

Vers la valorisation de la biomasse forestière dans l'Est canadien : une étude de cas au Québec

TASSEDA BOUKHERROUB¹, LUC LABEL^{1,2}, SÉBASTIEN LEMIEUX¹

¹CENTRE INTERUNIVERSITAIRE DE RECHERCHE SUR LES RÉSEAUX D'ENTREPRISES, DE LOGISTIQUE ET DE TRANSPORT (CIRRELT)

Pavillon Palasis-Prince, bureau 2642, 2325, rue de la Terrasse

Université Laval, Québec (Québec) G1V 0A6 – Canada

Tasseda.Boukherroub@cirrelt.ca, Luc.Lebel@sbf.ulaval.ca, Sebastien.Lemieux@forac.ulaval.ca

²FACULTÉ DE FORESTERIE, DE GÉOGRAPHIE ET DE GÉOMATIQUE

Pavillon Abitibi-Price, 2405, rue de la Terrasse

Université Laval, Québec (Québec) G1V 0A6 – Canada

Résumé – Malgré l'abondance de la biomasse forestière dans l'Est canadien, l'industrie forestière en fait peu d'usage. Ceci est principalement dû au coût relativement élevé de l'accès à la fibre. Toutefois, si la transformation de la biomasse en bioproduits (granules, charbon de bois, etc.) est judicieusement intégrée à la chaîne de création de valeur des produits forestiers existants, des effets de synergies pourraient bénéficier l'ensemble du réseau et contribuer à la rentabilité de l'industrie dans les régions forestières et à la création d'emplois. Cet article analyse la possibilité d'implanter une usine de granules dans l'Est du Québec. Le bois présentant un faible potentiel de transformation pour l'industrie des produits forestiers traditionnels, les arbres tués par les insectes ainsi que les résidus des usines de sciage sont considérés comme des matières premières pouvant être valorisées. Plusieurs scénarios d'approvisionnement et de marché sont étudiés afin de déduire les conditions d'opération optimales qui assurent la rentabilité économique. Les analyses sont réalisées à l'aide d'une plateforme d'optimisation et de spatialisation explicite appelée LogiLab sur un cas d'étude régional, en partenariat avec une grande compagnie forestière.

Abstract - Despite the abundance of woody biomass sources in Eastern forests in Canada, the forest industry makes limited use of it. The relatively high supply cost is considered as the main hurdle to access forest biomass. However, if biomass based products (pellets, bio-coal, etc.) are appropriately integrated into the existing forest products value chain; synergy effects could benefit the entire network and contribute to the long-term survival of the forest industry in remote regions and job creation. This paper explores the possibility of implementing a pellet mill in Eastern Québec. Logs of low value for traditional forest products manufacturers, insect-killed trees, and sawmill residues are considered as potential raw materials. Different supply and market scenarios are tested to derive the optimal operational conditions under which the value chain is profitable. The experiments are performed on a spatially explicit optimization platform called LogiLab on the basis of a regional case study, and in partnership with a large forest company.

Mots clés – Biomasse forestière, granules de bois, chaîne de création de valeur intégrée, rentabilité économique.

Keywords – Forest biomass, wood pellets, integrated value chain, profitability.

1 INTRODUCTION

La granule de bois est un combustible renouvelable offrant une alternative aux combustibles fossiles pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES). Justement, dans le but réduire ses émissions de GES, l'Union Européenne s'est fixée l'objectif de produire 20% de son énergie à partir de sources renouvelables d'ici 2020. Les granules offrent une alternative intéressante car elles peuvent être transportées sur de longues distances à des coûts relativement faibles grâce à leur densité énergétique élevée. Le marché mondial des granules est estimé à 54 millions de tonnes en 2025 dont 38 millions de tonnes en Europe [Murray, 2014]. Actuellement, le Canada exporte plus de 80% de

sa production de granules vers l'Europe [Murray, 2014]. Pour tirer avantage de ces opportunités, l'industrie forestière investit de plus en plus dans la production de granules de bois. Toutefois, les résidus de sciage (copeaux, sciures et planures) à partir desquels les granules sont normalement produites se font plus rares au Canada (utilisation pour d'autres produits). De ce fait, les producteurs de granules ont été amenés à utiliser directement la fibre en provenance de la forêt. En ce sens, jusqu'à 25% de la matière première peut venir des résidus de récolte (branches, cimes, etc.) [McCloy & Associates, 2009]. Par ailleurs, depuis quelques années, des arbres entiers infestés par le dendroctone du pin ponderosa, jugés inappropriés pour les produits de bois traditionnels (bois d'œuvre, papier, etc.) sont utilisés pour la

production de granules dans l'Ouest canadien. De plus, certaines essences de bois qui présentent peu de valeur pour les produits traditionnels sont également utilisées comme matière première dans certaines régions au Canada [WPAC, 2015] (ex. la compagnie Trebio dans le Sud-Ouest du Québec).

Néanmoins, malgré la disponibilité en grandes quantités de ce type de biomasse, son utilisation pour la production de granules est une pratique encore rare dans l'Est canadien, et ce malgré la disponibilité en grandes quantités de ces types de biomasse. En fait, la production de granules dans l'Est est beaucoup plus faible que dans l'Ouest. À titre d'exemple, 80% des exportations de granules canadiennes proviennent de la province de la Colombie-Britannique. Paradoxalement, la distance parcourue par les navires entre l'Ouest canadien et l'Europe est d'environ 16 000 km alors que la distance entre l'Est canadien et l'Europe est de moins de 5000 km. L'une des difficultés rencontrées dans l'Est est le coût élevé d'approvisionnement de la fibre en forêt. Toutefois, si la production des granules est intégrée de manière judicieuse à la chaîne de création de valeur des produits forestiers existants, il pourrait en résulter plusieurs retombées économiques, environnementales et sociales pour l'industrie forestière, le gouvernement et les collectivités locales : partage des coûts de récolte et de transport, meilleur accès à la fibre, remise en production à moindre coût des secteurs forestiers, diversification de l'industrie, utilisation d'une source d'énergie renouvelable, création d'emplois, etc.

Cet article présente une étude sur la valorisation de la biomasse forestière dans une région localisée dans l'Est du Québec. Plus précisément, nous analysons la chaîne de création de valeur des granules de bois, intégré à l'industrie des produits forestiers traditionnels existants dans cette région. Différents scénarios d'approvisionnement et de marché sont évalués à l'aide de la plateforme d'optimisation LogiLab [Lemieux *et al.* 2011] afin de rendre compte des conditions opérationnelles de rentabilité économique. Le reste de l'article est organisé comme suit : la section suivante présente le contexte industriel de la région dans laquelle notre étude est réalisée. La méthodologie adoptée est présentée dans la section 3. La section 4 présente les résultats obtenus. Finalement, les conclusions et les perspectives de recherches sont présentées dans la section 5.

2 CONTEXTE INDUSTRIEL

La région étudiée est située 450 km à l'Est de Québec et présente une superficie de plus de 350 000 km², soit 21 % de la surface du Québec. Elle couvre près de 1 300 km de littoral, longeant la rive nord de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent. Le territoire forestier couvre 103 146 km² dont 87% de terrains productifs. 95 % de ces territoires forestiers est géré par le gouvernement provincial (forêts publiques) et le reste est occupé par des propriétés privées (2%) ou appartient au gouvernement fédéral (3%) [MFFP, 2004]. L'économie locale est fortement liée au secteur forestier. Au début des années 2000, 13 usines étaient en fonctionnement, mais du fait de la crise économique et du conflit canado-américain sur le bois d'œuvre dans les années 2000, plusieurs usines ont rencontré des difficultés qui ont mené à la fermeture de plusieurs d'entre elles. On y trouve actuellement 8 usines en opération dont 5 scieries, 1 usine de panneaux, 1 usine de granules et 1 usine de pâtes et papiers.

