de travaux précédents réalisés par FORAC

Carburant :

Le facteur moyen utilisé pour le prix du diesel est de 1,25\$/L diesel.

Camions :

- Les spécifications de charge viennent d'informations fournies par le partenaire à partir des données exhaustives sur leur flotte de transport et de travaux d'analyse effectués dans la cadre d'un stage FORAC.
- Les consommations de carburant des types de camions sont fournies par le catalogue intégré à la plate-forme FPInterface et validées par des études internes du partenaire sur sa flotte.

Paires origines destinations :

Le calcul des distances s'est fait en s'inspirant de la méthodologie utilisé lors d'un stage FORAC précédent réalisé avec le partenaire industriel (Lemelin, 2015). L'origine est la municipalité inscrite à la transaction et la destination est une adresse (cour ou usine). Le calcul automatique de la distance est fait dans Google Map via un outil Excel. Cette façon de faire nous assure un réseau routier à jour. Une comparaison avec les distances calculées par le stagiaire a été faite pour combler les paires manquantes, ajouter de nouveaux nœuds et valider certaines données.

Nous avons fait l'hypothèse que le bois provenant de municipalités du Québec était transporté principalement sur route pavée, avec une vitesse moyenne de 70 km/h.

[‡] Plate-forme de simulation pour les activités d'approvisionnement forestier utilisant des données basées sur plusieurs études menées dans le passé au Québec et au Canada (FPInnovations, 2012).

Humidité :

Le taux d'humidité moyen initial du bois livré de la forêt est basé sur des données historiques fournies par le partenaire, tel qu'illustré à la Figure 1. À noter que les valeurs en pourcentage (axe Y) ont été omises du graphique à la demande du partenaire. Les taux utilisés sont les taux de fibre par unité de masse (TMA/TMV) fourni pour le paiement des fournisseurs de bois privé. Les taux appliqués varient mensuellement et sont mis à jour à chaque année. Ce taux d'humidité initial est utilisé pour modéliser le moment habituel de livraison du bois, qui dépend largement de la demande (quantité et qualité) des produits autres que la pâte dans une forêt.

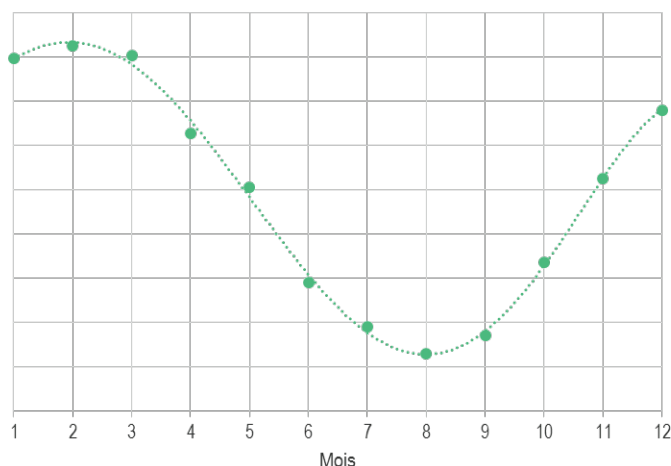


Figure 1 : Profil annuel de l'humidité initiale du bois provenant de la forêt, selon le mois de disponibilité

Chargement et flotte :

La quantité totale de fibre reçue (TMA) et le nombre de réceptions ont légèrement augmenté au cours des dernières années. Pour 2018, la quantité de fibre reçue représente environ 125 voyages de camion, 7 jours sur sept, 365 jours par année. Le ratio de fibre transportée par déplacement s'est maintenu durant cette période avec une valeur de 18,7 TMA/voyage en moyenne.

L'usine est approvisionnée par plusieurs configurations de transport correspondant à des couples : camions et remorques. Les configurations « vedettes » sont les configurations A68 (57 500 kg) et A90 (62 500 kg). Ces deux configurations ont été utilisées dans le cadre du projet. Également, bien que l'usine n'aie pas directement accès à un chemin forestier, une partie de son approvisionnement arrive de la forêt par camions hors norme en transitant par des cours. Un type de camion hors norme (H-N) sera aussi pris en compte dans le cadre du projet. Le Tableau 3 présente les types de camions (configurations) utilisées dans le cadre du projet avec les masses selon les périodes de dégel ainsi que les consommations de carburant.

Tableau 3 : Spécifications des types de camions utilisés pour l'étude

Configuration	KG brut légal	TMV nette Hors dégel	TMV nette Dégel	Consommation (L/100km)
A68	57 500	38	31	56
A90	62 500	41	34	59
H-N	N/A	60	N/A	90

Localisation et caractérisation du réseau d'approvisionnement

Les sources de bois rond considérées dans l'étude correspondent aux principales municipalités approvisionnant l'usine en bois privé. Pour l'année 2016, 45 municipalités sont prises en compte. Dans l'analyse préliminaire des données, nous avons observé que certaines sources sont plus près d'une cour de transit que de l'usine, alors que d'autres sources sont plus près de l'usine que de la cour.

