



Étude technico-économique de filières de bioproduits industriels à base de produits ou de biomasses agricoles

Phase 2 : Analyse économique

Phase 3 : Évaluation générale

Rapport final

Pour le ministère de l'Agriculture, des
Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

2010

Équipe

Rédaction, recherche et analyse

Jérôme-Antoine Brunelle,
Analyste

Maribel Hernandez,
Chargée de projets

Catherine Lessard,
Analyste

Julie Louvel,
Analyste

Marjolaine Mondon,
Assistante de recherche

Maria Olar,
Analyste sénior

Supervision scientifique et analyse

Sylvie Mondor,
Directrice

Jean Nolet,
Président

Avec la participation de

Hervé Bernier,
Directeur général, Biopterre

Éric Bégin,
Directeur des opérations, Biopterre

Valérie Pelletier,
Professionnelle de recherche en bioressources,
Biopterre

André Vézina,
Chef de projets, agroforesterie, Biopterre

Denis Rheault,
Chef de projet faisabilité & homologation, Biopterre

Hugues Groleau,
Président, Écosphère / Chargé de projet CEAI

Caroline Côté Beaulieu,
Chargée de projet Écosphère / CEAI

Abdelkader Chaala,
Directeur scientifique et de la R&D, SEREX

Camil Lagacé,
Président, Groupe Sine Nomine

Table des matières

LISTE DES UNITÉS	IV
INTRODUCTION	1
1.FERMENTATION BIOÉTHANOL – MILLET PERLÉ SUCRÉ.....	3
1.1 MARCHÉS POTENTIELS.....	3
1.2 COÛTS.....	4
1.3 COMPÉTITIVITÉ ET RENTABILITÉ.....	7
1.4 RISQUES ET ENJEUX.....	9
1.5 IMPACTS POSITIFS ET NÉGATIFS.....	9
1.6 FAITS SAILLANTS.....	10
2.HYDROLYSE ENZYMATIQUE – BIOÉTHANOL CELLULOSIQUE	11
2.1 MARCHÉS POTENTIELS.....	11
2.2 COÛTS.....	11
2.3 COMPÉTITIVITÉ ET RENTABILITÉ.....	15
2.4 RISQUES ET ENJEUX.....	15
2.5 IMPACTS POSITIFS ET NÉGATIFS.....	16
2.6 FAITS SAILLANTS.....	17
3.GAZÉIFICATION – CARBURANTS RENOUVELABLES	18
3.1 MARCHÉS POTENTIELS.....	18
3.2 COÛTS.....	19
3.3 COMPÉTITIVITÉ ET RENTABILITÉ.....	21
3.4 RISQUES ET ENJEUX.....	22
3.5 IMPACTS POSITIFS ET NÉGATIFS.....	22
3.6 FAITS SAILLANTS.....	23
4.DENSIFICATION – BIOCOMBUSTIBLE SOLIDE – GRANULES.....	24
4.1 MARCHÉS POTENTIELS.....	24
4.2 COÛTS.....	25
4.3 COMPÉTITIVITÉ ET RENTABILITÉ.....	26
4.4 RISQUES ET ENJEUX.....	28
4.5 IMPACTS POSITIFS ET NÉGATIFS.....	28
4.6 FAITS SAILLANTS.....	29
5.BIOGAZ ET MÉTHANISATION	30
5.1 MARCHÉS POTENTIELS.....	30
5.2 COÛTS.....	31
5.3 COMPÉTITIVITÉ ET RENTABILITÉ.....	35
5.4 RISQUES ET ENJEUX.....	35
5.5 IMPACTS POSITIFS ET NÉGATIFS.....	37
5.6 FAITS SAILLANTS.....	37
6.MATÉRIAUX D’ORIGINE RENOUVELABLE - BIOFIBRES	38
6.1 MARCHÉS POTENTIELS.....	38
6.2 COÛTS.....	39
6.3 COMPÉTITIVITÉ ET RENTABILITÉ.....	41
6.4 RISQUES ET ENJEUX.....	42
6.5 IMPACTS POSITIFS ET NÉGATIFS.....	42
6.6 FAITS SAILLANTS.....	43
CONCLUSION.....	44
RÉFÉRENCES	46

Liste des tableaux

TABLEAU 1.1 BUDGET PRÉVISIONNEL DE LA CULTURE DE MILLET PERLÉ SUCRÉ	5
TABLEAU 1.2 SOMMAIRE DES COÛTS – FERMENTATION BIOÉTHANOL – MILLET PERLÉ SUCRÉ	7
TABLEAU 2.1 BUDGET PRÉVISIONNEL DE LA CULTURE DE PANIC ÉRIGÉ (EN \$ PAR TONNE À 89 % DE MS)	13
TABLEAU 2.2 BUDGET PRÉVISIONNEL DE LA CULTURE DU SAULE À CROISSANCE RAPIDE (EN \$ PAR TMA)	13
TABLEAU 2.3 SOMMAIRE DES COÛTS – HYDROLYSE ENZYMATIQUE.....	14
TABLEAU 3.1 SOMMAIRE DES COÛTS – GAZÉIFICATION	21
TABLEAU 4.1 SOMMAIRE DES COÛTS – GRANULATION – PANIC ÉRIGÉ	26
TABLEAU 4.2 SOMMAIRE DES COÛTS – GRANULATION – BIOMASSE FORESTIÈRE	27
TABLEAU 5.1 SOMMAIRE DES COÛTS – BIOGAZ	34
TABLEAU 6.1 SOMMAIRE DES COÛTS – MATÉRIAUX D’ORIGINE RENOUVELABLE - BIOFIBRES	40

Liste des unités

h	Heure
km	Kilomètres
kW	Kilowatts
kWh	Kilowattheures
kWth	Kilowatt thermique
MW	Mégawatt
\$/kW	Dollars canadiens par kilowatt
\$/kWh	Dollars canadiens par kilowattheure
¢/kWh	Cents canadiens par kilowattheure
\$/l	Dollars canadiens par litre
\$/an	Dollars canadiens par année
\$/m ³	Dollars canadiens par mètre cube
\$/m ³ /km	Dollars canadiens par mètre cube et par kilomètre
\$/t	Dollars canadiens par tonne métrique
\$/t/km	Dollars canadiens par tonne métrique par kilomètre
\$/tma	Dollars canadiens par tonne métrique anhydre
\$/km	Dollars canadiens par kilomètre
\$/GJ	Dollars canadiens par gigajoule
\$/US/l	Dollars américains par litre
\$/US/gallon	Dollars américains par gallon
\$/US/kg	Dollars américains par kilogramme

€/t	Euros par tonne métrique
t	Tonnes métrique
t/an	Tonnes métriques par année
t/ha	Tonnes métriques par hectare
t/j	Tonnes métriques par jour
t/h	Tonnes métriques par heure
tma	Tonnes métriques anhydres
tma/ha	Tonnes métriques anhydres par hectare
BTU/h	British thermal unit par heure
MS	Matière sèche

Introduction

L'engouement actuel pour le secteur des bioproduits industriels à l'échelle mondiale s'explique par différents facteurs. En effet, un nombre croissant de pays souhaitent développer ce type de filière dans le but de réduire leur dépendance à l'égard des combustibles fossiles et leurs dérivés, ainsi que leurs émissions de gaz à effet de serre (GES). De plus, plusieurs pays considèrent que les nouveaux débouchés qu'offre le secteur des bioproduits industriels issus de biomasses agricoles bénéficieront aux agriculteurs et aux collectivités rurales.

Dans la foulée du rapport Pronovost qui propose notamment de favoriser au Québec le développement d'une agriculture plurielle et diversifiée, le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) s'intéresse au potentiel qu'offrent les bioproduits comme source de revenus pour les producteurs agricoles québécois. C'est dans cet esprit que s'inscrit cette étude. Ainsi, chacune des filières bioindustrielles y est examinée dans un contexte où les cultures proposées comme matière première sont produites dans une perspective de développement durable de l'agriculture québécois. L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la rentabilité, la compétitivité et les impacts économiques de certaines filières bioindustrielles à base d'intrants agricoles présentant le plus fort potentiel de succès à court et à moyen terme.

En réponse à cet objectif, la méthodologie adoptée par l'équipe d'ÉcoRessources Consultants a d'abord visé à sélectionner les intrants les plus opportuns d'un point de vue technique et agronomique et à identifier les filières de bioproduits les plus prometteuses. Cette première phase (cf. Rapport de la phase 1) fut complétée à l'aide d'une analyse des filières sur la base de critères discriminants, limitants et accessoires qui ont permis d'effectuer le choix des six filières à conserver pour les phases subséquentes. Le choix final des filières bioindustrielles comprend les procédés suivants :

1. Fermentation-Bioéthanol – Millet perlé sucré : En raison de son potentiel de développement au Québec et de l'utilisation possible de millet perlé sucré pour la production d'éthanol en complémentarité avec la production de fourrages;
2. Hydrolyse enzymatique – Bioéthanol cellulosique : En raison de la rentabilité et de l'acceptabilité sociale de la filière cellulosique ainsi que de la grande variété de matières premières produites par les industries agricoles et forestières pouvant être valorisées par cette filière;
3. Gazéification – Carburant renouvelable : En raison du potentiel de commercialisation du procédé, de la variabilité de matières premières pouvant être grandement valorisées ainsi que du bilan environnemental qui serait considéré supérieur aux technologies de première génération;
4. Densification-Biocombustible solide – Granules : En raison de l'amélioration des technologies permettant d'utiliser les résidus du secteur agricole et les cultures lignocellulosiques à des fins énergétiques ainsi que du potentiel d'exportation des granules;
5. Biométhanisation-Biocombustible gazeux – Biogaz : En raison de la présence de technologies offrant la possibilité de valoriser les effluents d'élevage et autres biomasses;
6. Matériaux d'origine renouvelable – Biofibre : En raison du développement des constructions dites écologiques et de l'important impact socio-économique qu'une telle filière pourrait avoir sur les régions.

Le présent rapport présente le résultat de la démarche méthodologique proposée par l'équipe d'ÉcoRessources pour l'analyse économique des filières bioindustrielles (phase 2) ainsi que l'évaluation générale de la filière (phase 3) sous forme de faits saillants présentés à la fin de chaque section. L'analyse économique comporte trois étapes : l'évaluation des coûts, la compétitivité et la rentabilité de la filière en comparaison avec une filière concurrente ou avec des intrants concurrents et les enjeux et risques associés au développement de la filière.

D'entrée de jeu, il est important de noter que l'analyse des coûts est basée sur des estimations pour le Québec effectuées à partir de la littérature. L'analyse de la rentabilité des filières est donc à prendre avec précaution et les données sont des ordres de grandeur. En effet, le caractère émergent des filières fait en sorte que les coûts sont de nature hypothétique. Même dans le cas où les coûts sont connus et documentés, ceux-ci ne seront pas nécessairement représentatifs de tous les projets de développement. De plus, même lorsque la filière est déjà développée au Québec, les entreprises contactées ont été réticentes à nous fournir des données financières pour des raisons de confidentialité. Il en ressort que les coûts présentés doivent être considérés comme des approximations de ce que les véritables coûts pourraient être dans le contexte québécois et que davantage de données sur la rentabilité de la filière seraient nécessaires avant de confirmer, ou non, la rentabilité d'un projet.

1. Fermentation bioéthanol – Millet perlé sucré

La filière de bioéthanol utilise un procédé de fermentation de sucres d'origine végétale. Également appelée filière technologique de l'éthanol de « première génération », elle valorise des sucres fermentables qui peuvent provenir de différentes sources de biomasse. Le maïs et le blé sont actuellement les principaux intrants pour cette production en Amérique du Nord en raison de leur densité et de leur facilité de transport. À l'heure actuelle, plus de 300 000 tonnes de maïs-grain produites au Québec, soit près de 10 % de la production annuelle de 2008, sont utilisées pour la production de bioéthanol. Cependant, pour répondre à l'exigence fédérale de substitution de 5 % de l'essence par le bioéthanol en moyenne au niveau national, 20 % de la production québécoise de maïs-grain (soit 0,65 millions de tonnes) devrait être destinée à cet usage si le Québec souhaite développer une capacité de production de bioéthanol équivalente à son marché domestique potentiel. Le Québec pourrait également décider de produire une quantité moindre que son marché potentiel, et ainsi importer le bioéthanol, ou encore produire davantage que son potentiel et exporter les surplus.

Compte tenu des difficultés d'approvisionnement probables en maïs, advenant le cas du développement de la filière bioéthanol par le Québec, et du questionnement social entourant l'utilisation de terres agricoles pour la production de cultures énergétiques, une filière alternative est étudiée. Le millet perlé sucré est choisi comme sous-filière alternative dans notre analyse en raison de ses rendements attendus, de son faible coût de production de fourrage, et de son effet bénéfique dans la rotation des cultures. Cette culture a également l'avantage d'être bien documentée en raison de travaux de recherche entrepris au Québec.

1.1 Marchés potentiels

Bien que de nombreux produits de consommation courante puissent contenir de l'éthanol, le bioéthanol est principalement utilisé comme carburant renouvelable. Plusieurs pays, dont les États-Unis et les pays membres de l'Union européenne, ont des exigences quant à la proportion de bioéthanol dans les carburants. Au Canada, l'exigence de 5 % de bioéthanol dans l'essence à partir de 2010 représenterait une consommation de plus de 2 milliards de litres de carburants renouvelables annuellement. Une telle production requerrait environ 5 millions de tonnes de maïs (sur une production mondiale de 817 millions de tonnes en 2009 (FAO¹)) cultivées sur approximativement 600 000 hectares, soit près de la moitié des surfaces présentement utilisées pour la production de maïs-grain au Canada.

Comme aucune contrainte n'est fixée en termes de lieu de fabrication des biocarburants qui seront consommés au Canada pour répondre à la nouvelle exigence canadienne, la part de la production qui reviendra au Québec n'est pas connue. Cependant, en émettant l'hypothèse que tout l'éthanol consommé au Québec sera également produit dans la province, environ 400 millions de litres d'éthanol seront nécessaires. Il s'agit de près de trois fois la production actuelle du Québec. Présentement, l'usine Éthanol GreenField inc à Varennes, ayant une capacité annuelle de

¹ Voir <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancor>

production de l'ordre de 140 millions de litres, est le seul lieu de production de bioéthanol de la province.

Il existe donc un marché domestique potentiel important pour la filière du bioéthanol au Québec. Cependant, celle-ci devra être concurrentielle avec les autres filières canadiennes ainsi qu'avec les filières étrangères (principalement américaines mais aussi brésiliennes). Dans le cas de la sous-filière du millet perlé sucré, son développement requiert que ses coûts soient comparables à ceux de la sous-filière traditionnelle du maïs-grain.

1.2 Coûts

Dans cette section, les coûts sont évalués pour une usine produisant 150 millions de litres d'éthanol au Québec. En raison de la nature hypothétique de cette usine, nous présentons une estimation des coûts éventuels à titre indicatif seulement.

Coûts fixes en capital

Pour une usine ayant une production annuelle d'environ 150 millions de litres, l'investissement, incluant le capital fixe et le fonds de roulement, est évalué à plus de 100 millions de dollars canadiens selon le *Ethanol Financial Projection Workbook*, outil développé par Ressources naturelles Canada pour l'évaluation des projets d'usines d'éthanol au Canada. Ceci correspond donc à un coût en capital de 0,66 \$/l d'éthanol de capacité de production annuelle. Nous émettons l'hypothèse que ces coûts sont également appropriés pour une usine utilisant la sève de millet perlé sucré comme matière première. Dans les faits, la mélasse de millet perlé sucré pourrait être utilisée en complément avec le maïs-grain lors du processus de fabrication d'éthanol. Les coûts d'amortissement sur une période de 10 ans seront de 0,066 \$/l. À la ferme, l'achat d'une presse servant à l'extraction de la sève représenterait des coûts fixes supplémentaires. Le coût d'une telle presse n'est présentement pas connu.

Coûts de la matière première

En raison de l'absence de marché actuel pour le millet perlé sucré, il n'existe présentement pas de prix d'achat pour cette commodité. Cependant, à l'aide de budgets partiels, il est possible d'estimer un coût de production à la ferme.

L'analyse pose comme hypothèse que le rendement de la culture atteindrait 40 t/ha avec un taux de sucre pour la sève de 16 % (base humide à 40 % de matière sèche), tel qu'il est mentionné dans les budgets partiels disponibles dans la littérature. Par contre, lors d'essais réalisés en Outaouais, des rendements de 80 t/ha ont été obtenus. Un taux de sucre de la sève sucrée de 12 % serait également possible, et lors d'essais, un taux de sucre de 22 % a également été atteint². Il faut donc situer les coûts véritables à l'intérieur d'une fourchette de possibilités.

Sur la base des budgets partiels réalisés par le MAPAQ pour un rendement estimé de millet de 40 tonnes par hectare (base 40 % de matière sèche), la production de millet perlé sucré pour la production de fourrages implique des coûts moyens évalués à 45,50 \$/tonne (gestion de 2 coupes entreposées en silo-couloir et avec travail à forfait). Avec un rendement de 80t/ha, les coûts par

² Communication personnelle avec Marc F. Clément, MAPAQ

tonne sont réduits de moitié, puisque compte tenu du budget partiel, les coûts variables sont à l'hectare et non à la tonne. Le reste des coûts sont liés à l'entreposage et aux autres frais.