Cette dernière ainsi que 4 scieries sont bénéficiaires de garanties d'approvisionnement (BGA), c.-à-d., des droits de coupe annuels octroyés sur la base d'ententes avec le gouvernement du Québec, autrement dit le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (MFFP).

Une étude du Conseil régional de développement révèle divers éléments défavorables à l'industrie forestière dans la région tels que la tarification des droits de coupe (redevances forestières), l'accès au marché (absence de chemin de fer) et l'accès à la ressource forestière (hydrographie et topographie rendent difficile la construction de chemins forestiers) [MFFP, 2004]. Toutefois, la région offre de grandes quantités de biomasse forestière sous diverses formes telles que les résidus de récolte, le bois sec et sain (bois mort, mais pouvant être transformé), des essences feuillues (peu appréciées des producteurs de bois d'œuvre et de papier), les arbres présentant des petits diamètres ou des défauts naturels. Concernant les arbres présentant des petits diamètres ou des défauts naturels, il existe depuis 2010, une entente spécifique à la région conclue entre le MFFP et les BGA ; « Bon Bois, bon usage, bonne usine » qui permet à ceux-ci de laisser les tiges de 12 cm de diamètre et moins sur les parterres de coupe, sans pénalité. Par ailleurs, la région subit actuellement les effets de la Tordeuse des Bougeons de l'Épinette (TBE), un insecte défoliateur qui a ravagé plusieurs millions d'hectares depuis 2006. En 2014, les superficies touchées par la TBE totalisaient 4 275 065 d'hectares au Québec. Mais la progression de l'épidémie est particulièrement forte dans la région où notre étude a été réalisée, avec près de 3 millions d'hectares infestés en 2014 [MFFP, 2014]. Les arbres sévèrement défoliés ou morts suite à la TBE ne sont pas appréciés des producteurs des produits de sciage et de pâte en raison de leur faible rentabilité et qualité, mais ils peuvent néanmoins être utilisés pour des produits bioénergétiques tels que les granules. Pour tirer profit de cette situation, le Conseil régional de développement cherche des débouchés afin de valoriser la biomasse forestière et de contribuer ainsi à la création d'emplois, au maintien et à la diversification de l'industrie forestière et au développement économique local.

Cette étude s'intéresse à la production des granules de bois. Elle est réalisée avec l'appui du Conseil régional de développement. Hormis l'étude réalisée par [Mansuy *et al.*, 2015] où le potentiel théorique de biomasse issue des résidus de récolte, de la récupération des peuplements brûlés ou défoliés par la TBE est évalué sous différentes contraintes économiques et écologiques, il n'existe à notre connaissance aucune étude dans la littérature scientifique sur la valorisation de la biomasse forestière dans l'Est du Québec. Contrairement à l'étude présentée dans [Mansuy *et al.*, 2015], cette étude couvre l'ensemble de la chaîne logistique des granules et évalue la possibilité d'intégrer celle-ci à la chaîne de création de valeur des produits forestiers existants dans la région étudiée.

3 METHODOLOGIE

Notre méthodologie est structurée en 5 phases comme le montre la figure 1.

- *Analyse du marché.* Il s'agit d'identifier les marchés cibles, les qualités de granules requises pour chaque marché et le prix de vente.

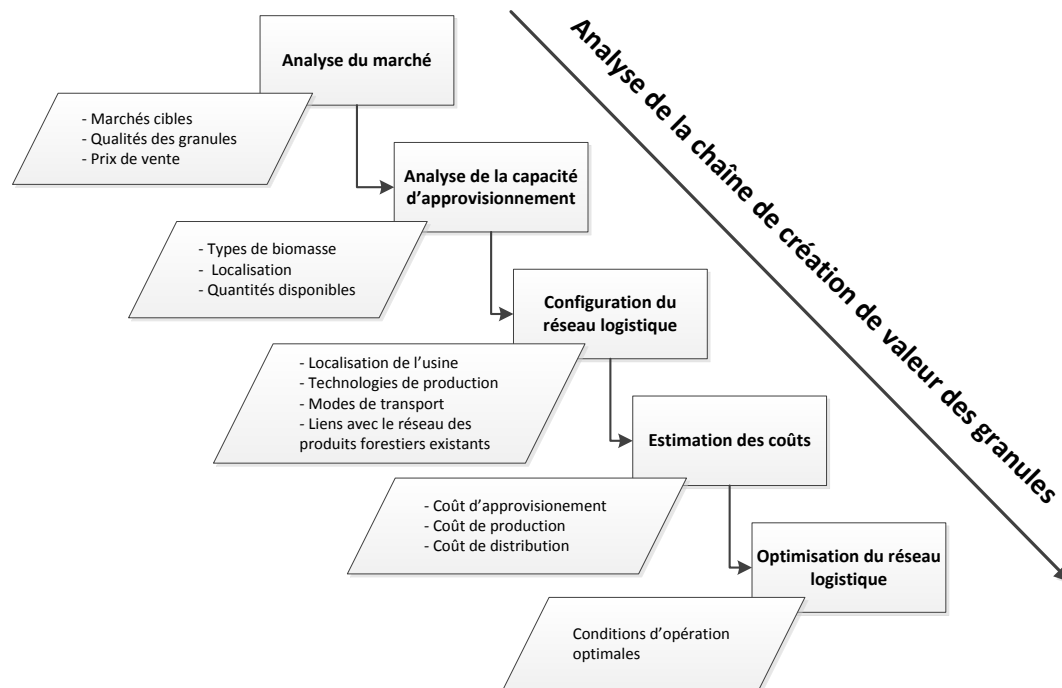


Figure 1. Méthodologie de valorisation de la biomasse forestière en vue de la production de granules

- *Analyse de la capacité d'approvisionnement.* Il s'agit d'identifier les types de biomasse disponibles en forêt et leur adéquation avec les qualités des granules et d'approximer les quantités
- *Configuration du réseau logistique.* On s'intéresse ici à la localisation de l'usine de granules, aux technologies de production à mettre en place, aux modes d'approvisionnement et de distribution ainsi qu'aux possibilités d'intégrer la chaîne logistique des granules à la chaîne de création de valeur des produits forestiers déjà existants, par exemple au niveau de la récolte en forêt.
- *Évaluation des coûts.* Il s'agit d'estimer le coût de la matière première et de son transport jusqu'à l'usine, le coût des investissements, le coût de production et le coût de distribution des granules.
- *Optimisation de la chaîne logistique.* Compte tenu de la structure du réseau retenue et des coûts associés, nous analysons plusieurs scénarios d'approvisionnement et de marché à l'aide de la plateforme d'optimisation et de spatialisation LogiLab. Les résultats obtenus nous permettent d'identifier les conditions d'opérations optimales qui assurent la rentabilité économique du réseau.

3.1 Analyse du marché

Le marché mondial des granules est estimé en 2020 à 51 millions de tonnes et en 2025 à 54 millions [Murray, 2014]. Alors que le marché nord-américain devrait rester stable, les marchés européen et asiatique (Japon et Corée du Sud) devraient connaître des hausses très importantes. On retrouve généralement deux types de granules sur le marché ; les granules de qualité premium destinées au marché résidentiel/institutionnel (chauffage) et les granules de qualité standard destinées à un usage industriel (énergie). En Amérique du Nord (Canada et États-Unis), les granules sont vendues principalement pour le

chauffage domestique alors qu'en Europe, elles sont dédiées à la fois à l'utilisation industrielle et résidentielle/institutionnelle.