Tel qu'illustré à la Figure 2 par les teintes de bleus (plus le bleu est foncé plus la quantité de fibre provenance de cette source est grande), l'approvisionnement de l'usine provient principalement des municipalités du sud du Québec. Le réseau de cours potentiel est illustré avec des points jaunes. Dans une première phase (section 4.1), une seule cour a été sélectionnée (voir encadré vert : cour initiale). Des mesures de l'humidité ont été faites dans cette cour selon un protocole bien précis (voir Section 3). Dans une seconde phase (présentée à partir de la section 4.2), un réseau de cours élargi a été pris en compte. Ce réseau comprend quatre sites, soit la cour initiale, une cour au SUD, une cour au NORD et une cour à l'USINE. Nous considérons les coûts d'ouverture de ces installations comme nuls, car ce sont des cours déjà existantes.

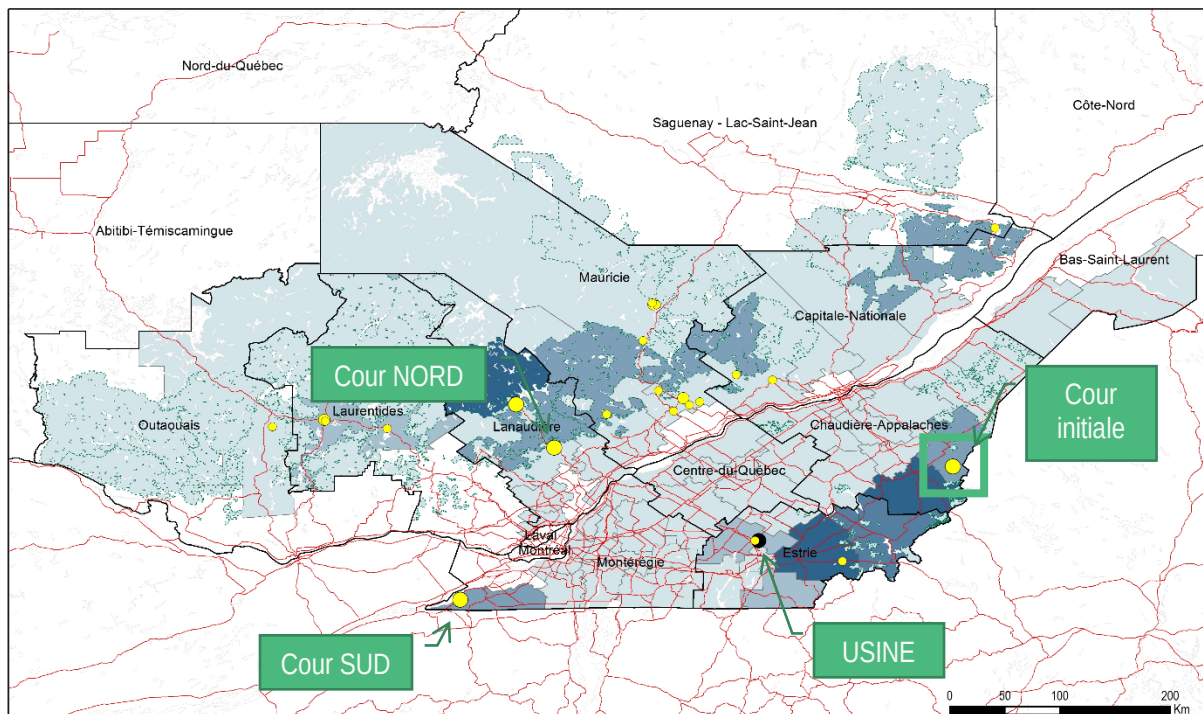


Figure 2 : Localisation des sources d'approvisionnement (en bleu) et des cours sélectionnées (en vert)

3. Documentation de l'humidité

3.1.Échantillon et portrait des données

Une remorque contenant cinq arrimes de bois tronçonné, d'essences « feuillu mélangé », a été mise de côté dans la cour sélectionnée afin de récolter des données de juillet à décembre 2017. Pour mesurer l'humidité de départ de ce chargement, nous avons prélevé neuf rondelles de bois sur trois arrimes en début de collecte de données. Les rondelles prélevées ont été amenées au laboratoire de sciences du bois de l'Université Laval et séchées en étuves durant une période de 72 heures. L'humidité finale a été mesurée en prélevant une autre rondelle sur les billes en décembre de la même année. Ainsi il a été possible de déterminer le contenu en eau du chargement au départ, puis à en valider le contenu final. Le détail de la localisation des arrimes sélectionnées et des rondelles prélevées sur chaque arrime est présenté à la Figure 3.



Figure 3 : Aperçu du chargement et localisation des rondelles prélevées sur la remorque

Ces données sur l'humidité du bois ont ensuite été combinées avec les données de masse totale de la remorque pour établir les variations périodiques du taux d'humidité. La Figure 4 présente une fiche de la variation totale de masse de notre remorque au cours des expérimentations.