Une tonne de millet perlé sucré permet de produire 43,7 litres d'éthanol considérant un taux de sucre de 16 %. Avec un taux de sucre de 12 %, cette quantité sera plutôt de 32,8 litres d'éthanol par tonne. En prenant en considération un scénario optimiste incluant un rendement de 80 T/ha et un taux de sucre de 16 %, les coûts de production du millet perlé par litre d'éthanol produit seront de 0,52 \$/l. Dans le cas d'un rendement de 40t/ha et d'un taux de sucre de 12 %, ces coûts seraient plutôt de 1,39 \$/l. Les hypothèses de base ont ainsi un important effet sur l'estimation des coûts.

Le tableau 1.1 présente les coûts pour un budget prévisionnel visant un rendement de 40 tonnes par hectare.

TABLEAU 1.1 BUDGET PRÉVISIONNEL DE LA CULTURE DE MILLET PERLÉ SUCRÉ

	Coûts pour intrants et opérations culturales (\$/t)	Frais de récolte et de transport (\$/t)	Autres frais et entreposage (\$/t)	Total
Rendement de 40 t/ha à 16 % de taux de sucre	15,37	20,87	9,26	45,50
Rendement de 80 t/ha à 16 % de taux de sucre	7,69	10,44	4,63	22,75

Source : Clément, 2009.

Un facteur important à prendre en compte est la capacité de vendre les sous-produits de l'extraction de la sève. Environ 50 % du volume initial pourrait être revendu à son coût de production pour l'alimentation du bétail, d'après nos hypothèses. Selon Marc F. Clément, le prix de marché pour le fourrage de millet perlé sucré pourrait se comparer à celui d'un foin de qualité moyenne, soit un prix approximatif de 60 \$/t pour 85 % de matières sèches. Avec une valorisation des sous-produits, le coût minimal du millet perlé sucré passerait ainsi à 0,26 \$/litre d'éthanol produit. Nous estimons ainsi que le coût du millet perlé sucré se situerait entre 0,26 \$ et 1,39 \$ par litre d'éthanol produit. Ces coûts ne prennent pas en compte les frais de pressage, qui restent pour l'instant inconnus mais pourraient représenter un poste de dépense non négligeable.

Le transport des intrants représente également un poste de dépense important. Le scénario de transport le plus probable serait l'extraction de la sève à la ferme et la concentration de la sève en mélasse dans une unité de transformation centralisée. En date du mois d'octobre 2009, le coût de transport de liquides pétroliers par camion-citerne d'une capacité de 38 000 l était de 3,83 \$/km. De tels camions pourraient être utilisés pour transporter la sève ou la mélasse. En considérant un rayon maximal d'approvisionnement de 100 km, le coût total d'un transport serait de 766 \$, soit de 0,02 \$ par litre de sève ou de mélasse transporté. Notons qu'au Québec, les infrastructures routières accessibles au transport lourd se limitent quasi exclusivement au réseau routier national. La très vaste majorité du réseau routier sous l'autorité municipale est inaccessible pour les camions lourds. Par conséquent, la distance de transport en kilomètres linéaires entre une entreprise agricole et le point de livraison est souvent bien supérieure à la ligne directe entre ces deux endroits. Ainsi, pour une usine située dans un rayon de 100 km, la distance à parcourir par les camions lourds pourrait être près du double, soit de 200 km.

En considérant une production de 0,11 litre d'éthanol par litre de sève et de 0,22 litre d'éthanol par litre de mélasse, les coûts de transport seraient de 0,18\$/l d'éthanol pour la sève et de 0,09 \$/l d'éthanol pour la mélasse excluant les coûts de pressage. Selon l'hypothèse d'une installation de concentration située à mi-chemin entre la ferme et l'usine de production d'éthanol, le coût de transport serait de 0,135 \$/l, ce qui est relativement élevé par rapport aux coûts de la matière première (de 10 % à 52 % de ces coûts dépendant des hypothèses). Un approvisionnement en sève ou en mélasse de millet perlé sucré à proximité des usines de bioéthanol devient ainsi capital pour réduire les frais d'exploitation.

Autres coûts

Les autres coûts considérés lors du processus de la fermentation du millet perlé sucré sous forme d'éthanol sont liés aux levures, à l'énergie utilisée lors de la transformation, à la main-d'œuvre et au transport des produits finis.

Les coûts des levures, des dénaturants et des autres produits chimiques représentent 16 % des coûts totaux, ce qui est estimé à environ 0,10 \$/l.

La consommation d'énergie d'une usine de production de bioéthanol à partir de maïs-grain est estimée par le *Ethanol Financial Projection Workbook* de Ressources naturelles Canada à 0,0098 GJ et 0,24 kWh par litre d'éthanol produit. Considérant un prix de référence de 7,35 \$/GJ pour le gaz naturel en 2008 et de 0,0457 \$/kWh pour l'électricité en 2007, les coûts en énergie seraient d'environ 0,08 \$/l d'éthanol produit. Ce coût pourrait être plus bas pour la production d'éthanol à partir de millet perlé sucré en raison de l'absence de l'étape de déshydratation des drêches, qui requiert beaucoup d'énergie.

Les usines de bioéthanol avec une capacité annuelle pouvant atteindre jusqu'à 100 millions de litres devraient être capables d'opérer avec une trentaine d'employés, tandis qu'une quarantaine d'employés pourraient être nécessaires pour une usine avec une capacité annuelle de production de 200 millions de litres et plus (S&T² et Meyers Norris Penny LLP, 2004). Le coût moyen de la main-d'œuvre dans l'industrie du bioéthanol au Canada est estimé à 45 000 \$ par employé. À ce coût viennent s'ajouter ceux liés aux avantages sociaux. Selon une hypothèse d'une usine de 150 millions de litres avec 35 employés, les coûts associés à la main-d'œuvre, excluant les avantages sociaux, seraient de 0,016 \$/l, ce qui représente un poste de dépense relativement faible.

Les mêmes réseaux de transport et de distribution peuvent être mis à profit pour le transport du bioéthanol et de l'essence, ce qui facilite la mise en place de la filière. Une compagnie spécialisée dans le transport de produits pétroliers liquides a été en mesure de nous indiquer qu'au mois d'octobre 2009, le transport du bioéthanol par camion correspondait à un coût d'environ 3,30 \$/km pour un voyage de 38 000l. Compte tenu de ces données, le coût de transport entre Varennes et Montréal (25 km) est estimé à 80 \$, soit environ 0,004 \$/l pour un voyage aller-retour.

Sommaire des coûts

Le tableau 1.2 présente une synthèse des coûts basée sur les estimations présentées dans les sections précédentes.

TABLEAU 1.2 SOMMAIRE DES COÛTS – FERMENTATION BIOÉTHANOL – MILLET PERLÉ SUCRÉ

Élément de coût	Coût
Investissements	100 millions de \$ pour une capacité de 150 millions de litres par année (0,66 \$/l d'éthanol de capacité actuelle)
Frais d'exploitation	
Matière première	0,26 \$/l à 1,39 \$/l
Transport de la matière première	0,135 \$/l
Levures et dénaturants	0,10 \$/l
Énergie	0,08 \$/l
Main-d'œuvre	0,016 \$/l
Transport de l'éthanol	0,004 \$/l
Total – Frais d'exploitation	0,60 \$/l à 1,73 \$/l
Total – Incluant amortissements	0,69 \$/l à 1,82 \$/l

Le total des coûts variables pour la sous-filière de bioéthanol à base de millet perlé sucré, selon notre estimation, se situe entre 0,60 \$/l et 1,73 \$/l. Le coût de 1,73 \$/l est basé sur un scénario relativement pessimiste. Les coûts de pressage sont cependant exclus et les coûts d'énergie, probablement surestimés.

1.3 Compétitivité et rentabilité

Pour être compétitive, la sous-filière de bioéthanol à base de millet perlé sucré doit être en mesure de concurrencer l'éthanol produit à partir de maïs-grain au Québec et ailleurs en Amérique du Nord. De plus, le producteur agricole doit avoir un avantage à produire du millet perlé sucré plutôt que du maïs-grain. Le millet perlé sucré est une culture encore peu développée et comportant ainsi de nombreux risques liés aux marchés et à la production. Cependant, il a l'avantage de fournir à la fois un fourrage de qualité moyenne ainsi qu'un coproduit pouvant être valorisé pour la production d'énergie.

Au Québec, le coût de production moyen du maïs-grain entre 2006 et 2008 était de 222,58 \$/t. Il s'agit d'une valeur considérablement plus élevée que le prix du marché moyen qui était pour la même période de 184,57 \$/t. La différence, soit 38,01 \$, devrait donc représenter la subvention accordée au secteur.

Il est possible de produire 400 litres d'éthanol à partir d'une tonne de maïs-grain. L'usine de bioéthanol Greenfield retourne le tiers du maïs acheté sous forme de drêches de distillerie. Selon Leduc (2007), le prix des drêches de distillerie en 2006 était de 160 \$/t, soit légèrement moins élevé que le prix du maïs-grain pour la même période, soit 174 \$/t. Compte tenu de la possibilité de valorisation de la drêche, le coût de production de maïs-grain par litre d'éthanol produit serait d'environ 0,33 \$, incluant le transport à l'usine, ce qui s'approche du coût du millet perlé sucré livré à l'usine étant donné un rendement de 80 t/ha et d'un pourcentage de sève de 16 %. Selon nos hypothèses, les coûts de fermentation et de transport de l'éthanol produit à l'aide de millet perlé sucré et de maïs-grain sont très semblables. Le coût total de la production d'éthanol à partir de maïs-grain au Québec avoisinerait donc 0,52 \$/l. Il ressort de cette analyse qu'en obtenant de hauts rendements et un produit d'excellente qualité ainsi qu'en maximisant les chaînes d'approvisionnement, le millet perlé sucré pourrait être compétitif avec le maïs-grain comme source d'intrant pour la filière de la production d'éthanol par fermentation. La rentabilité de la filière dépend cependant des technologies et des coûts de pressage à la ferme, qui restent encore à déterminer.

Le bioéthanol produit au Québec doit également être compétitif par rapport à la production canadienne. En 2006, le coût de production du bioéthanol à partir de blé ou de maïs au Canada était estimé entre 0,36 et 0,46 \$/l (Milbrandt et Overend, 2008). Compte tenu du coût de transport, l'éthanol produit au Québec reste concurrentiel. Par exemple, un transport sur 1000 km entre l'Ontario et le Québec, correspondrait à une augmentation du coût total de 0,09 \$/l ce qui porterait le coût de l'éthanol canadien entre 0,45 \$/l et 0,55 \$/l. Il est cependant clair que l'éthanol québécois doit être consommé sur le marché domestique et qu'il n'est pas compétitif lorsqu'il est exporté à l'extérieur de la province.

Le gouvernement du Québec offre temporairement un crédit d'impôt remboursable pour la production de bioéthanol au Québec. Ce crédit d'impôt est accordé pour une période maximale de dix ans, se terminant au plus tard le 31 mars 2018. Le taux maximal du crédit d'impôt, pour un mois donné, est de 0,185 \$/l (Revenu Québec, 2003). Des subventions directes sont également offertes par le gouvernement canadien. En tenant compte du modèle de coûts utilisé, il n'est pas possible de déterminer directement comment les subventions cumulées pourraient affecter le coût de production d'éthanol à partir de millet perlé sucré. Cependant, au Canada, les différences de subventions entre le Québec et les autres provinces ne seront pas nécessairement assez grandes pour affecter la compétitivité de la filière.

Aux États-Unis, l'un des principaux pays producteurs d'éthanol de la planète, les subventions accordées au secteur agricole permettent de réduire les coûts de production nets à environ 0,30 \$US le litre d'éthanol fait à partir de maïs-grain. La filière du bioéthanol reçoit significativement plus d'aides gouvernementales aux États-Unis qu'au Canada. L'éthanol américain produit près de la frontière pourrait ainsi être compétitif sur le marché québécois. Également, le Brésil a des coûts de production pour l'éthanol produit à base de canne à sucre de 0,20 \$US par litre (IEA, 2006). La taxe d'accise de 0,014 \$/l ne représente qu'une faible barrière tarifaire. Les coûts de transport élevés pourraient cependant contribuer à réduire la compétitivité de l'éthanol brésilien sur le marché québécois.

1.4 Risques et enjeux

Les principaux risques et enjeux liés au développement de la sous-filière de la production d'éthanol par la fermentation du millet perlé sont surtout de nature technique. La culture du millet perlé sucré constitue encore une production émergente au Québec, alors que ce n'est que dans un contexte agronomique et technique optimal que la sous-filière peut être compétitive. La disponibilité d'intrants adaptés à cette culture et un encadrement technique adapté sont donc des éléments primordiaux au développement de la filière.

La possibilité d'utilisation de la mélasse de millet perlé sucré par une usine de production d'éthanol par fermentation utilisant habituellement le maïs-grain permet de réduire les risques associés à la construction d'une usine par des constructeurs inexpérimentés ou qui utilisent des technologies qui n'ont pas encore été mises à l'épreuve. De ce fait, l'utilisation de mélasse de millet perlé sucré devrait être facilitée.

L'approvisionnement en millet perlé sucré ne cause également pas de problème important puisque même de faibles quantités de mélasse pourraient être valorisées par l'usine de production d'éthanol utilisant normalement le maïs-grain. De plus, contrairement à d'autres cultures énergétiques, la culture de millet perlé sucré sur des terres habituellement utilisées à des fins alimentaires ne cause pas d'enjeux éthiques, puisque cette culture permet également d'obtenir un fourrage destiné à l'alimentation des animaux. De plus, pour obtenir une production de qualité à haut rendement et pour diminuer les impacts environnementaux, la culture du millet perlé ne se fera pas année après année, mais devra être intégrée à une rotation des cultures. Le bilan environnemental de la production de millet perlé sucré est également meilleur que celui du maïs-grain, étant donné que la culture à interlignes étroites permet une meilleure protection des sols que les cultures en rangées.

1.5 Impacts positifs et négatifs

Tel qu'il a été mentionné précédemment, le millet perlé sucré aurait un impact environnemental positif par rapport à la culture du maïs-grain. Cette culture peut aussi offrir un bon rendement en fourrage même si les sucres en sont extraits, ce qui aurait l'avantage de procurer un revenu à l'entreprise d'élevage. Le millet perlé sucré permettrait de diversifier les sources de revenus des producteurs agricoles et de diminuer ainsi naturellement certains risques liés tant aux ravageurs qu'au climat. Cependant, dans le contexte actuel, le choix des entreprises agricoles disposant d'un éventail de possibilités se portera sans doute davantage vers des cultures qui permettent de réduire les risques de marché à l'aide des programmes de soutien en place.

Le fait que la production de millet perlé sucré ne soit pas couverte par le Programme d'assurance stabilisation des revenus agricoles (ASRA) contrairement au maïs, introduit la question des avantages liés à cette culture tant pour les producteurs que pour les transformateurs. Certains producteurs ayant des terres sablonneuses et acides, peu adaptées à la culture du maïs-grain, pourraient voir un avantage à la production de millet perlé sucré, surtout considérant que cette culture permet d'obtenir deux produits complémentaires différents, ce qui réduit ainsi les risques liés à chacun des marchés.

1.6 Faits saillants

- Il existe un important marché potentiel pour la production de bioéthanol au Canada compte tenu de l'exigence canadienne de 5 % de bioéthanol dans l'essence à partir de 2010;
- Le plus important poste de dépenses lié à la production de bioéthanol par la fermentation de millet perlé sucré est lié aux coûts de la matière première;
- Selon l'hypothèse d'un rendement en millet perlé sucré et d'un taux de sucre optimaux, cette culture pourrait être compétitive avec le maïs-grain pour la production de bioéthanol surtout si les coûts de transport et de pressage s'avèrent peu élevés;
- Le bioéthanol produit au Québec n'est pas compétitif sur le marché de l'exportation. Cependant, l'éthanol américain, parce qu'il est moins cher que l'éthanol québécois, pourrait être importé sur le marché québécois;
- Le millet perlé sucré a l'avantage d'offrir un double produit, soit le fourrage et la sève et pourrait être produit sur des terres agricoles destinées à l'usage alimentaire.

2. Hydrolyse enzymatique – Bioéthanol cellulosique

Certaines technologies de production d'éthanol de seconde génération utilisent des enzymes capables d'hydrolyser la cellulose en sucres fermentables. À court terme, cette filière est toujours au stade de préparation et d'optimisation de ses procédés.

La phase initiale du processus de production d'éthanol cellulosique par hydrolyse enzymatique est différente de celle de la production d'éthanol à partir de canne à sucre ou de maïs et comporte des défis sur le plan technologique. Une fois la cellulose libérée par hydrolyse enzymatique et hydrolysée en glucose, les étapes subséquentes de fermentation sont toutefois les mêmes.

Toutes les compagnies qui développent ces technologies affirment qu'elles arriveront à exploiter de telles installations de manière rentable, sans pour autant se prononcer sur où, quand et comment elles y parviendront. Des enjeux entourant l'infrastructure nécessaire, la chaîne d'approvisionnement en matière première ainsi que le transport et le stockage de la biomasse doivent également être examinés préalablement au développement commercial de la filière.