3.1.1 Marché local et nord-américain

Le marché américain (États-Unis) est depuis quelques années saturé à cause des subventions à la fabrication de granules [ÉcoRessources et EcoTec, 2012]. De plus, l'Est Canadien est caractérisé par des coûts de transport relativement élevés, car le transport se fait principalement par camions sur des distances relativement importantes [Morency, 2012]. Le marché québécois n'est pas très important. Il était évalué à 60 000 tonnes en 2010 [MRNF – CRIQ, 2011]. De plus, il existe déjà au Québec quelques usines qui produisent des granules pour le marché local dont une usine localisée dans la région étudiée. De ce fait, le marché local et plus généralement, nord-américain présente peu d'intérêt.

3.1.2 Marché européen

Le marché européen présente le plus gros potentiel de croissance dans les 20 prochaines années. Le prix CIF (*Cost Insurance Freight*) moyen des granules se situe aux alentours de 200\$ canadiens la tonne. L'Ouest canadien exporte beaucoup plus que l'Est vers l'Europe. En fait, près de 65% de la production au Canada se concentre dans l'Ouest contre 35% dans l'Est [Morency, 2012]. Alors que les navires au départ de Vancouver (Colombie-Britannique) parcourent une route de près de 16 000 km via le canal de Panama à destination de Rotterdam pour desservir le marché Européen, la distance entre les ports de l'Est du Canada et Rotterdam n'atteint pas les 5000 km. La région étudiée compte trois ports qui pourraient être utilisés pour l'exportation des granules. Le marché européen présente une demande à la fois pour les granules de qualité premium et les granules de qualité standard. Il faut donc saisir les caractéristiques des deux types de produits pour s'assurer de fournir la bonne qualité de granules, avec la bonne matière première, au bon client.

3.1.3 Normes et standards des granules de bois

Les caractéristiques des granules requises sont établies selon des normes bien précises. En Amérique du Nord, c'est le *Pellet Fuel Institute (PFI)* qui en a la responsabilité. Dans la dernière version du standard [PFI, 2011], on y retrouve trois grades de granules; premium, standard et utilitaire. La teneur en cendres doit être inférieure ou égale à 1%, 2% et 6%, respectivement [PFI, 2011]. En Europe, il existe cinq normes connues : NF Biocombustibles solides (France), DINplus (Allemagne), O NORM (Autriche), SS 18 71 20 (Suède) et EN PLUS (Europe) qui certifie l'ensemble du transport et de la logistique jusqu'à l'utilisateur final.

À titre d'exemple, EN PLUS distingue trois classes de grades : ENplus-A1 et ENplus-A2 pour l'usage résidentiel/institutionnel et EN-B pour l'usage industriel. La teneur en cendres est une caractéristique de première importance qui distingue nettement les trois grades. Elle est liée à la quantité d'écorces contenues dans la matière première utilisée pour fabriquer les granules. Les résidus de récolte ont par exemple un taux d'écorce élevé alors que le bois rond en a moins. La norme EN PLUS spécifie également les sources de matières premières et les additifs admis pour chaque grade. Le grade ENplus-A1 est le plus exigeant puisque seuls les tiges de bois et les résidus de sciage des industries de transformation du bois non-traités chimiquement sont acceptés. Le grade ENplus-A2 tolère un mélange de biomasse de types plus variés, allant des arbres entiers (excluant les racines) aux écorces (rejets de sciage par exemple). Enfin, le grade EN-B tolère également le bois usagé (bois de construction par exemple) non-traité chimiquement.

3.2 Analyse de la capacité d'approvisionnement

3.2.1 Identification des types de biomasse forestière

Dans « Vers la valorisation de la biomasse forestière, un plan d'actions – février 2009 » [AQPER, 2009], le MFFP définit la biomasse forestière comme étant « des arbres ou parties d'arbre comptabilisés dans la possibilité forestière qui ne font pas l'objet d'une attribution ou d'une réservation [une garantie d'approvisionnement par exemple] ainsi que les arbres, arbustes, cimes, branches et feuillages ne faisant pas partie de la possibilité forestière. Les souches et les racines sont exclues de cette définition dans le cadre du programme d'attribution de la biomasse forestière. » Une entrevue avec un expert du MFFP nous a permis d'identifier cinq sources de biomasse forestière potentielles :

- Les résidus de récolte (branches et cimes laissées sur le parterre de coupe).
- Certaines essences de bois feuillus de qualité insuffisante pour les produits traditionnels tels que le bois d'œuvre ou le papier.
- Les tiges de bois présentant des petits diamètres ou des défauts naturels qu'il n'est pas rentable de transformer en bois d'œuvre ou en papier (suite à l'entente spéciale « Bon Bois, bon usage, bonne usine » entre le MFFP et les BGA).
- Le bois sec et sain. Autrement dit du bois mort, mais pouvant être utilisé pour la production de granules.
- Les arbres sévèrement défolié ou morts suite à la TBE.

Nous avons par ailleurs examiné la possibilité d'utiliser résidus de sciage générés par les scieries implantées dans la région. Nous avons identifié une seule usine potentielle. Les autres usines utilisent déjà ou prévoient d'utiliser en totalité leurs résidus de production. Alors que la totalité des copeaux de la scierie retenue

sont utilisés par une papetière appartenant à la même compagnie, et que les écorces sont brûlées pour produire de l'énergie nécessaire à sécher le bois scié, les sciures/planures sont actuellement vendus et livrés par camions à une compagnie située à plus de 500 km de l'usine. Du fait des coûts de livraison importants, la compagnie envisage de vendre ces résidus de sciage localement, si les conditions y sont plus avantageuses.

3.2.2 Estimation des quantités de biomasse

La quantité de sciures/planures moyenne générée par la scierie retenue est estimée selon les tendances de l'industrie à environ 32 500 tma/an (tonne métrique anhydre). Concernant les autres sources de biomasse, nous avons utilisé des données produites par une étude réalisée en 2014 par une grande compagnie de gestion-conseil. Nous collaborons présentement avec le MFFP en vue d'affiner et de mettre à jour ces données. La quantité de biomasse est évaluée pour chacun des types suivants : les arbres de petits diamètres ou présentant des défauts naturels, le bois sec et sain, le bouleau à papier, le peuplier, et le bois affecté par la TBE. L'utilisation de résidus de récolte devant être minimisée à cause de la quantité élevée d'écorces, nous n'en avons pas tenu compte dans cette étude préliminaire. Les différents types de biomasse retenus sont localisés dans deux unités d'aménagement forestières (UAF) où deux BGA ont actuellement des opérations de récolte en cours. Les autres UAF de la région présentent peu de biomasse pouvant être récoltée à un coût raisonnable. L'éloignement géographique et l'absence d'opérations forestières (chemins forestiers inexistant) dans ces UAF limitent considérablement l'accès à la biomasse. Le tableau 1 présente les quantités de biomasse dans chacune des deux UAF (UAF A et UAF B), déclinées par type et localisée dans un rayon de moins de 100 km et entre 100 et 180 km par rapport à la localité la plus proche.

3.1 Configuration du réseau logistique

3.1.1 Localisation de l'usine de granules

Le transport des matières premières est un facteur déterminant dans l'industrie des granules. Il n'est pas rentable de transporter la fibre sur de très longues distances. De ce fait, une usine de granules doit être localisée au plus près de la matière première. À titre d'exemple, en Colombie-Britannique, le transport de la biomasse de la forêt à l'usine se fait sur une distance de 50 à 75 km (par camion) [Sénéchal et Grassi, 2009].

La localité la plus proche des UAF A et B paraît donc une localisation appropriée. Par ailleurs, l'usine de sciage retenue comme fournisseur potentiel de l'usine de granules en sciures/planures est implantée dans cette localité. De plus, la compagnie qui opère la scierie possède un terrain de taille suffisante à proximité de la scierie pour accueillir la future usine de granules. Enfin, la présence d'un port qu'on désignera dans le reste de l'article par « port Est » à moins de 20 km de l'usine est un avantage majeur pour l'export à moindre coût des granules vers l'Europe.