FICHE SOMMAIRE DES PESÉES			
LOCALISATION		NOMBRE DE PESÉES	
		21	
PESÉE #1	2017-07-17 8:00	72 360	lbs nette
DERNIÈRE PESÉE	2017-12-04 17:30	64 200	lbs nette

Figure 4 : Fiche sommaire des pesées de juillet à décembre 2017

Une fiche présentant un portrait global des rondelles permet d'estimer le diamètre moyen[§] des billes, les essences et les taux d'humidité initial et final de son contenu en fonction des différentes arrimes (Figure 5). Ce portrait qui a été présenté au partenaire permet de s'assurer que l'échantillon est représentatif de l'approvisionnement et que les résultats de l'étude seront valides pour du bois présentant des caractéristiques similaires.

[§] Le diamètre a été mesuré, sans distinction faite des gros et fins bouts.

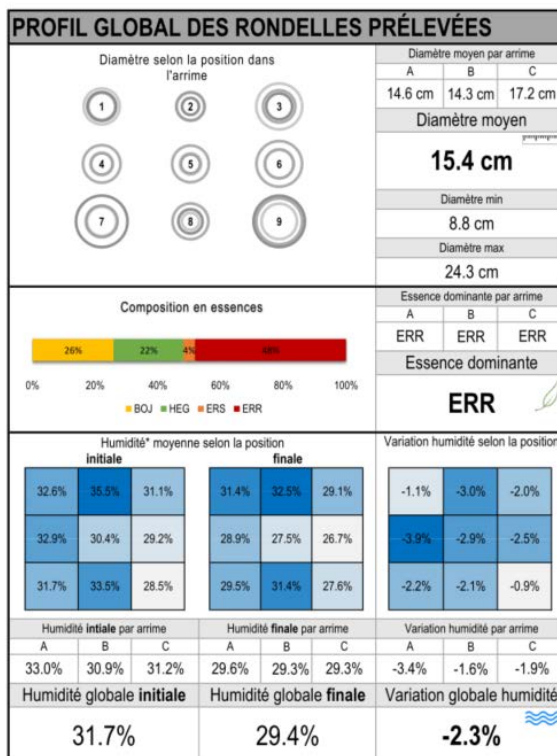


Figure 5 : Fiche présentant le portrait des rondelles prélevées sur la remorque

Des données de sondes météo incluant les conditions atmosphériques aux 15 minutes ont été utilisées comme facteur permettant d'expliquer la variation d'humidité hebdomadaire du chargement. La Figure 6 présente un aperçu des données disponibles qui sont compilées à chaque pesée, soit les données pour les 7 derniers jours (précédant la mesure) ainsi que pour les dernières 24 heures.

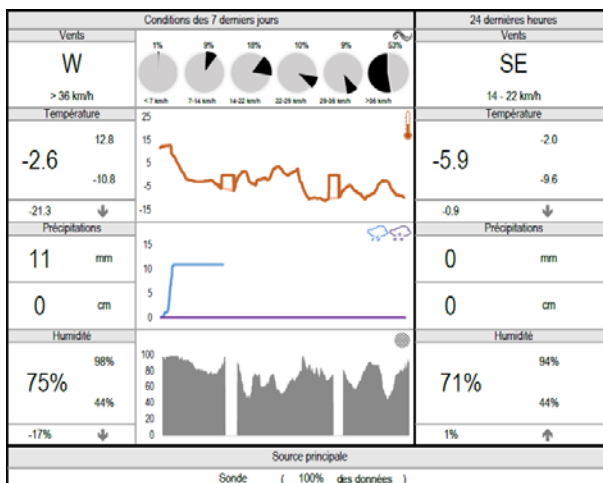


Figure 6 : Exemple d'analyse de variations météo en lien avec la variation de l'humidité

3.2.Création d'une matrice de variation de l'humidité en fonction du début et de la fin du stockage

La matrice d'humidité développée (Figure 7) vise aider à établir un calendrier de livraisons hebdomadaire en début d'année qui optimise le moment de la livraison et l'utilisation de la cour de transit pour chacune des sources de bois. Pour ce faire, la variation de l'humidité du bois selon le moment d'arrivée d'un chargement dans la cour et le moment

où son contenu sort de la cour pour être livré à l'usine est représenté. Comme il y a une rotation complète du bois contenu dans la cour chaque année, la matrice a été établie pour une durée de stockage maximum de 52 semaines.

Nous avons utilisé les échantillons (rondelles) obtenus dans la cour pour les mois de juillet à décembre. Nous avons posé les hypothèses suivantes pour les mois de l'année pour lesquels nous n'avons pas d'échantillons : mars est l'équivalent de novembre ; avril est comme août ; mai et juin sont comme juillet ; aucune variation de l'humidité de décembre à février car nous sommes en gel). L'avantage d'une telle matrice est qu'elle peut être bonifiée par des échantillons supplémentaires collectés dans la cour ou provenant directement de la forêt.