2.1 Marchés potentiels

Tel qu'il a déjà été mentionné, l'atteinte de l'objectif fédéral de substitution de 5 % de l'essence par le bioéthanol nécessitera le développement de filières bioindustrielles capables de produire ce biocarburant à un coût compétitif, et ce, sans menacer les filières agricoles existantes. En effet, les enjeux éthiques que soulève l'utilisation des biocarburants de première génération en raison de la compétition avec les filières alimentaires stimulent le développement de ceux de seconde génération (hydrolyse enzymatique) ou de troisième génération (gazéification).

2.2 Coûts

Pour notre analyse, nous considérons une usine d'une production annuelle d'environ 200 millions de litres. Les informations fournies par l'industrie indiquent qu'il s'agirait d'une taille optimale en raison d'importantes économies d'échelle et que des usines de taille plus modeste ne seraient pas viables à long terme.

Coûts fixes en capital

Il n'existe pas de telles usines à une échelle commerciale au Québec. Les coûts fixes estimés de cette section doivent donc être considérés avec prudence étant donné la nature hypothétique de ces installations. Il semble cependant que l'investissement nécessaire à l'implantation de technologies d'hydrolyse enzymatique à l'échelle commerciale constitue une limite importante de cette filière.

D'après le *United States Department of Agriculture (USDA)*, les coûts en capitaux pour construire une usine varieraient de 1,14 à 1,45 \$US/l pour l'éthanol cellulosique (Collins, 2006), ce qui est de trois à six fois supérieur aux coûts d'une usine de production d'éthanol par fermentation. Basé sur

ces estimations, le coût d'une usine d'une capacité de 200 millions de litres serait de 237 à 302 millions de dollars canadiens³.

Coût de la matière première

Les frais d'exploitation varient dépendamment du type de matière première utilisée. Les technologies de seconde génération font appel à des enzymes capables d'hydrolyser la cellulose, ainsi le bioéthanol peut être fabriqué à partir de toute biomasse contenant cette matière (par exemple, résidus de maïs (feuilles et tiges), paille, graminées (panic érigé, *Miscanthus giganteus*, etc.), copeaux de bois, sciures de bois, etc.). Dans le cadre de cette analyse, nous évaluons les coûts pour la paille de céréales et de maïs, les résidus forestiers, le panic érigé et le saule à croissance rapide. D'autres produits agricoles, telles que les cultures fourragères, pourraient également être utilisés pour la production d'éthanol, mais ceux-ci sont déjà valorisés à des fins d'alimentation animale.

D'après les experts consultés, une usine de 200 millions de litres de capacité nécessiterait un approvisionnement annuel de 700 000 tonnes métriques de biomasse. Pour produire un litre d'éthanol, 3,5 kg de biomasse seraient donc nécessaires. En d'autres mots, une tonne de biomasse permet de produire 286 litres d'éthanol. Notre analyse utilise ce ratio pour tous les types de biomasses.

Au Québec et en Ontario, principalement en raison de la concurrence pour la litière de bétail, la paille de céréales se détaille à environ 100 \$/t (0,35\$ par litre d'éthanol), mais varie selon l'année et la région. Quant au coût de la paille de maïs, une étude d'ÉcoRessources Consultants et d'Agronovita inc. (2010) l'estime à 87 \$/t (0,30 \$ par litre d'éthanol) incluant les coûts de transport dans un rayon de 100 km.

Le coût des résidus de coupe forestière est estimé entre 20 et 46 \$/t par Bradley (2008) pour le Canada, incluant le transport pour une distance de 50 à 100 km. La firme FPIInnovations-Feric a pour sa part développé le modèle BiOS (*Biomass Opportunity Supply model*) pour, entre autres, estimer le coût de livraison de la biomasse forestière provenant des parterres de coupes à une usine de transformation. Ils obtiennent un coût de 56 \$/t pour une distance de transport de 120 km. Le coût de la biomasse forestière varierait donc entre 0,07 \$ et 0,20 \$ par litre d'éthanol produit.

Il n'existe présentement pas de prix de marché pour le panic érigé étant donné que cette culture est encore en développement. Le coût d'achat doit donc être calculé sur la base des coûts de production. Nous avons basé notre analyse sur un rendement variant entre 6,7 t/ha pour la Beauce et 10 t/ha pour la Montérégie, en fonction de la compilation des essais de panic érigé réalisés au Québec, publiée par le CRAAQ (2008a). Ceux-ci risquent de varier considérablement compte tenu de la région et de la qualité des terres agricoles. Les coûts fixes et variables proviennent de budgets partiels réalisés par le MAPAQ (Dufort et al., 2007). Le tableau 2.1 présente les coûts de production estimés pour la région de la Montérégie et de la Beauce.

³ Basé sur le taux de change de juin 2010, soit 1,037 \$ CAN pour 1 \$ US.

TABLEAU 2.1 BUDGET PRÉVISIONNEL DE LA CULTURE DE PANIC ÉRIGÉ (EN \$ PAR TONNE À 89 % DE MS)

	Intrants	Opérations culturales	Frais de récolte et de transport	Autres frais	Total
Montérégie (2 500 UTM) Rendement de 10 t/ha	6,64	1,47	20,50	11,72	40,31
Beauce (2 250 UTM) Rendement de 7 t/ha	9,48	2,08	29,28	16,73	57,57

À la lumière de ces budgets de production, le panic pourrait être rentable pour les producteurs agricoles, s'il est vendu à un prix variant entre 70 \$ et 90 \$ par tonne (0,25 \$ à 0,32 \$ par litre d'éthanol produit). En effet, les producteurs des différentes régions québécoises pourraient alors couvrir leurs coûts de production et dégager un profit.

La plantation de saules à croissance rapide en milieu agricole représente un investissement sur plusieurs années sans possibilité de gain à court terme pour les producteurs agricoles. L'évaluation des coûts doit donc prendre en compte le cycle entier de production. Selon le CRAAQ (2008b) le coût moyen de production serait de 50,27 \$/t basé sur 25 hectares en culture (voir le tableau suivant), si l'on considère un rendement d'environ 44 tma/ha pour la première récolte et d'environ 50 tma/ha pour les six récoltes suivantes (une récolte aux trois ans et la première récolte à la 4^e année de production). Avec un rendement plus faible, soit 32 t/ha, les coûts augmentent à 77,72 \$/t.

TABLEAU 2.2 BUDGET PRÉVISIONNEL DE LA CULTURE DU SAULE À CROISSANCE RAPIDE (EN \$ PAR TMA)

	Intrants et opérations culturales	Frais de récolte et de transport	Autres frais	Total
Rendement de 50 tma/ha par récolte	13,58	9,34	27,36	50,27
Rendement de 32 tma/ha par récolte	21,00	14,44	42,28	77,72

Étant donné l'investissement et les coûts d'opportunité associés à cette culture, un prix entre 80 \$ et 100 \$/tma semble probable (0,28 à 0,35 \$ par litre d'éthanol produit).

Autres coûts

L'hydrolyse enzymatique requiert l'utilisation d'enzymes (cellulase) qui sont présentement très coûteuses. Certains modèles, utilisés pour évaluer les coûts de la production de bioéthanol cellulosique aux États-Unis, établissent le coût des enzymes à 0,10 \$US/gallon (Foust *et al.*, 2009), ce qui correspond à environ 0,03 \$/l. Toutefois, ceci constitue une cible à long terme. De fait, le coût actuel des cellulases serait trois fois plus élevé, soit à 0,09 \$/l. Ceci s'ajoute au coût des levures, qui, selon toute vraisemblance, serait le même que pour l'éthanol produit par fermentation.

Les coûts de main-d'œuvre de la filière de bioéthanol cellulosique devraient être semblables à ceux de la filière de bioéthanol de première génération. En général, l'industrie du bioéthanol au Canada octroie un salaire moyen d'environ 45 000 \$ par employé, soit 0,02 \$/l. Les coûts de transport de l'éthanol devraient être de 0,004 \$/l, similairement à l'éthanol produit par fermentation.

Dans notre analyse, nous utilisons un coût de l'énergie nul considérant que le procédé crée de l'énergie qui peut être revendue sur le réseau électrique. Cela suppose qu'un tel rachat deviendrait possible. Le coût associé à l'énergie serait donc vraisemblablement négatif. La différence avec le procédé de fermentation semble majoritairement dû au fait que les usines d'hydrolyse enzymatique sont mieux équipées pour récupérer l'électricité, plutôt qu'à une différence de procédés.

Sommaire des coûts

Le tableau 2.3 présente une synthèse des coûts basée sur les estimations présentées dans les sections précédentes.

TABLEAU 2.3 SOMMAIRE DES COÛTS – HYDROLYSE ENZYMATIQUE

Élément de coût	Coût par type de matière première				
	Paille de céréale	Paille de maïs	Biomasse forestière	Panic érigé	Saule à croissance rapide
Investissements	237 à 302 millions de \$ pour une capacité de production de 200 millions de litres (1,19 à 1,51 \$/l d'éthanol de capacité actuelle)				
Frais d'exploitation					
Matière première (incluant transport)	0,35 \$/l	0,30 \$/l	0,07 \$/l à 0,20 \$/l	0,25 \$/l à 0,32 \$/l	0,28 à 0,35 \$/l
Enzymes et levures	0,19 \$/l				
Énergie	0,00 \$/l				
Main-d'œuvre	0,02 \$/l				
Transport de l'éthanol	0,004 \$/l				
Total – frais d'exploitation	0,56 \$/l	0,51 \$/l	0,28 \$/l à 0,41 \$/l	0,46 \$/l à 0,53 \$/l	0,59 \$/l à 0,66 \$/l
Total – Incluant amortissements	0,67 \$/l à 0,71 \$/l	0,62 \$/l à 0,66 \$/l	0,39 \$/l à 0,56 \$/l	0,57 \$/l à 0,68 \$/l	0,60 \$/l à 0,71 \$/l

Les coûts présentés dans le tableau 2.3 sont des estimations basées sur des modèles théoriques étant donné qu'il n'existe pas d'unités de production de bioéthanol cellulosique de taille commerciale. La biomasse forestière ainsi que la paille de maïs et le panic érigé semblent être les sources de biomasse les plus abordables. D'après Tao et Aden (2009), le coût de production d'éthanol cellulosique à partir de paille de maïs serait de 0,39 \$/l, ce qui est légèrement inférieur à nos estimations, majoritairement en raison d'un prix moins élevé de la matière première aux États-Unis.

2.3 Compétitivité et rentabilité

Pour être rentable, la filière de la production de bioéthanol par hydrolyse enzymatique doit se comparer avec la filière de l'éthanol produite par fermentation. Au chapitre 1, les coûts de production d'éthanol à partir du maïs-grain sont estimés à 0,52 \$/l. Basé sur nos estimations, une éventuelle filière d'éthanol cellulosique pourrait être concurrentielle. Tao et Aden (2009) ont comparé les coûts des deux modes de production d'éthanol et ont conclu que la production d'éthanol cellulosique par hydrolyse enzymatique (0,39 \$/l) à partir de paille de maïs était légèrement moins chère que la production d'éthanol à partir de maïs-grain (0,40 \$/l). Dans le contexte québécois, M. Estéban Chornet, co-titulaire de *la Chaire de recherche industrielle sur l'éthanol cellulosique* de l'Université de Sherbrooke, considère que le bioéthanol qui sortira des premières usines québécoises de seconde génération devra revenir, pour être concurrentiel, à peu près au même coût que le bioéthanol fait à partir de maïs-grain, soit un coût d'environ 0,40 \$/l, ce qui est plus faible que nos estimations. Cependant, selon lui, une fois le procédé mieux maîtrisé et les conditions d'hydrolyse et de fermentation optimisées, les coûts de production pourraient être de 40 à 50 % inférieurs à ceux des technologies de première génération.

En comparant les sources de biomasse, il semble que la biomasse forestière reste la source de biomasse cellulosique la moins chère, du moins lorsque disponible dans un rayon d'approvisionnement variant entre 50 et 100 km. Les intrants agricoles pourraient difficilement concurrencer le très bas coût de la biomasse forestière.

2.4 Risques et enjeux

L'enjeu le plus important lié à la production d'éthanol cellulosique au Québec est probablement la disponibilité de la matière première. La quantité de paille disponible au Québec est assez limitée. Presque toute la paille produite au Québec devrait être utilisée pour approvisionner une usine nécessitant 700 000 tonnes de biomasse par année. En raison de l'existence d'autres marchés pour la paille et d'une distance limite maximale d'approvisionnement de 100 km, seule une faible quantité de cette paille serait disponible.

Les agriculteurs québécois possèdent très peu d'expérience dans la récolte à grande échelle de paille de maïs. Seule une certaine proportion de la paille de maïs pourrait potentiellement être récoltée sous certaines conditions. En effet, une certaine proportion de la paille doit être laissée sur place de façon à maintenir voire améliorer la qualité du sol. Bien que les quantités disponibles au Québec soient difficilement estimables, il semble que la paille de maïs pourrait éventuellement représenter une source intéressante de biomasse cellulosique.

Selon le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, 6,4 millions de tonnes métriques anhydres de biomasse forestière⁴ sont disponibles sur une base annuelle pour les filières industrielles (MRNF, 2008). Ces quantités seraient amplement suffisantes pour approvisionner une usine produisant de l'éthanol cellulosique. Cependant, pour que les résidus forestiers demeurent

⁴ La biomasse forestière est définie comme des arbres ou parties d'arbres comptabilisés dans la possibilité forestière qui ne font pas l'objet d'une attribution ou d'une réservation 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.

rentables, le rayon d'approvisionnement devra être restreint (entre 80 et 120 km selon les sources). Une meilleure chaîne d'approvisionnement (récolte, stockage, transport) pourrait réduire les coûts et ainsi permettre un plus large rayon d'approvisionnement.

Dans le cas du panic érigé et du saule à croissance rapide, nous émettons l'hypothèse que pour des raisons d'acceptabilité sociale, les sols agricoles déjà utilisés à des fins alimentaires ne seraient pas détournés à d'autres fins. Pour respecter ce critère, l'utilisation des terres marginales constitue une réponse logique. Cependant, les terres marginales ont des rendements à l'hectare habituellement plus faibles que les terres présentement en culture, ce qui ferait augmenter les coûts de la biomasse. Également, compte tenu de la quantité de terres marginales disponible au Québec qui est d'environ 130 000 hectares (Écoressources Consultants et Agronovita Inc, 2010) et d'un rendement à l'hectare moyen optimiste de 7 t/ha, environ 77 % de toutes les terres marginales du Québec devraient être utilisées pour approvisionner une usine de bioéthanol cellulosique. En tenant compte du fractionnement des terres, de la distance entre les terres marginales et des caractéristiques agronomiques de celles-ci, cette situation est clairement irréaliste. Cette conclusion s'applique également au saule à croissance rapide.

Ajoutons également que la collecte de résidus de culture (paille de maïs) et la production de cultures dédiées, telles que le panic érigé, ne sont pas encore facilement adaptées aux pratiques agricoles actuelles. La plupart de ces pratiques sont présentement au stade d'adaptation et nécessitent plusieurs années d'implantation avant d'être efficaces, ce qui représente une charge importante pour le producteur. Il sera difficile de convaincre les producteurs agricoles de se lancer dans une telle entreprise en l'absence de débouchés sûrs et rentables, d'autant plus que ces productions sont couvertes uniquement par le programme canadien Agri-flexibilité.

2.5 Impacts positifs et négatifs

L'utilisation de terres agricoles pour la production du saule à croissance rapide ou du panic érigé comporte d'importants effets environnementaux bénéfiques tels qu'une diminution de l'érosion, une amélioration de la qualité des sols, la séquestration de carbone et la création d'habitats. Cependant, tel qu'il a été mentionné précédemment, l'utilisation de terres déjà en culture représente un enjeu social important en raison du détournement de terres vouées à des fins alimentaires vers des fins énergétiques. Les terres marginales ont habituellement déjà un couvert forestier important, ce qui réduit les bénéfices environnementaux de leur utilisation pour la culture des plantes énergétiques pérennes.

Il a également été démontré que la récolte des résidus forestiers a des impacts négatifs sur l'environnement, entre autres par rapport à la réduction des habitats et de la présence de nutriments dans les sols apportés par la décomposition de la biomasse laissée sur place. Similairement, la récolte de la paille de maïs affecte la qualité des sols.

Du point de vue économique, la valorisation de terres par de nouvelles cultures dédiées (ex. panic érigé ou saule à croissance rapide) ou la valorisation de résidus (résidus forestiers, paille de maïs) pourrait générer des retombées économiques positives en termes d'emplois et d'utilisation du territoire.

2.6 Faits saillants

- Le procédé d'hydrolyse enzymatique n'est présentement pas développé à l'échelle commerciale, notamment en raison du coût élevé des enzymes, mais pourrait être concurrentiel par rapport aux procédés de fermentation dans un proche avenir;
- Au Québec, la biomasse forestière représente la source de biomasse cellulosique la moins chère et la plus disponible. La paille de maïs pourrait également avoir un potentiel intéressant;
- Le potentiel d'approvisionnement d'une usine d'éthanol cellulosique avec du panic érigé ou du saule à croissance rapide est très limité compte tenu de l'espace occupé par les terres marginales, de leur fractionnement, des distances entre elles et de leur faible potentiel agronomique.