3.1.2 Technologies de production

Généralement la matière première acheminée à une usine de granules se présente sous forme de copeaux (la biomasse forestière est souvent déchiquetée ou broyée au préalable en forêt), ou sous forme de fines particules (sciures et planures).

Tableau 1. Évaluation des quantités de biomasse forestière dans les UAF A et B [AECOM - CRIQ, 2014]

UAF	Rayon (km)	Types de biomasse (tma/an)				Total (tma/an)
		Petits diamètres et défaut naturels (résineux)	Sec et sain (résineux)	Bouleau à papier (feuillu)	Peuplier (feuillu)	
UAF A	0-100	33 425	15 917	7 874	4 493	61 709
	100-180	20 890	9 948	4 921	2 808	38 567
UAF B	0-100	14 524	6 916	8 861	6 270	36 571
	100-180	0	0	0	0	0
Bois de TBE (UAF A + UAF B) (tma/an)	0-100	6 709	3 195	3 787	2 808	16 499
Total (tma/an)	0-180	75 548	35 976	25 443	16 379	153 346

L'écorçage est réalisé à l'aide d'un écorceur à tambour et le fractionnement à l'aide d'une machine munie de couteaux rotatifs (déchiquetage) et/ou d'un broyeur à marteau (broyage). La matière première est entreposée dans des silos, sur une dalle de béton ou dans une cour. Ensuite, la fibre passe par cinq étapes de transformation principales : le séchage, la fragmentation, le conditionnement, la densification et le refroidissement. Le séchage est réalisé à l'aide d'un séchoir à tambour qui réduit le taux d'humidité à environ 12 % car les granules doivent avoir un taux d'humidité requis de moins de 10% (une autre partie de l'humidité s'évapore lors de la densification). Pour générer de la chaleur, le gaz naturel ou le propane brut peuvent être utilisés. Mais habituellement, la chaleur est générée en brûlant une partie de la matière première (sciures, écorces, etc.) pour réduire le coût de l'opération. Lorsqu'une partie de la matière première n'est pas utilisée par le séchoir, le rendement matière est près de 100% [Goyette, 2009]. La matière première passe ensuite dans un crible (tamis vibrant) qui sépare les grosses particules des petites. Les grosses particules sont fragmentées à l'aide d'un broyeur à marteaux afin d'obtenir la taille requise pour l'étape de densification. Le conditionnement réalisé à l'aide d'un mélangeur permet ensuite d'assouplir la fibre afin de faciliter sa densification, en y injectant de la vapeur à haute température. À l'étape de densification, la fibre est poussée sur les parois d'un cylindre à matrices par des rouleaux (presse à granules) qui forcent la matière à passer à travers les trous. Durant la compression, la fibre se réchauffe et libère la lignine qui assure la cohésion des granules. À la sortie de la presse, les granules atteignent une température de 100° à 150°C. Un refroidisseur, en baissant la température des granules, permet de solidifier la lignine et empêche la désagrégation des granules. Ces dernières sont ensuite dépoussiérées et stockées dans des silos.

3.1.3 Transport de la biomasse

Le transport de la biomasse forestière pourrait se présenter sous deux formes. Il est possible de transporter le bois rond directement à l'usine de granules par camion (l'écorçage-déchiquetage se fait à l'usine dans ce cas). Le bois pourrait aussi être écorcé et déchiqueté en forêt, et transporté par camions sous forme de copeaux. Ce mode d'opération est très répandu en Colombie-Britannique. Nous retenons la seconde alternative. Concernant les sciures/planures, ils pourraient être directement acheminés vers l'usine de granules, à l'aide d'un convoyeur. Aucun transport ne serait requis.

3.1.4 Transport des granules

Le port Est dispose de silos de stockage qui pourront accueillir les granules avant leur envoi par navires jusqu'en Europe. Le port peut accueillir des navires d'un tonnage de 25 000 tonnes. Le transport des granules vers l'Europe se ferait par conséquent par camions (en vrac), de l'usine jusqu'au port Est où les

granules seront stockées dans des silos. Les granules seraient ensuite transportées par navires (25 000 tonnes) jusqu'au port de Rotterdam, en Europe.

3.1.5 Liens avec le réseau des produits forestiers existants

La biomasse forestière étant localisée dans des UAF où 2 BGA ont des opérations en cours, des mécanismes de partage des coûts de récolte peuvent être envisagés. L'un des deux BGA (BGA 1) n'est autre que la compagnie forestière qui possède l'usine de sciage retenue comme fournisseur potentiel pour l'usine de granules. Ses opérations forestières se concentrent dans l'UAF A. Le second BGA (BGA 2) opère dans l'UAF B. BGA 2 possède entre autres, une usine de sciage. Un manager de BGA 1 nous a indiqué l'intérêt des deux compagnies pour collaborer avec un exploitant hypothétique d'une usine de granules au niveau des opérations forestières dans les deux UAF. De plus la compagnie BGA 1 est ouverte à l'implantation de l'usine de granules à proximité de son usine de sciage, et comme mentionné précédemment, à approvisionner l'usine de granules en sciures/planures. Compte tenu de ces liens d'affaire potentiels et des hypothèses retenues sur le réseau logistiques, la chaîne de création de valeur des granules se présente comme illustrée par la figure 2.

3.2 Estimation des coûts

Le prix de vente des granules de bois est légèrement plus élevé dans les pays scandinaves [Sénéchal et Grassi, 2009] ce qui procure un avantage compétitif pour le Canada. Par contre une variation à la baisse du taux de change (Euro - Dollar canadien) peut diminuer significativement la marge de profit des producteurs canadiens [Arsenault, 2010]. Par conséquent, le coût de production des granules doit être maîtrisé tout au long de la chaîne de création de valeur et des réductions de coût doivent être recherchées à chaque étape de la chaîne. Nous avons réparti les coûts comme suit :

- *Coût de la matière première.* Il s'agit du coût de récolte de la biomasse en forêt (redevances financières, voirie et frais divers, déchiquetage) et du coût d'achat des sciures/planures.
- *Coût de transport de la matière première* (de la forêt à l'usine de granules). On suppose que le coût de transport des sciures/planures est négligeable (voir section 3.3.2).
- *Coût d'opération de l'usine de granules* (production, main d'œuvre, maintenance, capitaux, etc.)
- *Coût de livraison des granules* jusqu'au port de Rotterdam.

3.2.1 Coût de la matière première

Le tableau 2 présente le coût unitaire de récolte de la biomasse forestière par type, hors transport. Nous avons estimé ce coût en nous basant sur une étude récente [AECOM - CRIQ, 2014].