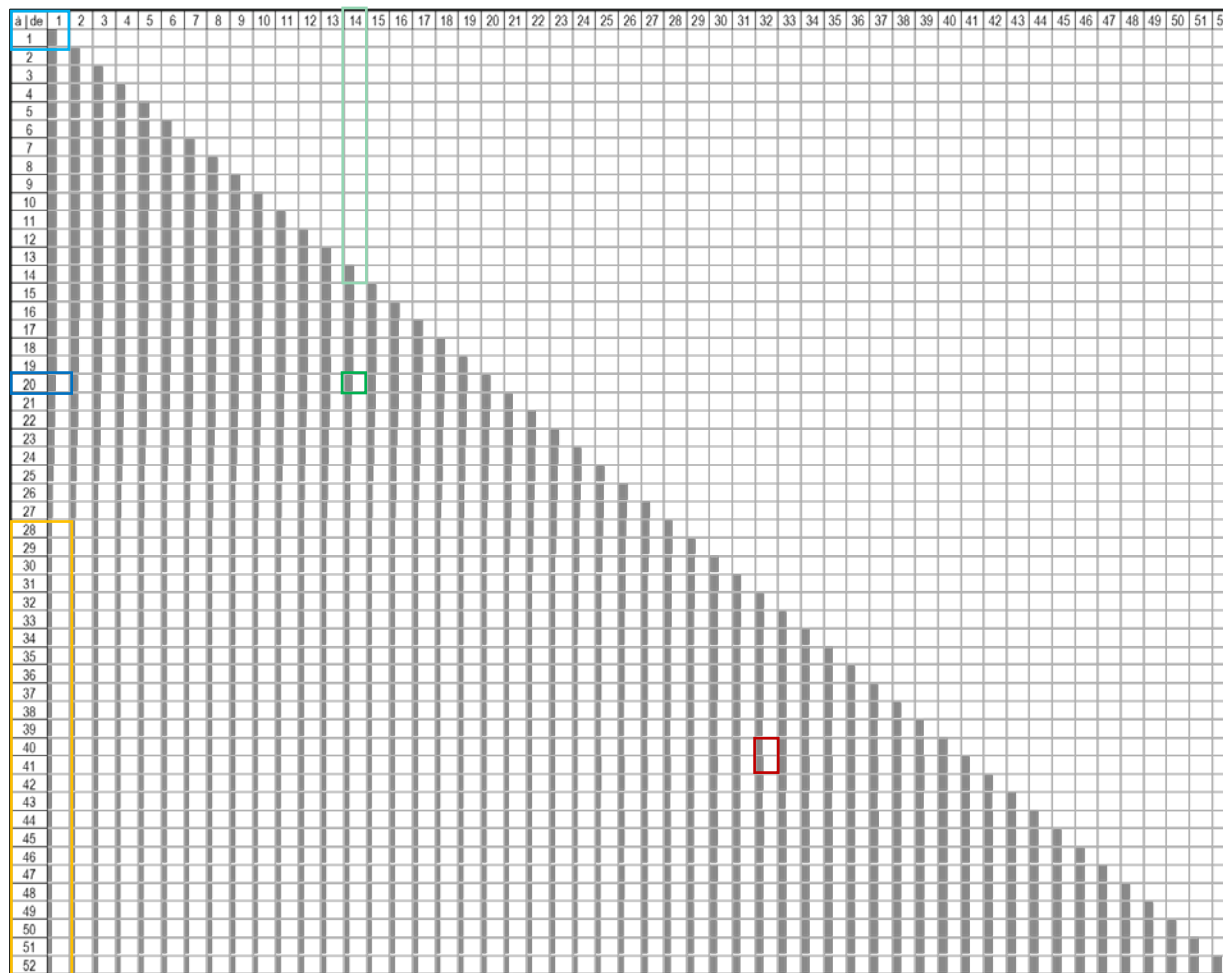


Figure 7 : Matrice de l'humidité hebdomadaire dans la cour en fonction de la semaine d'arrivée (DE) et de départ (À).

Cette figure s'interprète à partir de la semaine d'arrivée (ligne du haut) jusqu'à la semaine de sortie (première colonne). Par exemple, le bois reçu à la semaine #1 a le taux d'humidité initial de janvier tel que présenté à la Figure 1. Si le bois repart vers l'usine la même semaine, il conservera ce taux (encadré bleu clair). Par contre s'il reste dans la cour et quitte à la semaine #20, il aura alors le taux d'humidité final (encadré bleu foncé). La différence entre la taille des rectangles gris correspond à la réduction d'humidité. Du bois reçu à la semaine #14 (encadré vert clair) aura le taux d'humidité d'avril (*qui est inférieur à janvier selon la Figure 1*), il pourra ensuite sécher dans la cour et aura un taux final à la semaine #20 différent de celui reçu à la semaine #1. Dans certains cas, nous observons des variations positives de l'humidité (encadré rouge foncé) où le bois reprend de l'humidité. Il est important d'identifier ces périodes et de transporter le bois avant lorsque possible. Finalement après un certain temps dans la cour, le bois atteint son humidité minimale et aucune réduction supplémentaire n'est possible (encadré orange), il est alors souhaitable d'effectuer le transport de ce bois en priorité, s'il correspond aux besoins de l'usine, afin de libérer de l'espace de stockage dans la cour.