3. Gazéification – Carburants renouvelables

Cette section étudie la filière industrielle de gazéification de la biomasse solide (chauffage en présence d'une quantité nulle ou limitée d'oxygène). Le produit intermédiaire ainsi obtenu (gaz de synthèse ou « syngaz ») est un mélange gazeux qui contient une quantité variable d'azote, d'hydrogène, de monoxyde de carbone, de dioxyde de carbone ainsi que d'autres gaz. Il peut être filtré, purifié et brûlé pour la production d'énergie ou donner lieu à une conversion en différentes substances chimiques.

3.1 Marchés potentiels

À l'aide de technologies modernes, différentes sources de biomasse peuvent être valorisées en les convertissant en un gaz homogène, qui est utilisé pour la synthèse d'alcools et/ou d'hydrocarbures. Les produits finaux potentiels incluent le mélange d'alcool (éthanol, méthanol et autres), l'hydrogène, l'éther méthylique et l'électricité (par combustion du gaz synthétique intermédiaire produit). Ainsi, chacun des bioproduits issus de ce procédé représente différents marchés potentiels pour cette filière.

Dans le cas du mélange d'alcool, la composition généralement ciblée est de 75-80 % d'éthanol, 15 % de propanol, 5 % de butanol, 3 % de pentanol, 2 % d'hexanol et 0 % de méthanol. Toutefois, ces proportions peuvent varier selon les marchés visés, notamment pour celui du méthanol. Ce mélange d'alcool est principalement destiné à être ajouté à l'essence dans une proportion de 10 %, ou au diesel dans une proportion de 20 % à 30 %, voire plus (AltEnergyMag, 2006). Il peut être utilisé également comme combustible dans les véhicules flex fuel⁵ ou super-éthanol E85. Le fait qu'il est plus rentable de vendre les composés séparément plutôt qu'en tant que mélange représente un frein au développement de ce produit (Lane, 2008). Aussi, le réseau d'infrastructure de distribution pour ce type de combustible rend sa commercialisation difficile.

Lorsque considérés séparément, il existe d'importants marchés pour l'alcool produit à partir du processus de gazéification. Tel que décrit précédemment, l'éthanol peut être ajouté à l'essence. Le méthanol est employé dans une grande variété de produits, par exemple comme combustible; pour dénaturer l'alcool éthylique; comme antigel ainsi que dans l'industrie des vernis, des colorants et de certaines matières plastiques. Le méthanol est également utilisé dans le procédé de première génération dit de transestérification, pour la production de biodiesel. La demande pour le méthanol est en forte décroissance depuis 2008. Cependant, de nouvelles perspectives de commercialisation de ce produit apparaissent en raison du développement de nouveaux mélanges de méthanol et d'essence, de la production d'oléfines et d'éther méthylique par déshydratation. Chemical Market Associates inc. prévoit une augmentation de la demande mondiale de plus de 10 % par année à partir de 2010 pour se stabiliser ensuite aux alentours de 10 % de croissance interannuelle les années suivantes. Au Canada, le méthanol n'étant plus considéré comme un carburant alternatif par le gouvernement, les producteurs ont tendance à se concentrer sur l'industrie chimique comme débouché, d'autant plus que les prix payés y sont plus élevés.

⁵ Il s'agit de véhicules capables de fonctionner aussi bien à l'E85 (super-éthanol) ou à l'essence ordinaire.

L'hydrogène est essentiellement utilisé comme gaz industriel pour la production d'ammoniaque, dans le raffinage de produits pétroliers et pour la production de méthanol. Pour alimenter les sites industriels, des unités de production d'hydrogène sont souvent construites à proximité de ces sites. L'hydrogène sert de vecteur énergétique du fait qu'une autre source d'énergie est nécessaire à sa production. Une fois purifié, sa combustion peut alimenter les transports et servir à la production d'électricité. Dans le secteur des transports, la combustion de l'hydrogène présente l'avantage de ne générer qu'un seul sous-produit : l'eau (IFP, 2004). Plusieurs fabricants de voitures proposent des véhicules utilisant de l'hydrogène comme combustible, mais les moteurs à hydrogène restent beaucoup plus chers que ceux utilisant les combustibles traditionnels. Le manque d'infrastructures de production, de réseaux de distribution et les difficultés de stockage de l'hydrogène à bord du véhicule représentent d'autres enjeux importants. Par ailleurs, l'hydrogène est un gaz très léger, ce qui constitue un handicap pour son stockage et son transport, habituellement par pipeline.

L'éther méthylique (DME) est, depuis les années soixante, principalement utilisé comme propulseur dans les aérosols en substitution des chlorofluorocarbures (CFC). Il présente un potentiel remarquable sur quatre grands marchés : comme combustible dans les usages industriels et domestiques (mélange DME/gaz de pétrole liquéfié), comme carburant pour les véhicules diesel, comme charge pétrochimique (pour casser les hydrocarbures saturés en molécules plus petites, et souvent insaturées) et comme intrant dans la production d'électricité. Pour ces utilisations respectives, le DME sert de substitut au propane et au butane, au gaz de pétrole liquéfié, au naphta et au gaz naturel.

3.2 Coûts

En raison du caractère émergent de la filière de gazéification, les compagnies concernées hésitent à dévoiler leurs coûts. Pour cette raison, nous nous basons sur des modèles théoriques présentés dans la littérature scientifique. Il est ainsi possible de comparer les technologies entre elles, bien qu'il existe beaucoup d'incertitude par rapport aux frais d'exploitation précis. Pour cette analyse, nous utilisons les données de Wright et Brown (2007) pour la production de méthanol, d'hydrogène et de mélange de gaz produit par gazéification et celles de Tao et Aden (2009) pour une usine de production d'éthanol.

Coûts fixes en capital

D'après Wright et Brown (2007), les coûts en capital pour une usine ayant une capacité annuelle de production de méthanol par gazéification d'environ 568 millions de litres seraient de 667 millions de dollars⁶. Similairement, une usine de même taille produisant de l'hydrogène aurait un coût de 597 millions de dollars et une usine produisant un mélange d'alcool⁷, un coût de 939 millions de dollars. Une usine produisant de l'éthanol par la gazéification de copeaux de bois avec une capacité de production de 170 millions de litres par année aurait pour sa part un coût d'investissement en capital de 219 millions de dollars (Tao et Aden, 2009).

⁶ Valeur ramenée en dollars de 2010.

⁷ Il s'agit dans ce cas de la production de carburants synthétiques par le procédé Fischer-Tropsch.

Coûts de la matière première

Les coûts en matière première sont normalement le poste de dépense le plus important en termes de coûts variables. Cependant, dépendamment du type de biomasse utilisée, les coûts peuvent être plus ou moins élevés. Wright et Brown considèrent un coût de la biomasse ligneuse de 55 \$ par tonne, ce qui donne un coût de biomasse par équivalent de litre d'essence de 0,23 \$ pour le méthane, de 0,21 \$ pour l'hydrogène et de 0,26 \$ pour le mélange d'alcool. Cette différence est attribuable à une plus grande efficacité de certains procédés. Selon Tao et Aden (2009), les coûts des copeaux de bois reviennent à 0,10 \$ par litre d'éthanol produit, ce qui inclut les revenus tirés de la vente des coproduits (0,15 \$ sans prendre en compte la vente des coproduits), soit les alcools complexes.

Un projet de gazéification des matières résiduelles est présentement en développement en Alberta. Les matières résiduelles n'ont pas de valeur à proprement parler et peuvent même avoir un coût négatif lorsqu'une compensation est versée pour leur élimination. Cependant, il est nécessaire d'uniformiser les résidus et de les sécher avant de les gazéifier. Ces opérations représentent des coûts difficilement estimables.

Dans le cas des matières agricoles, le coût d'achat sera assez élevé. D'après Chornet (2008), le prix cible pour des intrants pouvant servir à la gazéification, tels que la biomasse forestière ou agricole, ainsi que pour le saule à croissance rapide et les autres espèces similaires, serait de 80 \$ par tonne, ce qui est sensiblement plus élevé que les prix de la biomasse estimés par Wright et Brown. Notre propre estimation, présentée pour le saule à croissance rapide au chapitre 2, était un prix de vente variant entre 70 \$ et 100 \$ par tonne. Le processus de gazéification requiert une biomasse uniforme, ce qui pourrait occasionner des coûts supplémentaires aux producteurs agricoles.

Autres coûts

D'après Wright et Brown (2007), les frais d'exploitation et de gestion par litre d'équivalent d'essence sont d'approximativement 0,05 \$ pour la production de méthanol, de 0,04 \$ pour la production d'hydrogène et de 0,09 \$ pour la production d'un mélange d'alcool. Dans le cas de la production d'éthanol, Tao et Aden estiment ces coûts à 0,07 \$/l.

Les frais de transport, qui pourraient s'avérer être élevés, sont inconnus dans le cas de la plupart des sous-filières. Le méthanol, qui est transporté par bateau, train ou camion, est inflammable, ce qui nécessite des précautions supplémentaires. Le transport par pipeline est la principale voie dans le cas de l'hydrogène. Cependant, celui-ci ne couvre qu'un peu plus de 2 500 km linéaire à travers le monde. Dans le cas de la production d'éthanol, les coûts de transport seraient comparables à ceux présentés aux chapitres 1 et 2, soit de 0,004 \$ par litre.

Sommaire des coûts

Le tableau 3.1 présente une synthèse des coûts, basée sur les estimations présentées dans les sections précédentes.

TABLEAU 3.1 SOMMAIRE DES COÛTS – GAZÉIFICATION

Élément de coût	Éthanol ¹	Méthanol ²	Hydrogène ²	Mélange d'alcool ²
Investissements	219 millions de \$ pour 170 millions de litres. (1,29 \$ par l de capacité)	667 millions de \$ pour 568 millions de litres. (1,17 \$ par l de capacité)	597 millions de \$ pour 568 millions de litres. (1,05 \$ par l de capacité)	939 millions de \$ pour 568 millions de litres. (1,65 \$ par l de capacité)
Frais d'exploitation				
Matière première	0,10 \$/l	0,23 \$/l	0,21 \$/l	0,26 \$/l
Autres coûts variables	0,07 \$/l	0,05 \$/l	0,04 \$/l	0,09 \$/l
Total – Frais d'exploitation	0,17 \$/l	0,28 \$/l	0,25 \$/l	0,35 \$/l
Total – Incluant amortissements	0,30 \$/l	0,40 \$/l	0,36 \$/l	0,52 \$/l

¹ Coûts par litre d'éthanol

² Coûts par litre d'équivalent d'essence

Les coûts totaux que nous avons calculés varient quelque peu des résultats finaux présentés par Wright et Brown (2007) et Tao et Aden (2009) parce que nous n'avons pas pris en compte des éléments de coûts propres au contexte américain, tels que les subventions et les taxes. Il est également important de noter que ces coûts n'incluent pas le transport du produit fini et que, dépendamment de la matière première utilisée, les coûts totaux pourraient varier significativement.

3.3 Compétitivité et rentabilité

La compétitivité de la filière peut se mesurer sous deux angles, soit la compétitivité de la filière de gazéification et la compétitivité des intrants d'origine agricole.

Puisqu'il n'existe pas d'information sur les coûts du transport du méthane, de l'hydrogène et du mélange de gaz, la rentabilité de ces productions sur différents marchés est difficilement qualifiable. Cependant, Wright et Black (2007) ont comparé ces procédés avec les technologies de production d'éthanol de première et de deuxième génération. Ils en viennent à la conclusion que les coûts en capital sont très élevés, ce qui pourrait freiner le développement de la filière. L'hydrogène est considéré comme la plus rentable des sous-filières, en raison de plus faibles coûts d'investissement que les autres sous-filières, bien que les limites au niveau des marchés, telles que les difficultés de commercialisation et de distribution, contribuent également à limiter son déploiement.

Tao et Aden (2009) ont pour leur part comparé la rentabilité de la production d'éthanol par gazéification avec la production d'éthanol par fermentation et par hydrolyse enzymatique. Ils concluent que les coûts d'investissement sont plus élevés pour le procédé de gazéification, mais

que les coûts de production par litre sont moins élevés. Cela est dû au coût des copeaux de bois plus faible que celui du maïs-grain et de la canne de maïs, lorsque la valeur des sous-produits est incluse. Ces résultats sont ainsi dépendants du type de matière première prise en compte.

Le procédé de gazéification pourrait ainsi être rentable dans le cas où des intrants sont disponibles, et utilisables à faible coût ou à coût négatif. L'information disponible laisse présager que l'utilisation de biomasse d'origine agricole sera plus chère que la biomasse ligneuse provenant de résidus forestiers. De plus, présentement, le développement des procédés de gazéification au Canada se fait principalement avec les résidus municipaux comme intrants. Ceux-ci sont disponibles à très bas prix, malgré certains coûts pour le séchage et la transformation. À moins que la biomasse d'origine agricole ne requière aucune transformation avant le processus de gazéification, ce qui est peu réaliste en raison de la nécessité d'intrants homogènes, il serait difficile de concurrencer les matières résiduelles comme intrants. De plus, la rentabilité même de la gazéification de matières résiduelles municipales n'est pas certaine. En effet, selon les intervenants contactés, le prix du baril de pétrole devrait se maintenir dans une fourchette de 175 \$ à 200 \$ le baril avant qu'il ne devienne possiblement rentable (sur une base de marché) de produire des biocarburants à partir de matières résiduelles municipales.

3.4 Risques et enjeux

Dans le cas de l'utilisation de biomasse agricole comme intrant dans le procédé de gazéification, l'approvisionnement pourrait poser problème. En effet, la rentabilité de la filière présuppose des usines avec une capacité de production très importante. L'approvisionnement d'une usine de plusieurs millions de litres d'éthanol strictement en biomasse agricole requerrait l'utilisation d'une grande quantité de terres agricoles, ce qui pourrait causer des enjeux sociaux. Il semble ainsi plus réaliste de compléter l'approvisionnement en résidus municipaux avec de la biomasse agricole, si cela s'avère rentable et techniquement possible.

Également, la qualité du syngaz reste problématique et pourrait nuire au développement de la filière (Foust *et al.*, 2009). De plus, certains débouchés sont encore incertains.

3.5 Impacts positifs et négatifs

Cette filière constitue un premier pas vers le développement d'une industrie basée sur l'utilisation (et par conséquent le recyclage) des déchets municipaux, industriels et agricoles, résolvant ainsi des problématiques du monde occidental d'élimination des déchets et de diversification des sources d'énergie par l'entremise du développement d'énergies moins polluantes.

Au niveau des procédés, des analyses comparatives dans la littérature signalent que les procédés d'hydrolyse enzymatique et de gazéification impliquent des émissions de CO₂ similaires. Selon les estimations, la plate-forme biochimique (hydrolyse enzymatique) produit environ 2 à 10 fois plus d'émissions d'oxydes de soufre (SO_x) que la plate-forme thermochimique (gazéification), tandis que cette dernière produit environ 2 à 17 fois plus d'émissions d'oxydes d'azote (NO_x) que la plate-forme biochimique. De plus, la plate-forme biochimique utilise 2 à 4 fois plus d'eau que la plate-forme thermochimique (Williams *et al.*, 2009).

3.6 Faits saillants

- Le procédé de gazéification permet de valoriser une grande variété de biomasse solide en différentes sources énergétiques;
- Les coûts en capital d'une usine de gazéification sont considérés très élevés, et ce, pour tous les types de produits finaux;
- Les coûts dépendent fortement du type de biomasse utilisée. La biomasse agricole reste chère lorsque comparée à la biomasse forestière ligneuse ou encore aux matières résiduelles municipales;
- Selon les modèles théoriques, le procédé de gazéification peut s'avérer concurrentiel comparé à la production de biocarburants de première et de deuxième génération.

4. Densification – Biocombustible solide – Granules

La densification de biomasse agricole ou forestière permet de fabriquer des granules, des bûches et des briquettes utilisés comme biocombustible dans des systèmes de chauffage. Ces produits nécessitent une technologie semblable, mais couvrent des marchés différents. Cette section s'attarde principalement aux granules en raison de leur marché en croissance et du potentiel d'utilisation des produits agricoles comme intrants. Les granules peuvent être utilisés pour produire de la chaleur et/ou de l'électricité, souvent en cogénération avec le charbon.

4.1 Marchés potentiels

Les usines de densification existantes au Québec utilisent principalement de la biomasse forestière, bien qu'elles puissent aussi granuler de la biomasse agricole. Cette industrie existe au Québec depuis le début des années 1980, grâce à la présence de l'usine Bio-Shell à Lac-Mégantic, désormais Energex inc., qui demeure la plus grosse usine du Québec dans ce domaine. Quelques autres usines produisent aussi des granules énergétiques, dont Lauzon Bois énergétique recyclé inc., Granules L.G. inc., et Granules Boréal inc.

Il existe deux marchés principaux pour les granules énergétiques, soit le marché domestique et le marché de l'exportation. Le marché domestique est présentement limité en raison du faible coût de l'énergie au Québec. Les granules sont habituellement utilisés comme source de chauffage d'appoint. Au Québec, les granules doivent présentement être vendus au consommateur final à un prix inférieur à environ 280 \$/tonne pour être une source de chauffage moins chère que l'électricité (ÉcoRessources Consultants, 2010). Dans le cas d'une hausse du prix des sources traditionnelles d'énergie, les granules énergétiques deviendraient plus compétitifs et il faudrait s'attendre à une croissance du marché intérieur.