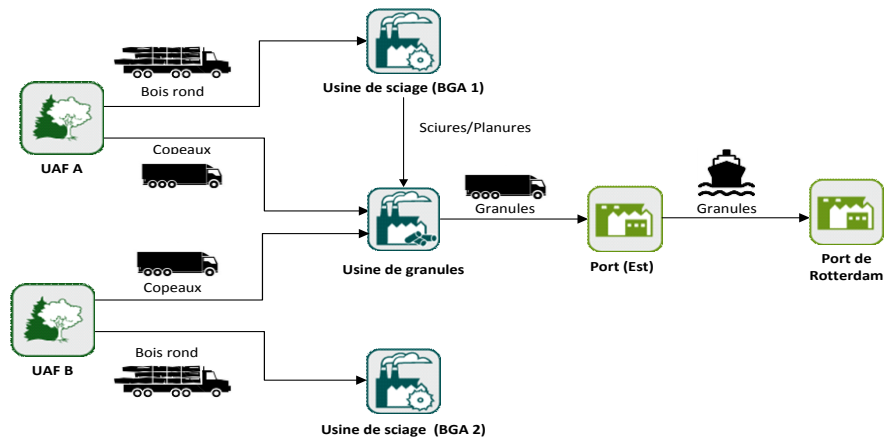


Figure 2. Chaîne de création de valeur des granules pour la région étudiée

Les redevances forestières sont acquittés par les BGA pour chaque mètre cube de bois récolté. Le montant établi s'appuie sur la valeur marchande des bois sur pied (VMBS) vendus sur le marché libre des forêts de l'État [AECOM - CRIQ, 2014]. Les sources de biomasse retenues dans le cadre de notre étude sont constituées de bois sur pied qui ont en théorie, une valeur marchande. Les redevances forestières correspondantes doivent donc s'appliquer en fonction des zones de tarification où ce bois est localisé (UAF A et B). Selon les informations recueillies auprès du MFFP, la moyenne est approximativement de 4\$/m³ dans l'UAF A et 5\$/m³ dans l'UAF B pour le bois de petits diamètres et présentant des défauts naturels, le bois sec et sain, et le bois de TBE. Pour le bouleau à papier et le peuplier, les droits de coupe sont de 1\$/m³ et 0.80\$/m³, respectivement, dans les deux UAF. Nous avons utilisé les facteurs de conversion (m³ – tma) présentés dans le rapport [AECOM - CRIQ, 2014], soient 0,376 tma pour 1 m³ pour le bois de petits diamètres et présentant des défauts naturels ainsi que le bois sec et sain (essence résineux), 0,505 tma pour 1 m³ pour le bouleau à papier, 0,375 tma pour 1 m³ pour le peuplier et une moyenne pondérée de 0,400 tma pour 1 m³ pour le bois de TBE (mixte de résineux infestés et de feuillus récoltés dans le même peuplement que les résineux infestés). Concernant le coût de construction et d'entretien des chemins, il est estimé à 4,25 \$/m³ [AECOM - CRIQ, 2014]. Toutefois, ce coût devrait être partagé entre l'exploitant hypothétique de l'usine de granules et les BGA lorsque ceux-ci opèrent dans les mêmes secteurs forestiers [AECOM - CRIQ, 2014]. Le coût supporté par chaque partenaire devrait être proportionnel aux quantités de bois récoltées par chacun d'entre eux. Toutefois, ne disposant pas de données précises sur les quantités qui seraient récoltées par chacun des BGA et le futur exploitant de granules dans les secteurs de récolte, nous supposons ici que le coût est partagé à parts égales [AECOM - CRIQ, 2014]. De plus, le futur exploitant de l'usine de granules pourrait bénéficier d'un crédit d'impôt gouvernemental pour la partie des dépenses sur la construction et l'entretien des chemins, et qui serait remboursable à 100% [AECOM - CRIQ, 2014]. Cette mesure d'accompagnement peut être raisonnablement envisagée dans un contexte d'incitation à l'établissement d'une filière bioénergétique.

Concernant le coût de supervision, planification, cuisine, etc. (poste de coût autres dans le tableau 2), il est estimé à 5,84 \$/m³

[AECOM - CRIQ, 2014]. Ce coût ne tient pas compte des coûts fixes comme par exemple, l'établissement de camps forestiers. Une telle dépense est supposée être à la charge des BGA, car ceux-ci exploitent déjà ces infrastructures [AECOM - CRIQ, 2014]. Pour le bois de TBE, nous avons retenu l'hypothèse que le coût d'abattage-ébranchage-débardage et de construction et entretien des chemins, au m³, est légèrement supérieur à celui des autres sources de biomasse à cause de la baisse de la productivité de la machinerie (peuplements défoliés) [DGR, 2014]. En nous basant sur l'étude des consultants DGR [DGR, 2014], nous avons majoré les deux postes de coût de 1\$/m³ chacun. Le prix d'achat des sciures/planures a été estimé à 50\$/tma d'après les informations recueillies auprès de nos partenaires industriels.

3.2.2 Coût de transport de la matière première

Le coût de transport a été estimé en nous basant sur [Yemshanov *et al.*, 2014]. Celui-ci inclut le coût de carburant, le coût d'amortissement des machines, la rémunération du personnel, le camionnage et les temps de marche au ralenti. Le tableau 3 détaille le coût de transport par tranche de distance parcourue.

3.2.3 Coût d'opération de l'usine de granules

Le coût d'opération dépend de la capacité de production de l'usine de granules du fait des économies d'échelles [Mani *et al.*, 2006]. En effet, le coût diminue lorsque la capacité de l'usine augmente. Selon [Mani *et al.*, 2006], le coût de production diminue de 10% environ de manière quasi-linéaire entre une capacité de production de 45 000 tonnes et 75 000 tonnes, et reste constant entre 75 000 tonnes et 112 500 tonnes. De son côté, [Goyette, 2009] avance qu'un nouveau producteur de granules, notamment à partir de bois ronds, ne devrait pas viser une capacité de production inférieure à 50 000 tonnes/an et devrait idéalement atteindre 100 000 tonnes/an. Les coûts d'opération pour une capacité de l'usine de granules fixée à 100 000 tonnes/an sont présentés dans le tableau 4. Ces coûts ont été estimés par [Goyette, 2009] et sont basés sur un investissement de 16 M\$ environ [Goyette, 2009].

3.2.4 Coût de livraison des granules

La livraison des granules en Europe nécessite plusieurs étapes ; transport, entreposage, et manutention au port d'exportation. Nous avons estimé les coûts en nous basant sur les données collectées auprès de nos partenaires industriels (tableau 5)

Tableau 2. Estimation du coût de récolte de la biomasse forestière dans les UAF A et B [AECOM – CRIQ, 2014]

Éléments de coût	Types de biomasse	Petits diamètres et défaut naturels (résineux)	Sec et sain (résineux)	Bouleau à papier (feuillu)	Peuplier (feuillu)	Bois de TBE
Redevances forestières (\$*/tma)		11	11	2	2	11
Abattage-ébranchage-débardage (\$/tma)**		50	42,5	32	42,5	45,5
Construction et entretien des chemins forestiers (\$/tma)		5,5	5,5	4,25	5,5	6,5
Autres (cuisine, supervision, planification, etc.) (\$/tma)		15,5	15,5	11	15,5	15,5
Mesurage (\$/tma)		1	1	1	1	1
Déchiquetage-écorçage (\$/tma)***		18	18	18	18	18
Coût total (\$/tma) (sans mesure d'accompagnement du gouvernement)		101	93,5	68,25	84,5	96

* Dollar canadien. **Le mode de récolte retenu est le système en bois long (abatteuse-groupeuse) [AECOM - CRIQ, 2014]

***Coût estimé à partir de [MRNF – CRIQ, 2011].

Tableau 3 : Estimation du coût de transport de la biomasse

Distance (km)	Coût (\$/tma)
Premiers 50 km	20
Chaque tranche de 50 km supplémentaire	10

Tableau 4. Estimation des coûts d'opération d'une usine de granules d'une capacité de 100 000 tonnes/an [Goyette, 2009]

Élément de coût	Coût (\$/tma)
Main d'œuvre	13,02
Maintenance	4,57
Électricité	9,09
Chauffage	1,14
Équipements mobiles (carburant)	3,15
Assurances et taxes foncières	3,45
Frais de vente (3% des ventes)	3,93
Autres (télécom, fournitures de bureau, honoraires, frais bancaires)	1,95
Amortissement	11,09
Frais financiers	5,42
Total	56,81