4. Expérimentations et réductions potentielles des émissions de GES

Le scénario de base qui a été modélisé dans LogiLab contient 45 zones d'approvisionnement forêt ainsi qu'une cour de transit. Trois types de camions sont considérés, soit un camion standard quatre essieux, un camion b-train et un camion hors-norme. Le camion hors-norme n'étant pas autorisé sur les routes publiques, il sert uniquement à alimenter la cour sélectionnée à partir de forêt du Maine, États-Unis. Nous avons utilisé l'historique de l'entreprise pour les volumes à approvisionner ainsi que les périodes de dégel de 2016.

4.1. Une seule cour autorisée

Les premières expérimentations effectuées ont permis de mesurer l'impact de la réduction de l'humidité en transitant par une cour à bois. En incluant la situation actuelle, ce sont ainsi quatre scénarios qui ont été comparés (Tableau 4). Ces scénarios varient selon la flexibilité permise dans les règles d'opérations. Une valeur de [-] signifie qu'il n'y a aucune flexibilité; le modèle utilise alors des valeurs historiques réelles et il ne peut pas tenir compte de ce paramètre lors de l'optimisation. L'état actuel correspond au scénario S1.

Le paramètre A représente les différentes périodes ou « dates autorisées » pour chaque zone d'approvisionnement, une valeur de [-] signifie que le modèle peut seulement utiliser les sources d'approvisionnement aux dates historiques, si la case indique [oui], le modèle peut alors choisir parmi toutes les périodes de l'horizon de planification. Le paramètre B représente la « quantité » en volume qui est extraite d'une zone d'approvisionnement à une période donnée, la valeur [-] signifie que les volumes extraits seront exactement ceux de l'historique alors que le [oui] indique une flexibilité. Le paramètre C représente la « quantité de la cour » qui est expédiée vers l'usine à chaque période. Le seul scénario où ce paramètre est fixe est le scénario S1, tous les autres scénarios considèrent les gains en séchage dans le modèle d'optimisation et sont identifiés avec la valeur [oui].

Tableau 4 : Scénarios pour mesurer les gains par une meilleure gestion de l'humidité

Scénario	Paramètre		
	A	B	C
S1	-	-	-
S2	-	-	oui
S3	-	oui	oui
S4	oui	oui	oui

A : Dates autorisées pour chaque zone d'approvisionnement
(Modifier les dates de récolte)

B : Quantité en volume pour chaque zone, pour chaque période
(Répartir temporellement le volume récolté)

C : Quantité qui est expédiée de la cour, pour chaque période
(Permettre au bois de la cour de sécher)

Tel qu'illustré au Tableau 5, nous avons comparé le nombre de camions (calculé en *truckloads*) pour les scénarios avec gestion de l'humidité avec le scénario de référence (S1). Le scénario S2 présente le gain uniquement lié au séchage. Une réduction de 6.6% des camions entre la cour et l'usine est obtenue, ce qui représente une réduction totale de 1.2% pour l'ensemble des flux. Dans le cas du scénario S3, nous ajoutons de la flexibilité au modèle d'allocation en permettant de changer le volume en provenance des différentes zones d'approvisionnement. Dans le scénario S4 une flexibilité est permise dans le choix des périodes de récolte. En combinant ces différentes stratégies de flexibilité, une meilleure gestion du transport est possible et le nombre de camions est réduit pour l'ensemble des flux à partir de la forêt. La réduction totale des flux est de 5 % pour le scénario ayant une pleine flexibilité dans la synchronisation des transports combiné à une réduction de l'humidité par le séchage dans la cour.

Tableau 5 : Comparaison du nombre de camions pour les scénarios de gestion de l'humidité avec une seule cour

Scenario	Nombre de camions (<i>truckloads</i>)			
	Foret-Usine	Foret-Cour	Cour-Usine	TOTAL
S1				
S2	0.0%	0.0%	-6.6%	-1.2%
S3	-3.3%	-1.6%	-9.9%	-4.4%
S4	-3.5%	-4.1%	-11.3%	-5.0%

La réduction du nombre de camions pour approvisionner l'usine se traduit directement par une baisse des émissions de gaz à effets de serre. Pour chaque transport, nous avons calculé les GES fixes liées aux activités de chargement et de déchargement en fonction du volume du camion. Par la suite, les GES variables selon la distance parcourue pour chaque paire origine-destination ont été ajoutés. Le Tableau 6 présente le total des GES pour chacun des scénarios ainsi que la réduction équivalente en tonnes de GES par TMA livrée à l'usine et le gain en pourcentage (GES/TMA). Ces résultats nous indiquent que la réduction en GES est plus importante que la réduction en nombre de camions. Ce résultat s'explique par la prise en compte des activités de chargement et déchargement dans la cour. Nous observons un gain plus important pour le scénario S4. Ce qui confirme l'intérêt de pouvoir ajuster certaines dates de récolte. En effet bien que le total des GES en tonnes soit similaire aux autres scénarios, le plus grand volume déplacé vers l'usine donne un bilan en GES/TMA plus favorable.