La non application du cadre réglementaire canadien sur les changements climatiques pour répondre aux exigences du Protocole de Kyoto (réduction d'émissions de CO₂ et de NO_x) a peu contribué au développement du marché canadien. De plus, de récentes difficultés en approvisionnement limitent le développement de la filière.

Les granules vendus sur le marché de l'exportation sont en majeure partie destinés à la production de l'électricité ou de chauffage à grande échelle. En 2008, près de 90 % des granules produits au Canada étaient exportés, majoritairement vers les Pays-Bas, la Belgique et les États-Unis (Spelter et Toth, 2009).

Le marché du nord-est des États-Unis (principalement Nouvelle Angleterre et l'état de New York) est en croissance compte tenu du prix élevé des combustibles fossiles et de l'utilisation de biomasse pour la génération d'électricité. Aux États-Unis, les programmes environnementaux, tels que le *Regional Greenhouse Gas Initiative* (RGGI) et les *Renewable Portfolio Standards* (RPS), encouragent l'utilisation des énergies renouvelables, dont la biomasse, pour la production d'électricité. Cependant, compte tenu du développement des producteurs de granules aux États-Unis et de la récente mise en place du *Biomass Crop Assistance Program* (BCAP), les entreprises québécoises sont difficilement concurrentielles sur ce marché comme en atteste la fermeture temporaire du manufacturier Energex.

En regard de la qualité que requièrent certains marchés, les granules à base de biomasse agricole ne sont pas de parfaits substituts aux granules à base de matières forestières en raison de leur haute teneur en potassium, en chlore et en cendres. Les granules à base de biomasse agricole causent de la corrosion lors de la combustion ainsi que des dépôts pouvant nuire au bon fonctionnement du poêle. Depuis les dernières années, le développement de variétés de panic érigé à plus faible teneur en potassium et en chlore a partiellement éliminé le problème. Cependant, les poêles à combustion étagée restent idéaux pour ce type de granules. Les granules à base de biomasse agricole sont plus appropriés pour l'usage industriel que pour l'usage résidentiel. Le marché industriel, bien développé en Europe, reste à l'état embryonnaire au Québec et au Canada. Les entreprises de granulation les plus importantes au Québec n'utilisent présentement que très peu de biomasse agricole et préfèrent les résidus forestiers et de scieries comme principaux intrants.

4.2 Coûts

Les coûts évalués dans cette section sont pour une usine produisant 100 000 tonnes de granules annuellement. L'approvisionnement en biomasse peut être réalisé à partir de différentes sources (panic érigé, saule à croissance rapide, alpiste roseau *Miscanthus giganteus*, paille de céréales, maïs-grains, résidus de maïs, résidus forestiers). Pour cette analyse de coûts, nous utilisons le panic érigé comme matière première en raison de la disponibilité des données pour cette culture et de ses coûts plus faibles que d'autres types de biomasse agricole (REAP Canada et OMAFRA, 2008).

Coûts fixes en capital

D'après Lease et *al.* (2008), la production de 100 000 tonnes de granules par an requiert des coûts d'investissement de 150 \$ par tonne de granules dans le cas d'une usine utilisant la biomasse forestière et de 130 \$ par tonne pour une usine utilisant de la biomasse agricole. Bien qu'une usine de granulation puisse être rentable avec une production annuelle inférieure, une capacité de production de 100 000 tonnes par année est idéale, car elle permet de bénéficier d'économies d'échelle (ÉcoRessources Consultants, 2010). Les investissements totaux seraient donc de 13 millions de \$ pour une usine de granulation de panic érigé, avec un coût d'amortissement sur dix ans de 13 \$/t.

Matière première

À la section 2 du présent document, le coût de production du panic érigé a été établi à 63,41 \$ par tonne en moyenne. Le prix de vente aux usines de granulation semble légèrement plus élevé. Présentement, quelques usines au Québec utilisent le panic en mélange avec la biomasse forestière. C'est, entre autres, le cas de Granules LG. Actuellement, le prix offert sur le marché pour des fourrages de panic érigé à 89 % de M.S. est de 90 \$/t. Pour cette analyse, nous avons utilisé un prix panic érigé variant entre 63 \$/t et 80 \$/t.

REAP et OMAFRA ont estimé en 2007 que le coût de transport et de manutention de balles de panic érigé en Ontario variait de 7,10 à 8,01 \$/t pour un voyage de 70 km de la ferme à l'usine (REAP Canada et OMAFRA, 2008). Nous utilisons donc un coût de transport approximatif de 8 \$/t. Celui-ci pourrait être plus élevé si l'usine est éloignée de la matière première.

Autres coûts

Les usines de granulation de biomasse agricole devraient produire 45 000 tonnes par année pour atteindre un coût de granulation de 50 \$/t (REAP Canada et OMAFRA, 2008), incluant les coûts de main-d'œuvre et d'énergie. Ces coûts seraient vraisemblablement moins élevés pour une usine ayant une capacité de 100 000 tonnes par année.

Les coûts de transport du produit fini jusqu'au consommateur final sont également décisifs dans la rentabilité de la production de granules. Un transport de granules en vrac sur une distance de 200 km augmente les coûts de l'ordre de 18 %, représentant un coût unitaire de 26 \$/t (Lease *et al.*, 2008), et ce, peu importe le type d'intrant utilisé lors de la fabrication. Dans le cas où les granules seraient exportés en Europe, le coût estimé pour le transport par bateau serait d'environ 60 \$/t (Junginger et Sikkema, 2009).

Sommaire des coûts

Le tableau 4.1 présente une synthèse des coûts basée sur les estimations présentées dans les sections précédentes.

TABLEAU 4.1 SOMMAIRE DES COÛTS – GRANULATION – PANIC ÉRIGÉ

Élément de coût	Coût
Investissements	13 millions de \$ pour une capacité de 100 000 t/année (130 \$/tonne de capacité de granulation)
Frais d'exploitation	
Matière première (panic érigé)	63 \$/t à 80 \$/t
Transport de la matière première	8 \$/t
Granulation	50 \$/t
Transport des granules	26 \$/t
Total – Frais d'exploitation	147 \$/t à 164 \$/t
Total – Incluant amortissements	160 \$/t à 177 \$/t

D'après les données obtenues, le coût de production des granules de panic érigé, excluant les amortissements, serait entre 147 \$/t et 164 \$/t. Pour l'Ontario, la somme des coûts de granulation et de matière première a été estimée à 125 \$/t (REAP Canada et OMAFRA, 2008). Notre estimation de ces coûts présentée au tableau 4.1 (coûts variables moins transport des granules) varie entre 121 \$/t et 138 \$/t.

4.3 Compétitivité et rentabilité

Dans cette section, nous comparons les coûts de production de granules à base de panic érigé avec les granules de biomasse forestière, qui est la principale filière concurrentielle.

D'après Lease et *al.* (2008), les coûts d'investissements pour une usine de granulation utilisant la biomasse forestière sont de 150 \$ par tonne, soit 30 \$ par tonne de plus que pour une usine utilisant la biomasse agricole. Les coûts de la matière première sont considérablement moins élevés pour la biomasse forestière (résidus de scierie et de parterres de coupe) que pour le panic érigé. Tel qu'il a été décrit au chapitre 2, ceux-ci varient entre 20 \$ et 56 \$ par tonne pour les résidus de coupe forestière. Cependant, dépendamment des coûts de transport ainsi que du contexte de l'industrie forestière, notamment en termes de résidus accessibles, les coûts de la biomasse forestière peuvent varier. D'après notre analyse, la biomasse agricole pourrait être compétitive par rapport à la biomasse forestière pour la fabrication de granule si cette dernière atteignait un coût moyen supérieur à 56 \$/t, incluant le transport.

Les coûts de granulation sont généralement plus faibles pour la densification de biomasse herbacée que pour la production de granules à base de résidus forestiers compte tenu du débit de production plus important et de plus faibles coûts de séchage. Les coûts de granulation à partir de panic érigé sont estimés à 20 % inférieurs à ceux à partir de résidus forestiers (REAP Canada et OMAFRA, 2008). Les coûts de granulation des résidus forestiers sont donc estimés à 63 \$/t. Le sommaire des coûts de production pour la granulation de biomasse forestière est présenté dans le tableau suivant.

TABLEAU 4.2 SOMMAIRE DES COÛTS – GRANULATION – BIOMASSE FORESTIÈRE

Élément de coût	Coût
Investissements	15 millions de \$ pour une capacité de 100 000 t/année (150 \$/tonne de capacité de granulation)
Frais d'exploitation	
Matière première (biomasse forestière et transport)	20 \$/t à 56 \$/t
Granulation	63 \$/t
Transport des granules	26 \$/t
Total – Frais d'exploitation	109 \$/t à 145 \$/t
Total – Incluant amortissements	124 \$/t à 160 \$/t

Gordon Murray, président de la Wood Pellet Association of Canada, estime le coût de production à l'usine à environ 100 \$/t pour les granules de bois, ce qui est assez semblable au coût que nous obtenons en soustrayant les coûts de transport. Il ne fait pas de doute que les coûts de production des granules à partir de panic érigé sont plus élevés que pour la biomasse forestière, principalement en raison des coûts de production de la matière première.

Malgré cette différence de coûts, les granules de panic érigé pourraient être compétitifs sur le marché domestique s'ils sont vendus à proximité de l'usine. En effet, le prix des granules de bois en sacs se situe entre 160 et 200 \$/t selon leur qualité (Lease *et al.*, 2008). Sous l'hypothèse que les granules de panic érigé sont vendus à un prix comparable aux granules de bois, ils pourraient être rentables si le transport se fait sur une distance de 200 km.

Les prix européens actuels des granules de biomasse agricole démontrent la fluctuation du marché. Les prix à Rotterdam sont généralement compris entre 100 et 150 €/t, soit entre 158 et 235 \$/t et peuvent augmenter jusqu'à 550 \$ la tonne pour le consommateur final (European Pellets Center). Dépendamment du prix de vente, la marge bénéficiaire des exportateurs peut donc être assez faible. Compte tenu de ces prix et du coût estimé du transport par bateau (60 \$/t), les granules québécois, et même canadiens, à base de panic érigé ne seraient pas compétitifs sur le marché européen.

Le développement du marché d'exportation pour les granules de panic érigé nécessiterait donc le soutien de l'industrie. Le Québec n'a pas de politique incitative favorisant directement les cultures dédiées à des usages non alimentaires, bien qu'il ait financé certains projets pilotes dans le cadre de programmes sur les biens et services environnementaux. La fabrication de granules à partir de panic érigé ne bénéficierait donc pas automatiquement de subventions.

4.4 Risques et enjeux

Le principal risque associé au développement de la filière de granulation de la biomasse agricole est lié à la disponibilité de la matière première. En effet, au Québec, la biomasse agricole destinée à des fins de valorisation bioindustrielle est assez peu disponible et cette filière fait face à la concurrence des marchés qui offrent un prix plus élevé pour la matière première (fourrages, litière, isolation des maisons, etc.). De plus, la période d'implantation des cultures énergétiques (2 à 3 ans sont nécessaires avant d'être en mesure de récolter) vient ajouter un risque lié à ce choix de production. Enfin, contrairement à la plupart des grandes cultures, celles-ci ne sont pas couvertes par le Programme d'assurance stabilisation des revenus agricoles (ASRA), ce qui peut décourager les producteurs à s'engager dans ce type de culture.

En considérant l'hypothèse que le panic érigé est assez sec pour être granulé sans séchage préalable et que, par conséquent, il n'y a pas de perte de masse, ainsi qu'un rendement aux champs de 10 tonnes par hectare, la quantité d'hectares en culture nécessaire pour approvisionner une usine de 100 000 t de capacité annuelle serait de 10 000 hectares. Par exemple, ceci équivaldrait à utiliser environ la moitié des terres en friche en Montérégie. Comme un rendement de 10 tonnes par hectare serait très difficile à obtenir sur ces terres, cette proportion est vraisemblablement encore plus élevée. Il existe également une grande variabilité des rendements possibles d'une région à l'autre, comme démontré au tableau 2.1.

4.5 Impacts positifs et négatifs

Les bénéfices environnementaux de cultures pérennes, telles que le panic érigé, sont nombreux : usage limité d'herbicides et de pesticides, travail du sol minimal, faible besoin d'engrais, amélioration de la qualité des sols et stabilisation des berges. La production de panic érigé permet également une meilleure séquestration du carbone dans le sol en comparaison avec les cultures annuelles.

Un impact positif de la culture du panic érigé serait l'éventuelle valorisation des terres marginales et en friche actuellement sous exploitées. Cependant, celles-ci sont habituellement de faible qualité, dispersées et de faible superficie. Les rendements et les coûts associés à la production de panic érigé sur les terres marginales pourraient donc rendre la filière non compétitive. Les terres offrant les meilleurs rendements de biomasse pourraient être les moins disponibles pour ce type de cultures et le coût d'opportunité risque d'être élevé. Cette situation pourrait freiner le développement de la filière.

La consommation de granules présente également des impacts environnementaux intéressants. La combustion donne lieu à des réductions de particules atmosphériques (réduction de l'effet de smog), en comparaison avec les anciens appareils de chauffage au bois (ÉcoRessources Consultants et Agronovita inc., 2010).

4.6 Faits saillants

- La production de granules à partir de panic érigé est plus coûteuse que pour les granules à partir de bois;
- La biomasse agricole pourrait être compétitive par rapport à la biomasse forestière pour la fabrication de granule si cette dernière atteignait un coût moyen supérieur à 56 \$/t, incluant le transport ;
- Compte tenu du prix de marché actuel, la production de granules de panic érigé pourrait être rentable sur le marché domestique si les frais de transport de la matière première et des granules sont faibles et si les technologies de production sont efficaces. Toutefois, le marché domestique des granules est très peu développé;
- À première vue, les granules de panic érigé ne pourraient pas être compétitifs sur le marché européen en raison des coûts de transport très élevés;
- La culture de panic érigé présente des avantages pour l'environnement et permettrait de valoriser les terres marginales;
- Pour alimenter une usine de granulation de taille optimale, entre 10 000 et 20 000 hectares de terres marginales seraient nécessaires, ce qui n'est pas réaliste compte tenu de la qualité et du fractionnement des terres;
- La production de panic érigé sur des terres de bonne qualité aurait un coût d'opportunité élevé et pourrait s'avérer non acceptable socialement.

5. Biogaz et méthanisation

La biométhanisation est un processus de production d'énergie à partir de résidus riches en matière organique, tels que les effluents d'élevage, les déchets organiques (domestiques ou résidus d'usines agroalimentaires et d'abattoirs) et des résidus de cultures. Le processus de biométhanisation consiste en une fermentation microbienne en l'absence d'oxygène de ces résidus riches en matière organique.

5.1 Marchés potentiels

Le biogaz, qui est le produit recherché du processus de biométhanisation, peut être valorisé sur trois marchés : le marché du gaz naturel, nécessitant le raffinage du biogaz pour obtenir un produit similaire au gaz naturel, le marché thermique, où il alimente des bouilloires, et le marché de l'électricité, où le biogaz est utilisé comme combustible.

Le biogaz doit atteindre un niveau de pureté similaire au gaz naturel pour être valorisé sur ce premier marché. Étant donné le coût de purification très élevé (Brodeur *et al.*, 2008) et le manque d'infrastructure de distribution en milieu rural⁸, l'option de vendre le biogaz produit à la ferme sur le marché du gaz naturel est considérée non rentable. De plus, le système de distribution du gaz naturel étant présentement réglementé et sous le contrôle de différentes compagnies selon les régions, il est très difficile d'obtenir l'accès au réseau, même si celui-ci est situé à proximité de la ferme. Par conséquent, même si le prix du gaz naturel au Québec augmentait assez pour couvrir les coûts de transformation, l'infrastructure de distribution poserait encore problème. L'option de production de biogaz distribué sur le marché du gaz naturel est donc difficilement envisageable dans le contexte québécois.

Un deuxième mode de valorisation du biogaz est son utilisation directe comme combustible pour le chauffage. Le traitement que le biogaz doit subir pour le marché thermique se limite à sa désulfuration et cela dans le but de diminuer les risques de corrosion des canalisations (Brodeur *et al.*, 2008). S'ajoute le coût, relativement faible, des bouilloires adaptées à la combustion du biogaz. Le principal problème de ce mode de valorisation est la variation annuelle des besoins en chaleur qui affecte la rentabilité de l'investissement. Comme les biogaz ne peuvent être stockés, ils doivent être utilisés lors de leur production. En hiver, la totalité du biogaz obtenu au niveau d'une ferme peut être utilisée pour les besoins en chauffage des bâtiments. Par contre, il est fort possible de générer des surplus importants en été qui doivent être brûlés s'ils ne peuvent pas être utilisés pour d'autres fins thermiques à proximité de la ferme (Brodeur *et al.*, 2008). L'utilisation du biogaz strictement pour la production de chaleur pourrait donc être envisagée uniquement pour les fermes qui peuvent utiliser l'ensemble du biogaz tout au long de l'année.

⁸ Communication avec Éric Camirand, président de la compagnie Électrigaz (www.electrigaz.com).