Tableau 5. Estimation des coûts de livraison des granules

Usine de granules – Port de Rotterdam	
Distance entre l'usine et le port de Baie-Comeau (km)	20
Coût de transport avec retour à vide (\$/tma)	1
Coût d'entreposage (\$/tma)	4
Coût de manutention (\$/tma)	10
Distance entre le port de Baie-Comeau et le port de Rotterdam (km)	<5000
Coût de transport entre le port de Baie-Comeau et le port de Rotterdam (\$/tma)	12

3.3 Optimisation de la chaîne logistique

Nous avons implémenté le réseau avec la plateforme LogiLab développée par le Consortium de recherche FORAC [Lemieux *et al.*, 2011]. LogiLab permet de modéliser l'ensemble des unités d'affaire (forêts, scieries, papeteries, usines de granules, clients, etc.), des processus de transformation et de stockage ainsi que les modes de transport d'une chaîne de création de valeur à l'aide d'un modèle d'optimisation mathématique (voir annexe). Les contraintes liées à la capacité d'approvisionnement, de production, de stockage et de transport sont également prises en compte ainsi que la demande des produits finis des clients. LogiLab permet d'optimiser le réseau en recherchant la meilleure exploitation possible des ressources, en minimisant le coût total ou en maximisation le profit généré. Le réseau logistique ainsi que l'ensemble des flux transportés entre les unités d'affaires sont représentés de manière explicite à l'aide d'une interface graphique.

Nous analysons huit scénarios (tableau 6). Pour les six premiers, nous fixons le prix de vente CIF à Rotterdam à 200 \$/tma et nous évaluons l'impact de différents coûts de récolte de la biomasse en provenance de la forêt sur le profit généré, la marge réalisée pour une tonne métrique de granules et le retour sur investissement (RSI) correspondant. Concernant les deux derniers scénarios, nous retenons le scénario d'approvisionnement présentant le meilleur coût et nous faisons varier le prix de vente des granules. L'objectif est d'évaluer l'impact de la baisse ou de la hausse du prix de vente sur la rentabilité du réseau. Le tableau 6 présente les hypothèses retenues. Pour chacun des scénarios, nous avons fixé la capacité de production de l'usine de granules de 50 000 tonnes/an, 100 000 tonnes/an et 150 000 tonnes/an afin de comparer le profit et le RSI réalisés en fonction de la capacité. Une capacité de production élevée peut générer un profit (et RSI) faible car, pour obtenir la matière première nécessaire, il faudrait récolter la fibre dans des localisations géographiques plus éloignées de l'usine de granules, et donc à un coût plus élevé. Par contre, du fait des économies d'échelle, le coût de production unitaire est plus élevé pour une capacité de 50 000 tonnes/an comparé au coût de production pour une usine d'une capacité de 100 000 tonnes/an ou de 150 000 tonnes/an. En nous basant sur les travaux de [Mani *et al.*, 2006], nous supposons que ce coût est 10% plus élevé pour une usine d'une capacité de 50 000 tonnes/an par rapport à une usine d'une capacité de 100 000 tonnes/an et qu'une usine d'une capacité de 150 000 tonnes/an présente approximativement le même coût qu'une usine de 100 000 tonnes/an. Les investissements pour chacune des 3 capacités de production de l'usine de granules ont été approximées à 10 M\$, 16 M\$ et 20 M\$, respectivement.

Pour les scénarios 1, 2, 3, seule la biomasse en provenance de la forêt est considérée comme matière première.

- **Scénario 1**: on suppose que les coûts de récolte sont entièrement assumés par le futur exploitant de l'usine de granules. Ce cas de figure reflète la situation où les secteurs forestiers dans lesquels la biomasse doit être récoltée ne sont pas en cours d'exploitation par les BGA. Autrement dit, le coût de construction et d'entretien des chemins ainsi que le coût fixe d'établissement de camps et le coût variable de planification, de supervision, etc. sont entièrement assumés par l'usine de granules. De plus, on suppose qu'aucune aide financière n'est accordée par le gouvernement. Ce scénario très conservateur est peu probable dans la réalité. Il nous sert de scénario de base pour évaluer l'impact de la réduction des coûts appliquée dans les scénarios 2 et 3.

Tableau 6. Synthèse des scénarios analysés avec LogiLab

Conditions d'opération	Prix de vente (\$/tma)		
	200	170	230
Sources de la matière première : différents types de biomasse en provenance de la forêt			
- Sans partage des coûts de récolte entre les BGA et l'usine de granules - Sans incitatifs gouvernementaux	Scénario 1		
- Avec partage des coûts à parts égales entre les BGA et l'usine de granules	Scénario 2		
- Avec partage des coûts à parts égales entre les BGA et l'usine de granules - Avec incitatifs gouvernementaux	Scénario 3	-	-
Sources de la matière première :			
- Biomasse en provenance de la forêt - Sciures/planures			
- Sans partage des coûts de récolte entre les BGA et l'usine de granules - Sans incitatifs gouvernementaux	Scénario 4		
- Avec partage des coûts de récolte entre les BGA et l'usine de granules	Scénario 5	-	-
- Avec partage des coûts à parts égales entre les BGA et l'usine de granules - Avec incitatifs gouvernementaux	Scénario 6	Scénario 7	Scénario 8

- **Scénario 2** : on suppose que les coûts de récolte sont partagés à parts égales entre les BGA et l'exploitant de l'usine de granules, mais qu'aucune aide financière n'est accordée par le gouvernement
- **Scénario 3** : les coûts de récolte sont partagés à parts égales entre les BGA et l'exploitant de l'usine de granules et le gouvernement accorde deux types d'aides financières. La première concerne les redevances forestières des différentes sources de biomasse. On suppose que le prix est le même que celui des résidus de récolte (bois non-marchand), c.-à-d. 0,10 \$/m³. Par ailleurs, on suppose que le coût de construction et d'entretien des chemins forestiers (portion du coût de chemin imputable à la récolte de biomasse) est remboursé à 100%. Pour les scénarios 4, 5, 6, nous avons considéré les mêmes hypothèses que les scénarios 1, 2, 3 (respectivement), mais dans ce cas, on ajoute les sciures/planures comme une source de biomasse supplémentaire. Les scénarios 7 et 8 présentent les mêmes hypothèses que le scénario 6, mais cette fois-ci, on considère un prix de vente plus bas (170\$/tma) et plus élevé (230\$/tma) pour refléter, par exemple, la fluctuation du taux change (Euro-Dollar Canadien) ou la fluctuation du prix fixé à Rotterdam (en Euros).

4 RESULTATS

Le profit, la marge et le RSI pour chacune des capacités de production de 50 000 tonnes/an, 100 000 tonnes/an et 150 000 tonnes/an, respectivement et pour les 8 scénarios sont présentés dans le tableau 7. Le RSI dans le secteur des produits forestiers au Canada est de 6.62% en moyenne [Statistics Canada, 2007]. Dans cette étude, nous le fixons à un minimum de 6%. Lorsque la capacité de l'usine de granules est de 50 000 tonnes/an (la capacité est strictement égale à 50 000 tonnes/an), tous les scénarios génèrent un profit à l'exception du scénario 1. Les scénarios 2 et 3 donnent un RSI trop faible (2,04% et 4,67%, respectivement) pour justifier un investissement. Lorsque la capacité de l'usine est fixée à 100 000 tonnes/an, les scénarios 1, 2 et 7 ne génèrent aucun profit. Les autres scénarios sont tous rentables. Enfin, lorsque la capacité de l'usine est fixée à 150 000 tonnes/an, seuls les scénarios 5, 6 et 8 génèrent un RSI suffisant. Dans ce qui suit nous analysons les conditions d'opération qui assurent la rentabilité économique pour chacune des capacités de production de 50 000 tonnes/an, 100 000 tonnes/an et 150 000 tonnes/an.