Tableau 6 : Calcul des émissions de gaz à effets de serre pour les scénarios de gestion de l'humidité avec une seule cour

Scenario	Estimation des GES			
	Tonnes GES	Total livré usine (TMA)	GES / tma	Gain en %
S1	5 544.65	181 743	0.0305	
S2	5 454.48	181 689	0.0300	-1.6%
S3	5 259.03	182 669	0.0288	-5.6%
S4	5 222.22	219 633	0.0238	-22.1%

En plus de calculer la réduction des gaz à effets de serre en tonnes de CO₂ équivalent nous avons estimé le gain financier associé à la réduction du nombre de camions et des distances parcourues. L'estimation mesure la réduction du carburant associé à la manutention et aux déplacements. Les litres de carburant économisés sont présentés au Tableau 7 ainsi que l'économie équivalente. Nous avons considéré un coût du diesel de 1.25\$/L. Cet indicateur de performance est particulièrement intéressant pour le partenaire industriel.

Tableau 7 : Estimation financière de la réduction des émissions de gaz à effets de serre pour l'ensemble des scénarios avec une seule cour

Scenario	Réduction des GES			
	Réduction (T CO ₂ eq)	Réduction (L carburant)	Réduction (\$ carburant)	Réduction unitaire (\$/tma)
S1	-			
S2	90.17	33 836	42 295 \$	0.23 \$
S3	285.62	107 173	133 966 \$	0.73 \$
S4	322.42	120 984	151 230 \$	0.83 \$

4.2. Utilisation d'un réseau de cours

Précédemment, nous avons considéré qu'une seule cour du réseau était adaptée pour effectuer la gestion et le suivi de l'humidité du bois. Toutefois les résultats obtenus nous portent à croire que l'ajout de plusieurs cours de transit permettant le séchage du bois pourrait apporter des gains supplémentaires dans un réseau d'approvisionnement tel que celui de notre partenaire. Ainsi un réseau de cours existant (comprenant de 1 à 3 cours supplémentaires) a été utilisé pour tester cette hypothèse dans la seconde partie des travaux. Il est à noter que la cour actuelle, celle prise en compte dans la phase 1, est utilisée dans tous les scénarios, car une partie de l'approvisionnement provenant du Maine n'est accessible que via une route forestière privée. Sans ce volume de bois, le modèle ne peut pas répondre à la demande de l'usine et le scénario devient infaisable.

Le Tableau 8 décrit les nouveaux scénarios S5, S6 et S7 selon la même nomenclature que précédemment. Le paramètre D représente l'optimisation de la destination soit le « bois qui transite par une cour » entre la forêt et l'usine à chaque période. La valeur [-] signifie que le bois doit transiter par la même cour que selon les données historiques (le cas échéant) alors que le [oui] signifie que le modèle permet le transit par n'importe quelle cour du réseau.

Tableau 8 : Scénarios pour mesurer les gains par une meilleure gestion de l'humidité et un réseau de cours

Scénario	A	B	C	D
S1	-	-	-	-
S2	-	-	oui	-
S3	-	oui	oui	-
S4	oui	oui	oui	-
S5	-	-	oui	oui
S6	-	oui	oui	oui
S7	oui	oui	oui	oui

A : Dates autorisées pour chaque zone d'approvisionnement (*Modifier les dates de récolte*)

B : Quantité en volume pour chaque zone, pour chaque période (*Répartir temporellement le volume récolté*)

C : Quantité qui est expédiée de la cour, pour chaque période (*Permettre au bois de la cour de sécher*)

D : Optimisation des destinations (*Permettre au bois de transiter ou non par une cour du réseau*)

Tel qu'illustré au Tableau 9, nous avons d'abord comparé le nombre de camions (*truckloads*) pour les scénarios incluant l'optimisation des destinations avec le scénario de référence (S1). Nous observons une réduction du nombre total de camions entre 1.2% et 4.9% malgré une augmentation du nombre de camions forêt-cour pour le scénario S5.

Tableau 9 : Comparaison du nombre de camion pour les scénarios de gestion de l'humidité avec une ou plusieurs cours

Scenario	Nombre de camions (<i>truckloads</i>)			
	Forêt-Usine	Forêt-Cour	Cour-Usine	TOTAL
S1				
S5	-0.9%	4.1%	-4.4%	-1.2%
S6	-3.5%	-0.6%	-10.6%	-4.6%
S7	-3.1%	-4.1%	-12.1%	-4.9%

Afin de comparer la performance de réseaux alternatifs selon le nombre de sites disponibles, nous avons ensuite fait un ensemble d'expérimentations considérant l'ajout d'une à trois cours supplémentaires dans le réseau, soit S : cour SUD, N : cour NORD et U : cour USINE. La localisation de ces cours est présentée à la Figure 2.

Nous avons d'abord comparé la variation des profits pour ces scénarios avec le scénario de référence (S1) tel qu'illustré au Tableau 10. Si une seule cour supplémentaire devait être opérée c'est celle située à proximité de l'usine (U) qui devrait être privilégiée. Elle génère des profits supplémentaires entre +0.80% et +1.42%. La seconde cour à ajouter au réseau serait celle située au nord (N). Elle génère un profit additionnel entre +0.99% et +1.63% par rapport au scénario de référence. Selon les résultats obtenus, l'ajout d'une troisième cour n'apporte aucun bénéfice financier au réseau d'approvisionnement.