La ferme porcine Péloquin (5 000 porcs/an) a installé depuis une dizaine d'année des bioréacteurs et une bouilloire de capacité de 300 000 BTU/h qui fonctionnent très bien. La ferme valorise la chaleur et les effluents traités (fertilisants) produits et espère que ces fertilisants améliorés prendront de la valeur à l'avenir compte tenu de leur valeur fertilisante et de la réduction des agents pathogènes du lisier traité.

Un troisième marché, la valorisation du biogaz pour la production d'électricité, est de loin le plus étudié au niveau économique. Selon Laganière (2007), 2 100 fermes québécoises pourraient avoir un potentiel total de génération d'électricité de 500 mégawatts (MW). Au Québec, les secteurs les plus prometteurs pour cette filière semblent être les secteurs bovin et porcin. Une installation de biométhanisation avec un potentiel thermique supérieur à 100 kilowatts thermiques (kW_{th}) pourrait éventuellement être implantée sur 361 fermes bovines et 356 fermes porcines (Laganière, 2007). La puissance totale qui pourrait être produite par l'ensemble de ces installations s'élèverait à 124,2 MW, soit l'équivalent d'environ 60 éoliennes. La production d'électricité à la ferme doit cependant être utilisée à la ferme et ne peut actuellement être vendue sur le réseau d'Hydro-Québec.

Finalement, la combinaison d'énergie d'origine électrique et thermique pourrait également être envisageable, bien que les prix actuels de l'électricité payés au Québec suggèrent qu'un tel schéma pourrait difficilement être rentable. En effet, la ferme Saint-Hilaire de la région Chaudière-Appalaches (10 000 porcs/an) produisait à titre expérimental de l'électricité avec un équipement de cogénération de 30 kW dans les premières années de mise en service de son installation.

5.2 Coûts

Dernièrement, Beauregard et al., (2010) ont réalisé une étude testant la rentabilité d'une vingtaine de scénarios de production de biogaz pour remplacer le gaz naturel utilisé pour le chauffage sur la ferme Jean-Marc Henri inc. dans Lanaudière. Ces scénarios incluaient la méthanisation centralisée des résidus de ferme (fumiers, lisiers et résidus de meunerie) et de certains résidus externes (résidus maraîchers, carcasses de porcs), séparation avec ou sans compostage du digestat, conversion des élevages avicoles vers la litière de paille au lieu de bois. Aucun scénario de remplacement du gaz naturel par le biogaz n'a révélé une valeur actualisée nette positive, ou un retour sur l'investissement de moins de 15 ans.

Compte tenu des conclusions de l'étape précédente, seule l'utilisation du biogaz pour la production d'électricité a été retenue pour l'analyse. Nous avons développé trois scénarios pour évaluer les coûts, soit le cas 1, une ferme laitière valorisant le fumier de 100 vaches en lactation avec une génératrice de 11 kW⁹, le cas 2, une production de biogaz à partir d'ensilage de maïs avec une génératrice d'une capacité de 100 kW. (l'ensilage de maïs a l'avantage de pouvoir produire environ sept fois plus d'électricité par tonne que le lisier de porc), ainsi que le cas 3, une porcherie de 1 500 porcs en engraissement avec une génératrice de 15 kW.

⁹ Capacité nécessaire pour valoriser 1750 T de fumier par année en fonction d'une production d'électricité de 50 kWh/T (Camirand, 2007a).

Coûts fixes en capital

Le coût du capital peut varier selon le type de système installé, la taille du système, la source d'intrants et la présence ou non d'une unité de cogénération. Selon Camirand (2008), le coût d'investissement varie de 3 500 à 6 000 \$/kW pour une usine d'une capacité de plus de 50 kW en Colombie-Britannique. L'étude ontarienne de Mallon et Weersink (2007) estime les coûts d'investissement entre 3 477 et 6 940 \$/kW, pour des capacités de production allant de moins de 100 kW à plus de 300 kW. Dans le cas d'une génératrice d'une capacité de moins de 20 kW, les coûts seraient beaucoup plus élevés, soit de 16 000 \$/kW. Nous avons utilisé l'hypothèse d'un coût d'investissement de 16 000 \$/kW pour l'entreprise laitière et l'entreprise porcine et de 7000 \$/kW pour l'entreprise utilisant l'ensilage de maïs. Ces valeurs ont été choisies en raison de la faible capacité des génératrices. En effet, des coûts par kWh plus faibles sont habituellement associés à des génératrices de plus grande capacité en raison de la présence d'économies d'échelle.

Les amortissements sur une durée de 10 ans par kWh pour le cas 1 s'élèvent à 0,20 \$/kWh, à 0,085 \$/kWh pour le cas 2 et à 0,195 \$/kWh pour le cas 3. La différence est attribuable aux économies d'échelle.

Coût de la matière première

Les principales matières pouvant être utilisées pour la digestion anaérobie sont les sous-produits de l'agriculture, dont le fumier, les résidus de cultures végétales et les matières organiques d'origine municipale. L'utilisation des cultures énergétiques comme intrants pour la production de biogaz fait augmenter les coûts totaux, tandis que l'utilisation des effluents produits sur la ferme et des déchets organiques en provenance de l'extérieur de la ferme les fait baisser, car ils représentent des coûts évités ou même des revenus. Ainsi, nous considérons que le coût du fumier de bovin et du lisier de porc est nul. D'après Beauregard (2008), le coût moyen de production du maïs fourrager en silo tour en 2008 au Québec était de 50,56 \$/t incluant les approvisionnements, opérations culturales, l'entreposage et les autres frais.

Autres coûts

La main-d'œuvre nécessaire est estimée à environ 1 à 2 h/jour (Camirand, 2007b). Ainsi, en utilisant un coût par heure de 15 \$, les coûts de main-d'œuvre sont de 0,057 \$/kWh dans le cas de la production de biogaz à partir de fumier de bovins¹⁰, de 0,012 \$/kWh dans le cas de la production de biogaz à partir d'ensilage de maïs¹¹, et 0,041 pour la production de biogaz à partir de lisier de porc¹². Il a été considéré que le cas 2 nécessitait 2 h/jour de main-d'œuvre à cause de sa production plus élevée d'électricité. Les frais d'entretien sont estimés à 0,015 \$/kWh (Camirand, 2007b).

¹⁰ Le calcul est de $(1 \text{ h} \cdot 15 \text{ \$} \cdot 340 \text{ h par année}) / (11 \text{ kW} \cdot 8200 \text{ heures d'opération annuelle})$

¹¹ Le calcul est de $(2 \text{ h} \cdot 15 \text{ \$} \cdot 340 \text{ h par année}) / (100 \text{ kW} \cdot 8200 \text{ heures d'opération annuelle})$

¹² Le calcul est de $(1 \text{ h} \cdot 15 \text{ \$} \cdot 340 \text{ h par année}) / (15 \text{ kW} \cdot 8200 \text{ heures d'opération annuelle})$

Le coût de transport des intrants, qui correspond surtout au coût de chargement du camion, est estimé à 1 \$/t selon Mallon et Weersink (2007). Une étude réalisée en Alberta sur la rentabilité de la production de biogaz utilise des coûts de transport et chargement plus élevés : les coûts de chargement et de déchargement sont de 4,2 \$/t pour un intrant liquide et 6 \$/t pour un intrant solide (Ghafoori et Flynn, 2006). À part la composante fixe de chargement du camion, Ghafoori et Flynn (2006) considèrent aussi le coût de transport, qui varie avec la distance parcourue, estimé à 0,11 \$/t/km (pour des intrants solides ou liquides).

Pour le cas 1 et le cas 3, un coût de transport de 1 \$/t a été utilisé en raison de la présence du fumier directement à la ferme. Les coûts sont associés aux installations permettant de déplacer le lisier de la fosse à l'unité de biométhanisation sur la même ferme. Pour le cas 2, un coût de transport de 6 \$/t a été utilisé en raison d'une distance plus grande entre la matière première et les installations de biométhanisation. En effet, les champs ne seront pas nécessairement situés juste à côté de l'usine de biométhanisation.

L'estimation des coûts totaux doit prendre en compte une subvention de 1 ¢/kWh offerte par le gouvernement fédéral dans le cadre du programme écoÉNERGIE. Parmi les subventions propres au Québec, on compte le programme Prime-Vert qui offre 70 % des investissements nécessaires pour implanter un procédé de traitement des fumiers permettant la réduction des émissions des gaz à effet de serre, la production d'énergie et sa valorisation, avec un maximum de 200 000 \$/exploitation (MAPAQ, 2009). Dans les cas 1 et 3, les coûts incluant les amortissements et les subventions ont été réduits pour tenir compte de ce programme.

Par ailleurs, les producteurs de porcs peuvent recevoir un crédit d'impôt de 30 % des dépenses encourues pour l'installation de traitement du lisier de porc, jusqu'à un maximum de 200 000 \$¹³.

Sommaire des coûts

Le tableau 5.1 présente une synthèse des coûts basée sur les estimations présentées dans les sections précédentes.

¹³ Voir : http://www.revenu.gouv.qc.ca/fr/entreprise/impot/societes/credits/environnement/installations_lisier.aspx

TABLEAU 5.1 SOMMAIRE DES COÛTS – BIOGAZ

Élément de coûts	Coûts – Cas 1 – Biogaz à partir de fumier de bovins	Coûts - Cas 2 – Biogaz à partir d'ensilage de maïs	Coûts – Cas 3 – Biogaz à partir de lisiers de porcs
Investissements	176 000 \$ (16 000 \$/kW)	700 000 \$ (7000 \$/kW)	240 000 \$ (16 000 \$/kW)
Frais d'exploitation			
Matière première	0 \$/kWh	0,126 \$/kWh	0 \$/kWh
Frais d'entretien	0,015 \$/kWh	0,015 \$/kWh	0,015 \$/kWh
Main-d'œuvre	0,057 \$/kWh	0,012 \$/kWh	0,041 \$/kWh
Transport	0,02 \$/kWh	0,015 \$/kWh	0,016 \$/kWh
Total – Frais d'exploitation	0,092 \$/kWh	0,168 \$/kWh	0,072 \$/kWh
Total – Incluant amortissements	0,292 \$/kWh	0,253 \$/kWh	0,267 \$/kWh
Total – Incluant amortissements et subventions	0,142 \$/kWh	0,243 \$/kWh	0,113 \$/kWh

En fonction de ces estimations, les coûts variables totaux s'élèvent à 9 ¢/kWh pour le cas 1, à 16,8 ¢/kWh pour le cas 2 et à 7,2 ¢/kWh pour le cas 3. La différence entre ces coûts est surtout attribuable au coût de la matière première. À titre de comparaison, les coûts variables totaux sont généralement estimés entre 8 et 12 ¢/kWh lorsque des déchets organiques sont utilisés comme intrants et entre 16 à 20 ¢/kWh quand des cultures fourragères, comme le maïs fourrager, constituent les principales matières premières (Camirand, 2007a).

Les coûts, incluant les amortissements, sont de 29,2 ¢/kWh pour le cas 1, 25,3 ¢/kWh pour le cas 2 et 26,7 ¢/kWh pour le cas 3. Par comparaison, le coût total de production d'électricité à partir de biogaz incluant l'amortissement estimé par Ghafoori et Flynn (2006) est entre 15,9 et 29,3 ¢/kWh pour l'Alberta. Au Québec, la production expérimentale d'électricité à partir de biogaz à la ferme St-Hilaire n'a pas démontré de rentabilité compte tenu des tarifs d'électricité offerts par Hydro-Québec.

Un élément intéressant qui ressort de l'étude albertaine est la taille minimale à partir de laquelle il est plus économique de produire du biogaz aux fins de production d'électricité au niveau de la ferme qu'au niveau d'une région. L'étude conclut qu'un parc d'engraissement doit avoir au minimum 20 000 têtes de bétail pour que la production de biogaz à la ferme soit moins coûteuse qu'une production centralisée qui réunit plusieurs fermes. Cette conclusion est valide si la finalité du processus est d'épandre le digestat et non de le transformer davantage. Ainsi, les coûts du cas 1 pourraient être diminués dans le cas d'une production centralisée.

5.3 Compétitivité et rentabilité

Pour être rentable, la production d'électricité à la ferme au Québec doit revenir moins chère que le prix de vente de l'électricité, qui varie entre 0,0457 et 0,0749 \$/kWh au Québec. En fonction de ce prix, les trois scénarios présentés ne sont pas rentables. De plus, le rachat d'électricité par Hydro-Québec n'est présentement pas possible.

Les coûts d'approvisionnement que Hydro-Québec paye pour de l'énergie éolienne ou pour l'hydroélectricité produite dans les petits barrages et les barrages plus récents sont plus élevés que les prix de l'électricité en vigueur. Par exemple, le prix plafond offert par Hydro-Québec pour de l'énergie éolienne issue de projets autochtones et communautaires est de 12,5 ¢/kWh (Hydro-Québec, 2009) et de 8,7 ¢/kWh pour l'énergie éolienne issue de promoteurs privés (Hydro-Québec, 2008). Si des prix comparables pouvaient être offerts aux producteurs agricoles québécois, la rentabilité pourrait éventuellement être atteignable, surtout pour des entreprises bénéficiant d'importantes économies d'échelle.

En Ontario, des tarifs spéciaux (*feed-in tariffs*) pour les énergies renouvelables sont offerts depuis 2009, favorisant par conséquent le développement de ces formes d'énergies. Ainsi, l'électricité produite à partir de biogaz obtenu au niveau d'une ferme peut être vendue sur le réseau électrique à 19,5 ¢/kWh si la puissance ne dépasse pas 100 kW et à 18,5 ¢/kWh si la puissance varie entre 100 kW et 250 MW. À de tels prix, la production d'électricité à partir de biogaz produit à partir de fumiers et de lisiers ou de résidus de cultures serait rentable au Québec.

Ricard et *al.*, (2010) ont développé trois scénarios de production de biogaz dans les fermes porcines québécoises. Les auteurs concluent que pour la filière thermique dans les conditions du Québec, le défi est de produire du biogaz à un prix moindre que le gaz naturel (0,46 \$/m³) alors que leur analyse montre un coût de production de 0,97 \$/m³ de biogaz en équivalent méthane. Ces auteurs trouvent également un coût de production d'électricité de 0,46 \$/kWh avec leur scénario le plus réaliste, soit bien au-dessus du tarif de rachat proposé. La différence avec notre estimation du coût de l'électricité au cas 3 s'explique par le fait que le coût d'opportunité d'utilisation du biogaz pour la production de chaleur est pris en compte dans l'analyse. En effet, le biogaz est disponible gratuitement, le coût de production d'électricité à partir du lisier de porc s'approche alors de 0,13 \$/kWh.

5.4 Risques et enjeux

À l'heure actuelle au Québec, le développement de la production de biogaz est confronté à certains défis, tels que l'investissement important et l'impossibilité de vendre l'électricité excédentaire, la difficulté de stocker le surplus de biogaz en été ainsi que la réglementation agricole en matière de phosphore (Beauregard, 2008 dans Coulibaly et *al.*, 2008). En effet, la teneur de phosphore dans le digestat est tout aussi élevée que dans le lisier avant la digestion. De fait, la valorisation des lisiers par la biométhanisation ne contribue en rien à l'amélioration du bilan phosphore d'un territoire. Au contraire, le digestat se retrouve concentré à la sortie de l'usine et doit être redistribué sur les terres agricoles en respectant les abaques de dépôt maximum en phosphore.

En théorie, l'approvisionnement en effluents d'élevage ne devrait pas poser de problème vu qu'un certain nombre d'exploitations sont en surplus d'effluents. L'application de la biométhanisation serait un bon moyen pour les valoriser. Une étude menée en Ontario a démontré que l'installation d'un biodigesteur centralisé qui desservirait un territoire ayant 25 kilomètres de rayon et digérerait plusieurs genres de biomasses comporterait de forts avantages économiques. Les coûts et les exigences logistiques liés au transport du fumier vers l'installation, à l'évacuation des boues, de même que les lacunes sur le plan de l'utilisation rentable des quantités considérables de chaleur issues de la transformation des déchets que générerait l'installation ont toutefois démontré que le projet était trop complexe et imprévisible pour attirer les investissements ainsi que l'engagement de la part du secteur privé local et des agences publiques concernées.

Toutefois, dans le cas du Québec, un projet centralisé de production de biogaz de petite taille serait plus économique que des projets séparés au niveau de chaque ferme. Ainsi, il pourrait être envisagé qu'un biodigesteur industriel (de type municipal ou autre) puisse valoriser, entre autres, des effluents d'élevage et ainsi décharger les producteurs agricoles de leur surplus d'effluents. Les annonces effectuées au début de 2010 par différentes villes et différents paliers de gouvernement semblent suivre cette direction. Cependant, les plans d'affaires de ces projets n'envisagent pas de valoriser les résidus agricoles et d'élevage en premier lieu, mais plutôt de les utiliser comme complément.

Les enjeux liés au développement de la filière sont également d'ordre réglementaire. Une demande de certificat d'autorisation doit être déposée auprès du MDDEP avant de procéder à la mise en place d'un biodigesteur. Divers règlements pourront également être appliqués en fonction de l'origine des matières premières (tels le *Règlement sur les exploitations agricoles*, la *Loi sur la qualité de l'environnement* et les règlements afférents, la *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles*) et de l'utilisation du biogaz et du digestat. D'autres réglementations seront applicables à la production du biogaz. Par ailleurs, la réglementation gouvernementale concernant l'épandage du digestat contenant des matières organiques provenant de l'extérieur de la ferme n'est pas encore établie de manière définitive.