Lorsqu'un approvisionnement partiel en biomasse est toléré (la contrainte de capacité est inférieure ou égale à 50 000 tonnes/an, puis inférieure ou égale à 100 000 tonnes/an), le profit optimal est obtenu avec une quantité de biomasse de 16 735 tma pour le scénario 1 et de 32 416 tma pour le scénario 2, soit une capacité d'approvisionnement de 33% et de 65% pour une usine de 50 000 tonnes (respectivement) et de 17% et 32% (respectivement) pour une usine de 100 000 tonnes. Toutefois, dans ces cas les coûts de production seraient plus élevés (des-économie d'échelle). Mais même en considérant que le coût de production reste inchangé (par rapport au coût de production d'une usine de 50 000 tonnes et d'une usine de 100 000 tonnes, respectivement), les RSI correspondants sont trop faibles.

Avec un prix de vente fixé à 200 \$/tma, un projet de production de granules est rentable en utilisant la biomasse en provenance de la forêt comme seule source de matière première pour une capacité de l'usine fixée à 100 000 tonnes (satisfaction à 100% de la capacité) avec les conditions d'opération ci-dessous (scénario 3). Le profit annuel généré est dans ce cas optimal.

- les coûts de récolte (construction et entretien des chemins forestiers ainsi que les autres coûts variables liés à la récolte) sont partagés entre les BGA et le futur exploitant de l'usine de granules;
- les redevances financières sont de 0,10\$/m³ pour toutes les sources de biomasse;
- et un crédit d'impôt remboursable en totalité est accordé par le gouvernement pour la construction et l'entretien des chemins (applicable à la portion du coût de chemin imputable à la récolte de biomasse).

Dans les mêmes conditions, il n'est pas rentable d'opérer une usine d'une capacité de 150 000 tonnes. Le profit optimal lorsqu'un approvisionnement partiel de l'usine de granules est toléré (c.-à-d., compris entre 100 000 et 150 000 tonnes) est obtenu avec une quantité de biomasse récoltée de 119 697 tma. Toutefois, le RSI correspondant est de seulement 4,67%. Pour le même prix de vente de 200 \$/tma, le profit et le RSI peuvent être améliorés en utilisant conjointement les sciures/planures et la biomasse récoltée en forêt, et ce sans que les coûts de récolte ne soient partagés avec les BGA ou que des aides financières soient accordées par le gouvernement (scénario 4). Dans ce cas, il est possible d'approvisionner une usine d'une capacité de 50 000 tonnes/an ou de 100 000 tonnes/an à 100% et de réaliser un RSI de 20,16% et de 9,49%, respectivement.

Tableau 7. Résultats obtenus avec LogiLab pour chaque scénario

Scénario	Profit (\$) (Ventes – Coûts)			Marge (\$/tma) (Prix de vente – Coût unitaire)			RSI (%) $\left(\frac{\text{Profit}}{\text{Investissement}}\right)$		
	50 000 t/an	100 000 t/an	150 000 t/an	50 000 t/an	100 000 t/an	150 000 t/an	50 000 t/an	100 000 t/an	150 000 t/an
Scénario 1	-268 598,50	-1 424 276,00	-	-5,37	-	-	-	-	-
Scénario 2	204 335,25	-410 094,75	-	4,09	-4,10	-	2,04%	-	-
Scénario 3	412 179,05	906 346,82	618 639,02	8,24	9,06	4,12	4,67%	5,66%	3,09%
Scénario 4	2 016 025,00	1 518 396,50	292 724,00	40,32	15,18	1,95	20,16%	9,49%	1,46%
Scénario 5	2 169 150,00	2 196 957,75	1 481 905,25	43,38	21,97	9,88	21,69%	13,73%	7,41%
Scénario 6	2 273 334,48	2 985 685,86	3 082 441,82	45,47	29,86	20,55	22,73%	18,66%	15,41%
Scénario 7*	773 334,48	-14 314,14	-	15,47	-0,14	-	7,73%	-	-
Scénario 8**	3 773 334,48	5 985 685,86	7 582 441,82	75,47	59,86	50,55	37,73%	37,41%	37,91%

*Prix de vente des granules = 170 \$. ** Prix de vente des granules = 230 \$ (scénario optimiste).

Une usine d'une capacité de 50 000 tonnes est donc plus rentable qu'une usine de 100 000 tonnes. En effet, la quantité de sciure/planure disponible (32 500 tma) au prix de 50 \$/tma permet de satisfaire 65% du besoin de l'usine de 50 000 tonnes/an contre 33% seulement du besoin de l'usine de 100 000 tonnes/an. Le reste est récolté en forêt ce qui coûte plus cher et réduit significativement le profit généré par l'usine de 100 000 tonnes comparée à l'usine de 50 000 tonnes. Ceci explique le RSI élevé réalisé lorsque la capacité de l'usine est fixée à 50 000 tonnes. Lorsque le profit optimal est recherché, celui-ci est obtenu pour une quantité de biomasse récoltée en forêt de 16 735 tma qui permet de satisfaire conjointement avec les sciures/planures 98% du besoin d'une usine de 50 000 tonnes (ou 48% du besoin d'une usine de 100 000 tonnes/an). Le RSI associé est de 20,25%. Ces résultats indiquent qu'il est plus rentable d'investir dans une usine de 50 000 tonnes et qu'il suffit de récolter 16 735 tma de biomasse en forêt, autrement dit, le 2% supplémentaire ne génère aucun profit. Si le coût de construction et d'entretien des chemins forestiers est partagé avec les BGA à parts égales (scénario 5), une usine de production de 150 000 tonnes devient rentable avec un RSI de 7,41%. Le meilleur scénario dans ce cas est également une usine d'une capacité de 50 000 tonnes/an (RSI de 21,69%). La quantité de biomasse devant être approvisionnée en forêt est de 16 735 tma ce qui assure un profit optimal et permet de satisfaire conjointement avec les sciures/planures 98% du besoin d'une usine de 50 000 tonnes (RSI de 21,71%). Lorsque la capacité maximum est élevée à 100 000 tonnes/an, le profit optimal est obtenu avec un approvisionnement de biomasse en forêt de 32 416 tma, soit une capacité d'approvisionnement conjointement avec les sciures/planures de 65% d'une usine de 100 000 tonnes. Le RSI dans ce cas est de 15,53%. Il est donc plus rentable d'investir dans une usine de 50 000 tonnes.

Si en plus du partage des coûts de récolte, des aides financières sont consenties par le gouvernement (scénario 6), on arrive aux mêmes résultats précédents, mais avec des RSI améliorés (tableau 7). Toutefois, dans ce cas, étant donné que le gouvernement octroie des aides financières, il pourrait exiger que l'usine de granules soit d'une taille assez importante (100 000 tonnes ou 150 000 tonnes) pour privilégier par exemple la création d'emplois. Dans les conditions d'opération du scénario 6, lorsqu'un prix de vente pessimiste de 170\$/tma est utilisé, la production des granules est rentable seulement si la capacité de l'usine est fixée à 50 000 tonnes (RSI de 7,73%) avec les conditions d'opération suivantes :

- la totalité des sciures/planures de la SDO est utilisée;

- les coûts de récolte sont partagés avec les BGA;
 - et des aides financières sont accordées par le gouvernement.
- Le profit optimal est obtenu lorsque seules les sciures/planures sont utilisées comme matière première avec un taux de satisfaction de 65% du besoin d'une usine de 50 000 tonnes et de 33% d'une usine de 100 000 tonnes. Les RSI correspondants sont de 9,91% et de 7,35%, respectivement. Par conséquent, lorsque le prix de vente des granules est bas, il est plus rentable d'investir dans une usine de 50 000 tonnes et d'utiliser seulement les sciures/planures comme matière première.