Tableau 10 : Variation des profits pour un réseau de cours

Scénario	Variation des profits							
	<i>initial</i>	+1 cour (S)	+1 cour (N)	+1 cour (U)	+2 cours (N+S)	+2 cours (S+U)	+2 cours (N+U)	+3 cours (N+U+S)
S1	-							
S5	0.17%	0.39%	0.38%	0.80%	0.38%	1.00%	0.99%	0.99%
S6	0.61%	0.81%	0.84%	1.34%	0.84%	1.53%	1.54%	1.54%
S7	0.65%	0.87%	0.91%	1.42%	0.91%	1.61%	1.63%	1.63%

Pour les différents réseaux de cours testés, nous observons presque toujours une diminution de l'émission des gaz à effet de serre lors de l'ajout de flexibilité dans les modalités de récolte et de transport ($S7 < S6 < S5$). Toutefois, l'ajout de cours ne vient pas nécessairement diminuer les GES car la fonction objectif cherche à maximiser les profits.

En effet pour l'ensemble des scénarios dans lesquels nous utilisons la cour de l'usine (U) nous observons une augmentation des GES/TMA par rapport aux scénarios avec seulement la cour initiale. Ainsi la meilleure solution selon le volet environnemental serait l'ajout d'une cour au sud (S) qui permet de diminuer les GES de -20.2% à -23.4% par rapport au scénario 1. Il n'y a aucun bénéfice environnemental à l'ajout d'une seconde cour.

Tableau 11 : Calcul des émissions de gaz à effets de serre pour les scénarios avec un réseau de cours

Scénario	Estimation des GES/TMA (valeur en pourcentage)							
	<i>initial</i>	+1 cour (S)	+1 cour (N)	+1 cour (U)	+2 cours (N+S)	+2 cours (S+U)	+2 cours (N+U)	+3 cours (N+U+S)
S1	0.0305							
S5	-18.9%	-20.2%	-19.6%	-14.0%	-19.6%	-15.6%	-15.1%	idem
S6	-21.9%	-23.0%	-22.6%	-17.0%	-22.6%	-18.6%	-18.2%	idem
S7	-22.2%	-23.4%	-23.2%	-17.7%	-23.2%	-19.3%	-19.0%	idem

Les deux tableaux précédents permettent d'identifier les meilleurs scénarios selon chacun des volets étudiés, ainsi le meilleur scénario selon les profits les plus élevés est (S7-NU) et celui selon les gaz à effets de serre les plus bas est (S7-S). Ces résultats démontrent qu'un compromis doit être fait par les industriels entre les scénarios qui augmentent les profits et ceux qui diminuent les émissions de gaz à effet de serre. La Figure 8 présente l'ensemble des solutions selon les deux volets.

Dans une phase d'implantation de la solution, la première étape serait d'abord d'instaurer le séchage avec la cour actuelle (passer de S1 à S5). Cette modification apporte une réduction de 18.9% en GES/TMA et une augmentation de profits de 0.17%. La seconde étape pourrait être soit (i) l'ajout de la cour sud avec une flexibilité dans les transports (S6-S) permettant d'avoir une réduction de 23.0% en GES/TMA et une augmentation de profits de 0.81% par rapport au scénario S1, soit (ii) l'ajout de la cour de l'usine avec la flexibilité du transport et de la récolte avec des profits de 1.34% à 1.61% et un estimé de GES à 0.0250 soit légèrement supérieur à l'option S5.