Depuis peu, de nouvelles dispositions réglementaires amènent des défis supplémentaires au secteur. Le règlement sur la qualité de l'atmosphère (ROA¹⁴) ne permet pas de brûler du biogaz issu d'un procédé de biométhanisation dans une fournaise ou une chaudière au gaz naturel. Il ne serait permis de brûler que des combustibles fossiles dans ces types d'appareils de combustion. En conséquence, le brûlage de biogaz issu d'un procédé de biométhanisation doit être considéré comme de l'incinération.

D'autre part, selon le Projet de Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (PRAA¹⁵), l'utilisation d'autres combustibles, tels le biogaz issu d'un procédé de biométhanisation, sera permise sous certaines conditions dans un appareil de combustion de capacité calorifique égale ou supérieure à 3 MW. Ainsi, les dispositions proposées au PRAA ne permettront pas de brûler de biogaz dans un appareil de combustion de capacité calorifique inférieure à 3 MW.

¹⁴Voir http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R20.HTM

¹⁵ Voir <http://www.mddep.gouv.qc.ca/air/atmosphere/reg-assain-air.pdf>

5.5 Impacts positifs et négatifs

Pour les producteurs agricoles, la production d'électricité à partir de biogaz pourrait favoriser la diversification des revenus si elle était vendue sur le réseau, ce qui n'est aujourd'hui pas le cas. Plus précisément, le producteur agricole pourrait obtenir des revenus supplémentaires suite à la vente d'électricité, la réception de déchets organiques de l'extérieur de la ferme ou suite à la vente éventuelle de crédits de carbone lorsqu'un marché se mettra en place pour le secteur agricole. De plus, ces revenus, surtout ceux provenant de la vente d'électricité, auraient un caractère constant tout au long de l'année. Dans le cas de l'utilisation des cultures énergétiques comme intrants pour la production du biogaz, des impacts sur le prix des terres et la mise en valeur de terres non cultivées peuvent être envisagés.

La production de biogaz à la ferme peut représenter un levier important du développement régional par l'intermédiaire de la diversification des revenus des producteurs agricoles et l'augmentation du nombre d'emplois. Dans le cas d'un digesteur de grande capacité installé dans une région de forte concentration de producteurs de porcs, de bovins ou de volaille, la création d'emplois est encore plus évidente.

Du point de vue des GES, la biométhanisation à la ferme constitue l'une des formes d'énergie renouvelable présentant le meilleur bilan. Environ 10 % des émissions de GES proviennent de l'agriculture, dont la moitié est représentée par le méthane dégagé par la digestion des ruminants et l'entreposage des déjections (en parts égales). Puisque la biométhanisation capte le méthane contenu dans les déjections par le biais du biogaz et le brûle par la suite pour produire de l'électricité ou de la chaleur, son impact sur la réduction des GES est considérable. De plus, l'émission des GES (méthane et oxyde nitreux) est diminuée à l'entreposage et à l'application au champ des effluents (Crolla et *al.*, 2007).

5.6 Faits saillants

- Parmi les trois marchés potentiels de valorisation du biogaz, le marché de l'électricité, le marché thermique et le marché du gaz naturel, le premier semble le plus prometteur pour le secteur agricole québécois;
- Actuellement, les faibles prix de l'électricité au Québec rendent la filière de la biométhanisation non rentable. De plus, l'impossibilité de vendre les surplus d'électricité sur le réseau pose aussi problème;
- Les producteurs pourraient théoriquement recevoir des crédits de carbone pour le remplacement du gaz naturel utilisé et la moindre émission de méthane par les lisiers traités. Toutefois, l'absence de marché dans le secteur agricole rend cette hypothèse encore caduque;
- La rentabilité de la filière nécessiterait le soutien des prix pour l'électricité produite à partir du biogaz. Une telle politique est présentement en place en Ontario.

6. Matériaux d'origine renouvelable - Biofibres

Les matériaux d'origine renouvelable fabriqués à partir de fibres végétales d'origine agricole (biofibres) peuvent être classés en deux catégories : matériaux durs et matériaux souples. Parmi les matériaux durs, on compte les panneaux isolants (panneaux de particules, panneaux de biopolymères), les panneaux plus durs utilisés pour la construction et souvent associés au lin ou à la chènevotte de chanvre et les matériaux non tissés de type « laine de chanvre/lin » qui se présentent en rouleaux et le béton de fibres. Les matériaux souples font principalement référence aux bioplastiques biodégradables qui peuvent être utilisés pour la fabrication des emballages, du papier, et dans le secteur électronique (CQVB, 2008), automobile ou aéronautique (Duhamel, 2009).

6.1 Marchés potentiels

Les matériaux produits à partir de biofibres peuvent être valorisés sur plusieurs marchés : l'industrie de la construction, de l'automobile, de l'aéronautique, des emballages, des équipements de manutention, de l'électronique et des pâtes et papiers.

En Europe, le secteur de l'automobile est le marché le plus avancé technologiquement et le plus porteur en termes d'applications potentielles. Les principaux produits sont les revêtements de coffres, les pièces de structure et les tableaux de bord (CQVB, 2008). Cette industrie, ainsi que celle de l'aéronautique, représentent des marchés potentiels pour l'Amérique du Nord puisqu'elles se proposent, d'ici trois ans, d'utiliser des matériaux composites à base de fibres naturelles qui sont plus légers que les matériaux en fibres de verre (Duhamel, 2009).

En Amérique du Nord, le secteur de la construction représentait récemment un débouché intéressant, notamment pour les panneaux de paille. Cependant, à cause de coûts de production trop élevés, plusieurs usines ont fermé leurs portes. Toutefois, de nouveaux développements technologiques permettent une baisse des coûts qui favorise à nouveau leur utilisation¹⁶ (CQVB, 2008). L'Europe reste le marché le plus développé pour la construction avec des productions de panneaux de paille, de laine de mouton et d'autres matériaux qui sont utilisés depuis plusieurs années dans le domaine de la construction (les panneaux de paille Stramit, produits en République tchèque, par exemple).

Outre les secteurs automobile et de la construction, d'autres marchés potentiels se dessinent : les emballages et les équipements de manutention (palettes en plastique, films de paillage pour culture hors-sol, géotextiles, filtres) représentent un débouché important pour les bioplastiques, tandis que l'industrie électronique et celle des pâtes et papiers constituent des marchés en émergence (CQVB, 2008).

¹⁶ Le coût de production plus élevé était principalement engendré par le coût de l'adhésif utilisé, un adhésif à base d'isocyanates, qui va probablement être remplacé par de la résine phénolique (CQVB, 2008).

Selon nous, le marché de la construction présente le plus d'intérêt puisqu'il s'agit du marché le plus développé actuellement en Amérique du Nord. Plusieurs fonctions peuvent être remplies par les biofibres dans le domaine de la construction. La catégorie des isolants thermiques flexibles à base de paille a été choisie pour l'analyse, car elle est celle pour laquelle les coûts de production sont le plus documentés.

6.2 Coûts

Pour l'estimation des coûts associés à la fabrication des panneaux de paille, l'étude de pré faisabilité faite au Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ) sur les isolants naturels à base de bois (CRIQ, 2009) a été prise comme référence. Plus précisément, nous avons considéré que le processus de fabrication des isolants flexibles à base de bois est similaire à celui des isolants flexibles à base de paille, sauf en ce qui concerne la matière première utilisée. Nous considérons le cas d'une usine d'une capacité de production annuelle de 277 000 m³ d'isolants flexibles à base de paille.

Coûts fixes en capital

L'investissement dans une usine de fabrication de panneaux isolants flexibles en fibres de bois d'une capacité de production de matériel isolant de 2 t/h ou de 277 000 m³ annuellement s'élève à environ 18 millions \$ (CRIQ, 2009). Les coûts d'amortissement sur 10 ans s'élèvent ainsi à 6,50 \$/m³. Les coûts fixes en capital comprennent des équipements neufs, des systèmes, du matériel, et des services, tels que l'ingénierie, la supervision de l'installation, le démarrage et la documentation. Le coût des bâtiments est aussi inclus (environ 2 millions \$). Selon monsieur Abdelkader Chaala de la compagnie Serex¹⁷, il est raisonnable de croire que les coûts d'investissement pour les mêmes panneaux en paille devraient être dans ces limites.

Coûts de la matière première

Les intrants utilisés pour la production d'isolants thermiques flexibles à base de paille incluent la paille de céréales et de maïs, l'émulsion de paraffine comme agent hydrophobe et les fibres bico (fibres de polyoléfine ou polyéthylène bi-composants). Au Québec, la paille traitée sèche livrée à l'usine vaut entre 70 et 100 \$/t, la paraffine 650 \$/t et les fibres bico 2 700 \$/t (CRIQ, 2009). Le coût des matières premières par m³ de produit fini est estimé à environ 16 \$, dont 1 \$ pour la paraffine, 11 \$ pour les fibres bico (CRIQ, 2009) et environ 4 \$ pour la paille¹⁸.

Autres coûts

Les autres coûts incluent les coûts d'énergie, de main-d'œuvre, d'entretien et de réparation et de transport.

¹⁷ Serex offre des services de recherche et d'expertise en transformation des produits forestiers.

¹⁸ Le coût de la paille par m³ d'isolant flexible a été estimé à partir du coût par tonne (70 – 100 \$/t) et la densité des panneaux flexibles (45 kg/m³).

Les coûts d'entretien et de réparation des équipements de production s'élevaient à 2,47 \$/m³ d'isolant, le coût de la main-d'œuvre à 5,06 \$/m³ et le coût de l'énergie à 8,74 \$/m³ (CRIQ, 2009 et calculs de ÉcoRessources Consultants). Les coûts d'entretien et de réparation ont été calculés en considérant qu'ils représentent 10 % du coût de la matière première et de l'énergie. Le coût de la main-d'œuvre suppose l'emploi de 30 personnes réparties entre la production, la supervision, l'expédition et l'atelier technique. Le coût de l'énergie est composé de 7,27 \$/m³ d'énergie thermique et de 1,47 \$/m³ d'énergie électrique.

Les coûts de transport des panneaux dépendent du kilométrage nécessaire. Dans le cas du transport entre Winnipeg et Montréal¹⁹ par camion ouvert de 48 pieds, le coût total, fourni par CK Logistics, serait de 4 200 \$ avant taxes, ou de 48 \$/m³, ce qui revient à environ 0,02 \$/m³. Sur une distance plus faible, par exemple entre Montréal et Toronto, le coût serait de 11 \$/m³ en utilisant une règle de trois. Pour l'analyse, un coût de transport de 5 \$/m³/km a été retenu, ce qui correspondrait approximativement au coût pour le marché local, incluant le chargement et le déchargement.

Sommaire des coûts

Le tableau 6.1 présente une synthèse des coûts basée sur les estimations présentées dans les sections précédentes.

TABLEAU 6.1 SOMMAIRE DES COÛTS – MATÉRIAUX D'ORIGINE RENOUVELABLE - BIOFIBRES

Élément de coût	Coût
Investissements	18 millions de \$ pour une capacité de 277 000 m ³ d'isolants flexibles à base de paille par année. (capacité de 2 t/h)
Frais d'exploitation	
Matière première	
- Paraffine	1 \$/m ³
- Fibres bico	11 \$/m ³
- Paille	4 \$/m ³
Énergie	8,74 \$/m ³
Main-d'œuvre	5,06 \$/m ³
Entretien et réparation	2,74 \$/m ³
Transport (marché local)	5 \$/m ³
Total – Frais d'exploitation	37,54 \$/m³
Total – Incluant amortissements	44,04 \$/m³

¹⁹ La ville de Winnipeg a été choisie de façon arbitraire de façon à analyser la compétitivité par rapport aux provinces des Prairies.

D'après les données obtenues, le coût de production d'isolants thermiques flexibles à base de paille serait de 37,54 \$/m³, excluant les amortissements et sous l'hypothèse du transport sur une courte distance.

6.3 Compétitivité et rentabilité

L'étude du CRIQ (2009) évalue le prix des isolants à base de bois sur le marché québécois en utilisant le ratio 2,5 entre le prix du marché et les coûts de production des isolants flexibles à base de bois produits par l'entreprise allemande Gutex Holzfaserplattenwerk. Ainsi, le prix du marché sera une fois et demie plus élevé que le coût de production. Ceci s'explique principalement par les divers coûts de distribution qui doivent être appuyés pour amener le produit jusqu'au consommateur final. Si on suit la même technique de calcul, le prix de vente au détail des isolants flexibles à base de paille devrait s'élever à 110 \$/m³ au Québec.

Au Québec, les principaux produits concurrents des isolants flexibles à base de paille sont la laine de verre et de roche. Le prix au détail de la laine de verre varie entre 29 et 32 \$/m³ pour les isolants muraux et entre 33 et 38 \$/m³ pour les isolants à grenier, considérés comme plus épais (CRIQ, 2009). Le prix au détail des isolants en fibre de roche est plus élevé et se situe entre 60 et 85 \$/m³ dépendamment de leurs dimensions et des applications visées (isolation thermique, acoustique, protection incendie) (CRIQ, 2009).

À 110 \$/m³, les isolants flexibles à base de paille restent dispendieux par rapport à leurs deux principaux concurrents. Au niveau de l'isolation thermique, les panneaux de paille flexibles ont un coefficient R légèrement supérieur²⁰ à la laine de verre et de roche, ce qui signifie qu'ils isolent un peu mieux. Par contre, cet avantage n'est pas assez important pour justifier la différence de prix. L'attribut environnemental des isolants thermiques à base de paille pourrait cependant faire en sorte que certains acheteurs soient prêts à payer un prix plus élevé pour le produit. En effet, les isolants de fibre de roche et de laine de verre sont produits à partir de matériaux non renouvelables. Par conséquent, les isolants flexibles à base de paille pourraient éventuellement être vendus sur le marché de la construction verte qui est prêt à payer une prime pour ses qualités environnementales.

Le potentiel d'exportation de ce produit apparaît très limité puisque le prix de la paille est relativement élevé au Québec comparativement aux autres provinces du Canada. La principale raison expliquant cette différence de coûts serait la forte demande au Québec pour la litière. En effet, dans l'ouest du Canada, le coût moyen livré à l'usine avoisine 50 \$/t (séchée au champ), soit 50 % moins cher qu'au Québec, ce qui réduit le coût total des panneaux isolants de 2,25 \$/m³ (Agronovita inc. et ÉcoRessources Consultants, 2008).

On estime donc que les isolants thermiques à base de paille fabriqués au Québec pourront difficilement concurrencer ceux produits dans l'ouest du Canada en raison du prix élevé de la matière première au Québec. Si le marché se développe au Québec, il restera essentiellement local. Toutefois, ce marché n'est pas menacé par les exportations de l'Ouest canadien étant donné le prix élevé de transport des panneaux, estimé à 48 \$/m³ pour le trajet Winnipeg – Montréal.

²⁰ Conductivité thermique pour une épaisseur de 10 cm (m²KW⁻¹) (CRIQ, 2009).

6.4 Risques et enjeux

Avant d'opter pour une technologie en particulier, il faut s'assurer de la constance d'approvisionnement en matières premières. Des contrats à long terme devront être signés de manière à ce que l'usine puisse fonctionner à pleine capacité, de manière à rentabiliser les investissements.

L'absence de marché ou la faible demande pour des isolants à base de paille rend difficile l'investissement dans une ligne de production au Québec. Le coût de production de ce type d'isolant est très élevé par rapport aux isolants de laine de verre et de roche qui sont présentement importés par le Québec. Pour cette raison, le marché pour les isolants à base de paille risque de rester limité à la construction de maisons écologiques.

Actuellement, la filière est non rentable sans subventions. Cependant, des mesures incitatives pourraient encourager les constructeurs et les consommateurs à choisir des matériaux écologiques pour la construction de maisons et d'édifices verts.

6.5 Impacts positifs et négatifs

L'utilisation de la paille et des autres résidus et cultures agricoles pour la production de matériaux de construction, d'intrants dans l'industrie automobile ou autres finalités pourrait contribuer à diversifier les revenus agricoles. Ainsi, le producteur agricole pourrait vendre la paille sur différents marchés, ce qui pourrait faire augmenter la valeur de ce produit. Par ailleurs, il aurait aussi le choix de produire des cultures en émergence comme le chanvre industriel, le lin ou le panic érigé. Ces cultures semblent être des matières premières très prometteuses pour la fabrication de certains matériaux renouvelables. Aussi, la diversification des revenus agricoles, la mise en valeur des terres non cultivées ou l'augmentation potentielle du prix des terres sont tous des facteurs qui peuvent avoir un impact positif sur le développement régional.

Le bilan environnemental des matériaux d'origine renouvelable est généralement meilleur que celui des matériaux conventionnels. Par exemple, par rapport au panneau de placoplâtre, la fabrication d'un panneau à base de paille exige une consommation d'énergie qui est dix fois inférieure lors de sa transformation, tout en stockant durablement un carbone renouvelable. Un autre atout environnemental des panneaux de paille est le fait que la matière première est renouvelable, ce qui n'est pas le cas pour la laine de verre et la fibre de roche, même si ce sont des matières premières naturelles dans les deux cas. De plus, certaines cultures, tel le chanvre, ne nécessitent aucune utilisation de pesticides et laissent un sol riche en minéraux.