Enfin, avec un prix de vente optimiste de 230 \$/tma, un projet de production de granules est très rentable (RSI de 37,73% pour une capacité de 50 000 tonnes/an), notamment si les sciures/planures sont utilisées, que les coûts de récolte sont partagés et que des aides financières sont accordées par le gouvernement. Toutefois, ce scénario est peu probable car le prix de vente des granules est élevé. Le profit optimal est trouvé lorsque la totalité de la biomasse est récoltée ce qui permet de satisfaire à plus de 100% le besoin d'une usine de 150 000 tonnes. Le RSI correspondant (37,91%) est légèrement plus élevé que celui obtenu pour une usine de 50 000 tonnes. Une usine de production de 150 000 tonnes/an est donc le scénario le plus rentable dans ce cas. À titre d'exemple, la figure 3 montre les flux de produits du réseau logistique, de la forêt jusqu'au client (marché européen), correspondant au scénario 8 optimisé à l'aide de LogiLab et spatialisé. La capacité de l'usine est fixée à 150 000 tonnes/an. Les différentes unités d'affaires ZT-960-093-51, ZT-961-093-51, etc. représentent les différentes localisations géographiques de la biomasse dans les UAF A et B, par zone de tarification (ZT). La barre verte sous chaque unité d'affaire représente le taux d'utilisation de la capacité (approvisionnement, production, traitement, etc.). Enfin les flux de produits sont représentés par les flèches bleues dont l'épaisseur est proportionnelle aux quantités de produits qui transitent entre les unités d'affaire.

5 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté une étude sur la valorisation de la biomasse forestière dans l'Est du Québec. Nous avons analysé la chaîne de création de valeur des granules de bois, intégrée à l'industrie des produits forestiers traditionnels existants. Différentes sources de biomasse constituées d'espèces de bois présentant peu d'intérêt pour les produits traditionnels et de résidus de sciage. Nous avons analysé plusieurs scénarios reflétant différentes stratégies d'approvisionnement et conditions de marché à l'aide de la plateforme d'optimisation LogiLab.



Figure 3. Représentation spatialisée de la chaîne de création de valeur des granules sous LogiLab

Les stratégies d’approvisionnement sont basées sur la possibilité de partager les coûts de récolte avec les bénéficiaires actuels de garanties d’approvisionnement (BGA) dans deux unités d’aménagement forestières et la possibilité de mise en place de mesures d’accompagnement gouvernementales dans le but d’inciter l’implantation d’une filière bioénergétique. Suite à l’analyse des différents scénarios, les conditions de rentabilité économique ont été identifiées.

Dans cette étude préliminaire, nous nous sommes basés sur des estimations et une spatialisation approximatives de la biomasse forestière. Dans nos travaux futurs, nous nous appuyerons sur les données qui nous seront fournies par le MFFP. Nous collaborons présentement avec plusieurs experts du MFFP pour collecter l’ensemble de ces données. D’un autre côté, le bois affecté par la tordeuse des bourgeons de l’épinette (TBE) étant issu de perturbations naturelles, les quantités disponibles et leur localisation dans le temps sont sujets à des incertitudes. Cet aspect devra également être pris en compte. Par ailleurs, une analyse plus poussée des caractéristiques du port d’exportation considéré dans cette étude sera réalisée afin de valider la capacité du port à être utilisé pour exporter les granules vers l’Europe. Enfin, dans nos travaux futurs, nous inclurons les aspects sociaux et environnementaux dans nos analyses afin de mettre en évidence les retombées socio-économiques et environnementales associées à l’implantation d’une filière bioénergétiques dans l’Est du Québec où l’industrie forestière est particulièrement vulnérable.

6 REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été financé par le Conseil des élus de la Côte-Nord. Nous remercions M. Charles Warren, M. Denis Villeneuve, M. Paul Labbé, Pr. Évelyne Thiffault ainsi que toutes les personnes avec qui nous avons collaboré dans le cadre du projet. Nous exprimons également notre gratitude à Pr. Mustapha Ouhimmou et à M. Yves Dessureault pour leurs nombreux conseils.

7 REFERENCES

AECOM - CRIQ, (2014). Analyse de l’approvisionnement et du conditionnement de la matière ligneuse pour Gropo FerroAtlantica.
 AQPÉR : Association Québécoise de la Production d’Énergie Renouvelable. <http://www.aqper.com/fr/plan-daction-pour-la-valorisation-de-la-biomasse->

[forestiere-17](#). Consulté en mars 2015.
 Arsenault, J. (2010). Global and Canadian Wood Pellet Update. Wood Pellet Association of Canada.
 BW McCloy & Associates Inc., (2009). NWT Wood Pellet Pre-feasibility Analysis. Pointe-Claire: FPInnovations.
 Consultants forestiers DGR inc., (2014). Évaluation de l’impact de la récupération d’un massif forestier affecté par la TBE sur les coûts d’approvisionnement forestier : Cas du secteur Pistuacanis, UA 093-51. Exécuté à la PRAN 2013-14 par PF-Résolu. Québec.
 ÉcoRessources Consultants & EcoTec Consultants (2012). Évaluation économique de la filière de la biomasse forestière destinée aux projets de chaufferies, Québec.
 Goyette, J. (2009). Établissement d’une usine type de production de granules ou de bûches. *Colloque sur la biomasse de la MRC Portneuf. Rivière-à-Pierre; 21 octobre*. Roche-Ingénieurs-conseils.
 Lemieux, S., D’Amours, S., Bouchard, M., Ouhimmou, M., (2011). LogiLab: A New Paradigm to Optimize Forest Supply Chains, *Journées de l’optimisation, HEC Montréal, Canada*.
 Mani, S., Sokhansanj S., Bi, X., Turhollow, A., (2006). Economics of producing fuel pellets from biomass. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 22(3), pp. 421- 426
 MFFP (2004). Portrait forestier région de la côte-nord.
 Morency, P.O., (2012). Portrait des marchés des granules de bois. *Colloque à l’intention des acteurs de développement économique. Lévis, 28 novembre*. Groupe granules, QWEB.
 MFFP (2014). Aires infestées par la tordeuse des bourgeons de l’épinette au Québec en 2014. *Version 1.1*. Accessible sur www.mffp.gouv.qc.ca/forets/fimaq/insectes/fimaq-insectes-portrait-relevés.jsp
 MRNF – CRIQ, (2008). Profil des produits forestiers première transformation (granules et bûches de bois densifié).
 MRNF – CRIQ, (2011). Profil des produits forestiers (technologies de bioénergies à base de biomasse forestière).
 Murray, G., (2014). *Status Update: Canadian Wood Pellet Industry*. Wood Pellet Association of Canada. Accessible sur <http://www.pellet.org/>.
 Mansuy, N., Thiffault, E., Lemieux, S., Manka, F., Paré, D., Lebel, L. (2015). Sustainable biomass supply chains from salvage logging of fire-killed stands: A case study for wood pellet production in eastern Canada. *Applied Energy*, 154, pp. 62 – 73.
 PFI : Pellet Fuels Institute (2011). Pellet Fuels Institute Standard Specification for Residential/Commercial Densified Fuel - June 1st. <http://www.pelletheat.org/>. Consulté en mars 2015.
 Sénéchal, S., Grassi, G., (2009). Logistic management of wood pellets: Data collection on transportation, storage and delivery management. Bruxelles (Belgique): EUBIA – European Biomass Industry Association.
 Statistics Canada, (2007). Accessible sur : <http://www.ccfm.org/ci/rprt2005/English/pdf/5.3b.pdf>
 WPAC: Wood Pellet Association of Canada. <http://www.pellet.org/>. Consulté en janvier 2015.
 Yemshanov, D., McKenney, D.W., Fraleigh, S., McConkey, B., Huffman, T., Smith, S., (2014). Cost estimates of post harvest forest biomass supply for Canada. *Biomass & Bioenergy*, 69, pp. 80-94.