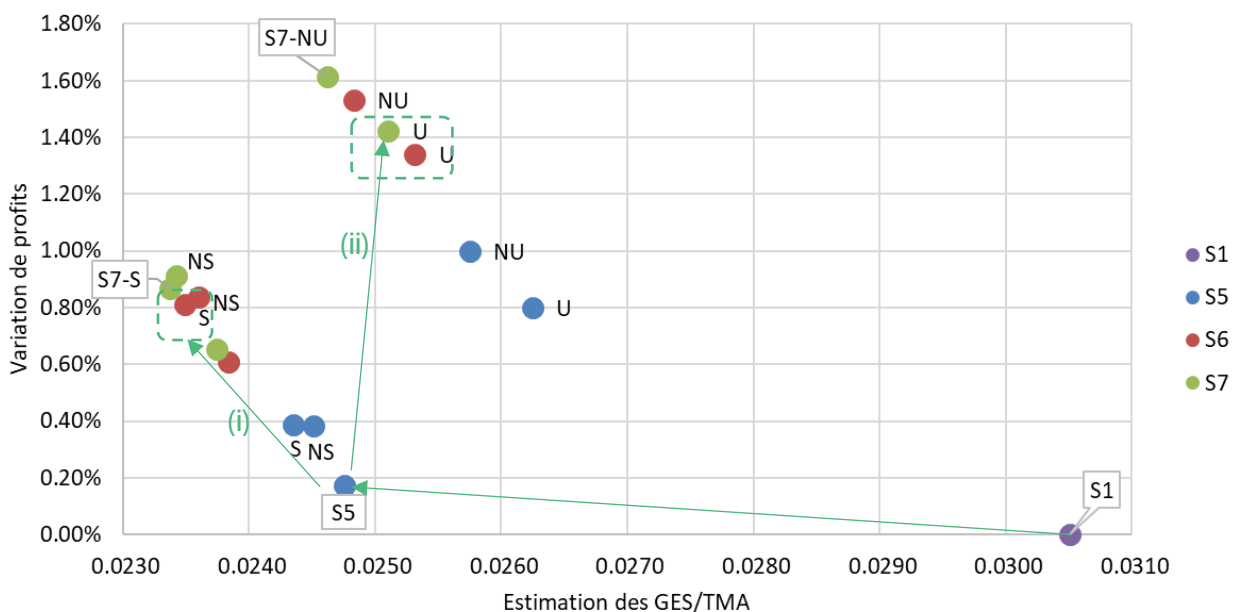


Figure 8 : Compromis GES/TMA et profits pour les scénarios avec un réseau de cours

5. Conclusion

Ce projet a permis de démontrer qu'une réduction des gaz à effets de serre (GES) était possible lors des opérations de transport de la matière première par une meilleure gestion de l'humidité dans les cours de transit. Dans une industrie où le coût de transport peut représenter près de la moitié du coût d'approvisionnement (Groupe DDM, 2016), tout gain potentiel se doit d'être évalué. Nos résultats montrent une réduction de 1.6% des GES par une meilleure gestion de l'humidité du bois transporté. Des réductions plus importantes, de 5.2% à 23.4% peuvent être obtenues lorsque la gestion de l'humidité est combinée à l'optimisation du transport (flexibilité des quantités livrées et/ou des dates de récolte).

Le modèle mathématique développé avec la plateforme LogiLab (une plateforme logicielle spécifiquement conçue pour l'industrie des produits du bois), peut être réutilisé pour reproduire nos analyses, ainsi que pour modéliser d'autres scénarios plus complexes. Des pistes de travaux futurs incluent le développement de modèles plus précis de séchage pour chacune des cours ainsi que l'ajout de volumes supplémentaires qui ne transitent pas actuellement par une cour.

Références

- Blinn, C. R. (1984). *Current and emerging trends in processing timber*. University of Minnesota.
- Brotherton, E., Gravel, M.-L., LeBel, L., & Trzcianowska, M. (2016). *Benchmark des cours à bois projet GIM*. Québec: Forac, FPInnovations.
- Brotherton, E., Gravel, M.-L., LeBel, L., & Trzcianowska, M. (2017). *Maximiser la création de valeur et réduire les gaz à effets de serre par une meilleure gestion des centres de tri et des cours de transit de bois, Version préliminaire*. Québec: Forac, FPInnovations.
- Brotherton, E., Gravel, M.-L., LeBel, L., & Trzcianowska, M. (2017). *Réduire les émissions de gaz à effets de serre par une meilleure gestion des centres de tri et des cours de transit de bois*. CIRRELT, CIRRELT-2017-44.
- de Almeida Sfeir, T., Junior, J., Ruiz, A., & LeBel, L. (2019). Integrating natural wood drying and seasonal trucks' workload restrictions into forestry transportation planning. *Omega*, 102135.
- Gautam, S., LeBel, L., & Carle, M.-A. (2017). Supply chain model to assess the feasibility of incorporating a terminal between forests and biorefineries. *Applied Energy*, 198, pp. 377-384.
- GIEC. (2006). *Lignes directrices 2006 du GIEC pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre* (Vol. 2, chap.3). Japon: IGES. Consulté le 08 01, 2016, sur <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/french/vol2.html>
- Groupe DDM. (2016). *Enquête 2013-2014 sur les coûts d'opération et les revenus liés au bois d'œuvre de l'industrie forestière du Québec*.
- Lemelin, L. (2015). *Cartographie du réseau d'approvisionnement d'une grande usine de pâte et papier*. rapport de stage FORAC, Université Laval.
- Ministère des forêts, d. l. (s.d.). *Répertoire des bénéficiaires de droits forestiers sur les terres du domaine de l'État* (éd. Tiré de la version au 31 décembre 2016).
- Ministère des forêts, de la faune et des parcs. (s.d.). *La garantie d'approvisionnement (GA)*. Consulté le 08 01, 2016, sur Forêts, faune et parcs Québec: <https://mffp.gouv.qc.ca/forets/amenagement/amenagement-planification-droits-GA.jsp>
- Morneau-Pereira, M., Arabi, M., Ouhimmou, M., Gaudreault, J., & Nourelfath, M. (2014). An optimization and simulation framework for integrated tactical planning of wood harvesting operations, wood allocation and lumber production. *MOSIM14, 10th International Conference on MOdeling, Optimization and SIMlation*.
- Thivierge Robitaille, É. (2016). *Étude des ententes fournisseur pour un réseau d'approvisionnement plus agile*. rapport de stage FORAC, Université Laval.
- Transition Énergétique Québec. (2014). *Facteurs d'émission et de conversion*. Récupéré sur http://www.transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/Facteurs_emissions.pdf