Par contre, l'usine de production des isolants de paille comporte certains impacts environnementaux dont il faut tenir compte, entre autres, le dégagement de poussière pendant le broyage. Un système de captage de poussière doit être installé au niveau du broyeur. Les gaz émis par le séchage de la paille et la compression doivent être analysés et éventuellement traités.

Le site de production doit être situé loin des habitations pour éviter d'incommoder les résidents avec les odeurs et pour écarter les risques inhérents à la qualité de l'air. Face aux autres indicateurs environnementaux, les technologies de fabrication de bioproduits industriels sont généralement bénéfiques pour l'environnement, la santé et le développement des territoires ruraux.

Au niveau de la santé, aucune influence négative n'est connue pour les panneaux de paille (Heurts, 2007), tandis que de légers problèmes pour les travailleurs installant la laine de verre sont documentés (irritation de la peau et des yeux, congestion nasale et sensation de picotement dans la gorge). De plus, un lien est possible, mais n'est pas encore prouvé, entre le fait de travailler avec de la laine de roche et le cancer du poumon (Santé Canada, 2006).

6.6 Faits saillants

- Le prix au détail estimé des isolants flexibles à base de paille est considérablement plus élevé que celui des isolants concurrents, ce qui obligerait à vendre ce produit sur un marché prêt à payer une prime pour les attributs environnementaux du produit;
- Les isolants flexibles à base de paille ne seraient pas concurrentiels sur les marchés de l'extérieur du Québec en raison des coûts de transport élevés. De même, des produits similaires produits dans l'ouest du Canada ne seraient pas concurrentiels au Québec.

Conclusion

La présente étude visait à évaluer la rentabilité, la compétitivité et les impacts économiques de certaines filières bioindustrielles à base d'intrants agricoles présentant le plus fort potentiel de succès à court et à moyen terme. Plus précisément, les filières de la production de bioéthanol par la fermentation du millet perlé sucré, de la production de bioéthanol cellulosique par hydrolyse enzymatique, de la production de carburants renouvelables par gazéification, de la production de granules énergétiques par densification, de la production de biogaz et de méthanisation ainsi que de la production de matériaux d'origine renouvelable à base de biofibres ont été analysées.

Il en ressort qu'un réel potentiel de développement d'une filière bioindustrielle implique un approvisionnement suffisant en matières premières, la compétitivité de la matière première agricole avec d'autres types possibles de matières premières, la rentabilité du processus de transformation et la présence d'un marché rémunérant correctement la filière. À la lumière de ces éléments, le potentiel de développement des filières ne peut pas être confirmé.

La filière de la production d'éthanol par la fermentation de la mélasse de millet perlé sucré pourrait avoir un certain potentiel, compte tenu de l'estimation préliminaire des coûts et de la possibilité de valoriser ce produit par une filière déjà existante. Cependant, plusieurs éléments d'incertitude demeurent, principalement par rapport aux coûts de pressage et de transport, à la capacité des producteurs de produire de façon optimale et à la popularité éventuelle de la culture auprès des producteurs.

Dans le cas des filières produisant du bioéthanol et d'autres carburants renouvelables par hydrolyse enzymatique et gazéification, le défi réside principalement dans la capacité d'approvisionner une usine de taille optimale avec des intrants agricoles ne concurrençant pas directement les cultures produites à des fins alimentaires. En effet, la quantité de terres marginales au Québec n'est présentement pas suffisante pour soutenir le développement de cultures énergétiques. Ceci est essentiellement dû au fait que les terres marginales sont habituellement de moins bonne qualité que les terres présentement en culture et qu'elles sont fractionnées et réparties dans diverses régions du Québec, ce qui augmente les coûts de récolte et de transport. L'approvisionnement d'une usine de taille optimale nécessiterait donc l'utilisation de terres présentement vouées à des fins alimentaires, ce qui fait en sorte de diminuer l'acceptabilité sociale d'un projet. De plus, pour la gazéification, la biomasse forestière et les matières résiduelles municipales semblent avoir un meilleur potentiel économique que la biomasse agricole. Les filières de l'éthanol et des carburants renouvelables ont cependant un marché prometteur à l'échelle québécoise et les procédés d'hydrolyse enzymatique et de gazéification, une fois adoptés et optimisés à l'échelle commerciale, devraient être compétitifs par rapport à l'éthanol produit par la fermentation du maïs-grain. Ceci reste toutefois encore à être démontré.

La filière de fabrication de granules énergétiques à partir du panic érigé, ou encore du saule à croissance rapide, comporte également des problèmes d'approvisionnement. De plus, la biomasse d'origine agricole est plus chère que la biomasse forestière. Dans le cas de la méthanisation, le procédé n'est pas compétitif en raison du faible coût de l'électricité au Québec et de l'impossibilité de vendre sur le réseau. Enfin, les panneaux isolants thermiques flexibles à base de paille pourraient avoir un certain potentiel de développement, mais strictement sur le marché des matériaux de construction renouvelables. En effet, les isolants de laine de roche et de fibres de verre demeurent beaucoup moins chers.

En somme, aucune des filières à l'étude ne présente un fort potentiel de développement pour l'instant, à l'exception possible de l'éthanol à base de millet perlé sucré et des isolants thermiques flexibles à base de paille. Cependant, la situation pourrait changer suite à de nouvelles politiques ou à des changements sociaux. Par exemple, dans le cas de la production d'électricité à partir des biogaz, le rachat de l'électricité issu du procédé de méthanisation à bon prix stimulerait la filière. Le développement de l'industrie de la construction verte serait pour sa part bénéfique au secteur des biofibres. La production d'énergie à grande échelle à partir de biomasse agricole est cependant plus problématique. Présentement, la quantité de terres marginales disponibles ne permet seulement que l'approvisionnement d'usines ayant une faible capacité, ce qui est difficilement rentable financièrement. De plus, d'autres intrants, tels la biomasse forestière, se révèlent être moins dispendieux. Les cultures énergétiques peuvent être une réponse à la sous-utilisation de certaines terres, mais il reste toujours à trouver un processus de valorisation rentable.

Références

- Agronovita Inc. et ÉcoRessources Consultants. (2008). *Analysis of the Logistical Costs Associated with Second Generation Biofuel Feedstocks*. Produit pour Agriculture et Agroalimentaire Canada.
- AltEnergyMag (2006). *Production of mixed alcohol fuels from gasified biomass*. Disponible en ligne : http://www.altenergymag.com/emagazine.php?issue_number=06.02.01&article=ecalene
- Beauregard, G. (2008). Budget de culture 2008 – Maïs fourrager en silo tour. Disponible en ligne : http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/documents/Budget%202008_Mais%20fourrager%20en%20silo%20tour.pdf
- Beauregard, S., A. Abella, C. B. Laflamme, D. Crowley (2010). Faisabilité technico-économique de la méthanisation pour Jean-Marc Henri Inc. Rapport final présenté au programme défi-solution énergétique à la ferme. 8 mars. Disponible en ligne : [http://traitement.qc.ca/Documents/Études/Rapport%20final-JM%20Henri%20inc%20\(Bloc%20Sud\)%20202010-02-11%201.pdf](http://traitement.qc.ca/Documents/Études/Rapport%20final-JM%20Henri%20inc%20(Bloc%20Sud)%20202010-02-11%201.pdf)
- Bradley, D. (2008). *Canada Biomass Availability and Cost*. Canadian Bioenergy Association. 27 p.
- Brodeur, C., D. Crowley, X. Desmeules, S. Pigeon et R.-M. St-Arnaud (2008). *La biométhanisation à la ferme*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec. Disponible en ligne : <http://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/EVC033.pdf>
- Camirand, E. (2007a). *Le biogaz c'est notre affaire!* Présentation réalisée lors de la Journée sur la méthanisation des engrais de ferme, tenue le 26 janvier 2007. Disponible en ligne : http://www.agrireseau.qc.ca/energie/documents/PAGES_M%20c3%a9thanisation_Camirand_Eric.pdf
- Camirand, E. (2007b). *Economical Viability of Biogas Production from Energy Crops*. Présentation réalisée en 2007 à la conférence Growing the Margins Energy Conference (Ontario). Disponible en ligne : <http://www.gtmconference.ca/site/downloads/presentations/6D3%20-%20Eric%20Camirand.pdf>
- Camirand, E. (2008). *Perspectives for Anaerobic Digestion & Bio-Methane in the Fraser Valley, B.C.* Présentation réalisée en 2008 à la conférence Growing the Margins Energy Conference (Ontario). Disponible en ligne : <http://www.gtmconference.ca/site/downloads/2008presentations/6B1%20-%20Camirand%20for%20posting.pdf>
- Chornet, E. (2008). *L'éthanol cellulosique: contexte et perspectives*. Présenté lors du 71^e congrès de l'Ordre des agronomes du Québec : Approvisionner l'industrie ou l'épicerie?, 11 p.
- Clément, M. (2009). Budget millet perlé 2009 l'hectare en balles rondes «enrobées type boudin » régie 2 coupes. Disponible en ligne : http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/documents/Budget%20Millet%20perl%20c3%a9%202009_ensilage_balles_rondes.pdf
- Collins, K. (2006). *US agriculture and the emerging bioeconomy*. Disponible en ligne : www.usda.gov/documents/Dr.CollinsEnergyConference.ppt
- Coulibaly, A. L., Drolet, V., Nadeau J. (2008). *Biométhanisation en milieu agricole*. États des lieux dans les principaux pays producteurs. Revue de littérature, juin.
- CQVB (Centre québécois de valorisation des biotechnologies) (2008). *Utilisation des fibres agricoles valorisées*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). Disponible en ligne : <http://www.craaq.qc.ca/data/DOCUMENTS/EVC033.pdf>
- CRAAQ (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec) (2008a). *Compilation des essais de panic érigé réalisés au Québec*, 195 p.
- CRAAQ (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec) (2008b). Saule à croissance rapide pour production de copeaux – Budget d'entreprise – Juin 2008, 8 p.

- CRIQ (Centre de recherche industrielle du Québec) (2009). *Pré faisabilité technique et financière sur les isolants naturels à base de bois et potentiel de commercialisation*. Rapport technique no. RT-39543. Étude réalisée pour Promotion de produits forestiers P.P.F., Q-WEB (Québec Wood Export Bureau).
- Crolla, A., Kinsley C. et E. Pattey (2007). La digestion anaérobie : biogaz et les impacts environnementaux. Journée sur la méthanisation des engrais de ferme, Sainte-Julie.
- Dufort, P., Robert, L. et G. Beauregard (2007). MAPAQ – (2007). Budget foin de panic érigé en semis pur – 2007. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- Duhamel, A. (2009). Sentiment d'urgence dans une filière naissante. La Terre de chez nous, 80(32), p. 18.
- ÉcoRessources Consultants (2010). *Emerging biomass pellet environmental and economic assessment*. Préparé pour Environnement Canada. 102 p
- ÉcoRessources Consultants et Agronovita Inc. (2010). *Environmental Implications from Marginal Land Utilization for Biomass and Biofuels Production or for Siting of Renewable Energy Facilities*. Produit pour Environnement Canada. 91 p.
- Foust, T. D., A. Aden, A. Dutta et S. Phillips (2009). *An economic and environmental comparison of a biochemical and a thermochemical lignocellulosic ethanol conversion processes*. Cellulose, 16, p. 547-565.
- Ghafoori, E. et P. Flynn (2006). *Optimum Sizing for Anaerobic Digestion* (2006). A BIOCAP Research Integration Program Synthesis Paper. Disponible en ligne : http://www.biocap.ca/rif/report/Flynn_P.pdf
- Hydro-Québec (2009). *Électricité produite à partir d'éoliennes totalisant 500 MW répartis comme suit : bloc de 250 MW issu de projets autochtones et bloc de 250 MW issu de projets communautaires*. Document d'appel d'offres A/O 2009-02. Disponible en ligne : <http://www.hydroquebec.com/distribution/fr/marchequbécois/ao-200902/pdf/doc-appel-offres.pdf>
- Hydro-Québec (2008). *Réfection de la centrale de Gentilly-2 : Hydro-Québec tient à rétablir les faits concernant les coûts du projet*. Communiqué publié le 5 mai 2008. Disponible en ligne : http://www.hydroquebec.com/4d_includes/surveiller/PcFR2008-122.htm
- Heurts, E. (2007). *Matériaux isolants écologiques : propriétés thermiques et acoustiques, priorités et mise en œuvre*. Disponible en ligne : <http://www.curbain.be/download/Materiauxecologiques2007.pdf>
- IEA (International Energy Agency) (2006). *World Energy Outlook 2006*, Chapter 14: The outlook for biofuels.
- IFP (2004). *Panorama 2004, le point sur... L'hydrogène : vecteur énergétique du futur?*, 6 p. Disponible en ligne : http://www.ifp.fr/content/download/57523/1261761/file/IFP-Panorama04_11-HydrogeneVF.pdf
- Junginger, M. et R. Sikkema (2009). International pellet trade; Results of the Pellet@las projects. 25 p.
- Laganière, G. (2007). *Traitement anaérobie : développement durable*. Bio-Terre Systems – Programme d'atténuation des gaz à effet de serre. Journée sur la méthanisation des engrais de ferme, Sainte-Julie. Disponible en ligne : http://www.agrireseau.qc.ca/energie/documents/PAGES_Methanisation_Laganiere_Gerard.pdf
- Lane, J. (2008). *Syntec Biofuel to develop thermo-chemical catalysts to produce butanol, propanol; targets higher-price fuels*. Biofuels Digest. Disponible en ligne : <http://www.biofuelsdigest.com/blog2/2008/11/21/syntec-biofuel-to-develop-thermo-chemical-catalysts-to-produce-butanol-propanol-targets-higher-price-fuels>
- Lease N., G. Goyette, G. Hayart, R. Lauzier, H. Martel, D. Naud, C. Roy, D. Ruel et L. Théberge (2008). *Évaluation du potentiel de la filière des granules combustibles fabriqués à partir des cultures pérennes*. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 55 p. Disponible en ligne : http://www.agrireseau.qc.ca/energie/documents/Evaluation_granules.pdf
- Leduc, R. (2007). *Les sous-produits d'Éthanol: La valeur alimentaire et économique dans la ration de bouvillon*. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. 15 p.
- Mallon, S. et Weersink A. (2007). *The financial feasibility of anaerobic digestion for Ontario's livestock industries*. Working paper 07/01. Université de Guelph. Disponible en ligne : <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/7295/2/wp070001.pdf>

- Milbrandt, A. et R. P. Overend (2008). *The Future of Liquid Biofuels for APEC Economies*. Préparé pour APEC Energy Working Group, 103 p. Disponible en ligne : http://www.biofuels.apec.org/pdfs/ewg_2008_liquid_biofuels.pdf,
- MNRF (2008). *Ressources et industries forestières. Portrait statistiques édition 2008*. Site Internet consulté le 8 juin 2009 : <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-statistiques-resumee.jsp>
- REAP Canada et OMAFRA (2008). *Optimization of Switchgrass Management for Commercial Fuel Pellet Production*. Alternative Renewable Fuels Research and Development Fund, Resource Efficient Agricultural Production.
- Revenu Québec (2003). Crédit d'impôt pour la production d'éthanol. Disponible en ligne : <http://www.revenu.gouv.qc.ca/fr/entreprise/impot/credits/ressources/ethanol.asp>
- Ricard, M.-A., V. Drolet, A. Coulibaly, C.B. Laflamme, C. Charest, F. Forcier, M.-P. Lachance, F. Pelletier, P. Levasseur, F. Pouliot, S. Godbout, S. Lemay (2010). *Développer un cadre d'analyse et identifier l'intérêt technico-économique de produire du biogaz à la ferme dans un contexte québécois*. Pour le Centre de développement du porc du Québec inc. Avril 2010. Disponible en ligne : <http://www.cdpqinc.qc.ca/document/Projet/MethanisationFINAL.pdf>
- S&T² et Meyers Norris Penny LLP. (2004). *Economic, Financial, Social Analysis and Public Policies for Fuel Ethanol Phase 1*. Rapport préparé pour : Ressources Naturelles Canada. 278 p. Disponible en ligne : http://www.iogen.ca/issues_environment/ressources/e_economic_financial_social_and_public_polices_for_fuel_ethanol.pdf
- Santé Canada (2006). *La sécurité des fibres vitreuses artificielles*. Disponible en ligne : <http://www.hc-sc.gc.ca/hl-vs/iyh-vsv/prod/vitre-fra.php>
- Spelter, H. et D. Toth (2009). North America's Wood Pellet Production. Research Paper FPL-RP-656. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 21 p. Disponible en ligne : www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplrp/fpl_rp656.pdf
- Tao, L. et A. Aden (2009). *The economics of current and future biofuels*. In *Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*, 45, p. 199 – 147.
- Williams, P. R., D. Inman, A. Aden et G. A. Heath (2009). *Environmental and Sustainability Factors Associated with Next-Generation Biofuels in the U.S.: What Do We Really Know?* *Environmental Science and Technology*, 43(3), p. 4763 – 4775.
- Wright, M. M. et R. C. Brown (2007). *Comparative economics of biorefineries based on the biochemical and thermochemical platforms*. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 1(1), p. 49 – 56.