

La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique



Centre de référence en agriculture
et agroalimentaire du Québec

Avertissements

Au moment de sa rédaction, l'information contenue dans ce document était jugée représentative des connaissances sur les bioénergies et son utilisation demeure sous l'entière responsabilité du lecteur. Certains renseignements pouvant avoir évolué de manière significative depuis la rédaction de cet ouvrage, le lecteur est invité à en vérifier l'exactitude avant de les mettre en application.

Cette série de fiches concrétise le projet *Développement d'outils spécifiques aux énergies pour les conseillers agricoles du Québec* réalisé dans le cadre du programme *Initiative d'appui aux conseillers agricoles*, selon les termes de l'entente Canada-Québec sur le Renouveau du Cadre stratégique agricole.



Canada



Pour information

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec
2875, boulevard Laurier, 9^e étage
Québec (Québec) G1V 2M2
Téléphone : 418 523-5411
Télécopieur : 418 644-5944
Courriel : client@craaq.qc.ca
Site Internet : www.craaq.qc.ca

Publication n° EVC 030

© Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2008

Rédaction

Catherine Brodeur, M.Sc., chargée de projets, Groupe AGÉCO, Québec

Jacques Cloutier, ingénieur, ingénieur de projet, BPR Infrastructure inc., Québec

David Crowley, ingénieur junior, chargé de projets, Agrinova, Alma

Xavier Desmeules, agronome, chargé de projets, Agrinova, Alma

Sylvain Pigeon, M.Sc., ingénieur, chargé de projet, BPR Infrastructure inc., Québec

Rosalie-Maude St-Arnaud, B.Sc., analyste, Groupe AGÉCO, Québec

Révision

Gérard Goyette, M.Sc., conseiller en biotechnologie, MAPAQ, Direction de l'innovation scientifique et technologique, Québec

Daniel-Yves Martin, ingénieur, chercheur, IRDA, Québec

Denis Naud, ingénieur, MAPAQ, Direction de l'environnement et du développement durable, Québec

Richard Wieland, agronome, directeur recherche et développement des affaires, Agrinova, Alma

Coordination

Joanne Lagacé, chargée de projets, CRAAQ, Québec

Lyne Lauzon, biologiste, coordonnatrice aux publications, CRAAQ, Québec

Édition

Chantale Ferland, M.Sc., chargée de projets aux publications, CRAAQ, Québec

Mise en page

Jocelyne Drolet, agente de secrétariat, CRAAQ, Québec

Conception graphique

Chantal Gauthier, agente de secrétariat, CRAAQ, Québec

Photos de la page couverture

Agro Énergie, Saint-Roch-de-l'Achigan

Huguette Martel, MAPAQ

Remerciements

Francis Allard, ingénieur junior, Agro Énergie inc., producteur de saule, Saint-Roch-de-l'Achigan

Normand Caron, producteur de panic érigé, Ferme Norac, Salaberry-de-Valleyfield

Michel Labrecque, chercheur, Université de Montréal, Institut de recherche en biologie végétale, Montréal

Huguette Martel, agronome, MAPAQ, Direction régionale de l'Estrie, Sherbrooke

Guillaume Pilon, M.Sc., candidat au doctorat, Université de Sherbrooke, Département de génie chimique, Sherbrooke

Roger Samson, M.Sc., REAP–Canada, Sainte-Anne-de-Bellevue

Donald Smith, Ph.D., Université McGill, Département des sciences végétales, Montréal

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
L'éthanol produit à partir de biomasse	1
L'utilisation de l'éthanol.....	2
<i>L'éthanol dans les véhicules à essence</i>	2
<i>Performance comparée</i>	3
Le processus de fabrication de l'éthanol cellulosique	3
L'éthanol ailleurs dans le monde	5
<i>Brésil</i>	5
<i>États-Unis</i>	5
La production d'éthanol cellulosique au Québec et au Canada.....	6
<i>Les incitatifs gouvernementaux canadiens</i>	6
<i>Les incitatifs gouvernementaux québécois</i>	7
La rentabilité de la production d'éthanol cellulosique	7
La production de biomasse énergétique agricole	8
<i>La culture des plantes herbacées</i>	8
<i>La culture des plantes ligneuses</i>	10
<i>La mise en marché de la récolte</i>	11
<i>Évaluation de la rentabilité de la production de panic érigé</i>	12
<i>Les avantages et les inconvénients</i>	12
L'éthanol cellulosique : une option durable à long terme?	13
Références.....	15

Introduction

L'intérêt pour le développement des ressources énergétiques renouvelables s'est grandement intensifié au cours des dernières années avec la croissance des préoccupations environnementales et la hausse vertigineuse du prix des carburants fossiles. À ce titre, les carburants utilisés dans le secteur des transports constituent une des cibles privilégiées puisqu'il s'agit d'un des plus grands postes de consommation de l'énergie fossile. L'éthanol fabriqué à partir des sucres fermentescibles contenus dans les végétaux est un biocarburant qui présente un grand potentiel comme substitut à l'essence. S'il est utilisé depuis de nombreuses années au Brésil, son utilisation est toutefois beaucoup plus récente en Amérique du Nord et dans le reste du monde occidental. Sa fabrication à partir de plantes autrement destinées à la production d'aliments (maïs et céréales) soulève toutefois de grands enjeux environnementaux et économiques. Devant l'importance de ces enjeux est née la nécessité de développer des technologies permettant de produire de l'éthanol à partir d'autres types de matière première, dont la matière cellulosique. C'est dans cette optique que le gouvernement du Québec a annoncé, en 2007, son intention de favoriser le développement de la filière de l'éthanol cellulosique plutôt que de l'éthanol produit à partir de maïs ou de céréales. Cette fiche vise à fournir un ensemble d'informations sur la production d'éthanol à partir de matière première riche en cellulose, sur ses débouchés, ses perspectives et les enjeux qu'elle soulève, afin d'éclairer les conseillers agricoles qui doivent appuyer des producteurs dans des décisions touchant la production d'énergie. L'éthanol produit à partir de maïs et de céréales fait l'objet d'une fiche distincte.

L'éthanol produit à partir de biomasse

L'éthanol n'est rien de plus que l'alcool contenu dans les boissons alcoolisées consommées par les humains depuis la nuit des temps. Il est le produit de la fermentation des sucres. Le bioéthanol est de l'éthanol élaboré à partir de biomasse. Il est obtenu par la fermentation des sucres fermentescibles (hexoses – sucres à six carbones) contenus dans la biomasse. Il peut être élaboré à partir de biomasses riches en sucrose (canne à sucre, betterave sucrière, etc.), en amidon (maïs, orge, blé, pomme de terre, etc.) ou en cellulose (résidus agricoles tels que la paille ou les cannes de maïs, résidus forestiers, cultures énergétiques telles que le panic érigé ou des arbres à courte rotation). Alors que le glucose contenu dans la biomasse riche en sucrose peut être directement fermenté par les microorganismes, celui contenu dans l'amidon et la cellulose n'est pas directement disponible. Les chaînes de glucose contenues dans ces polysaccharides doivent être au préalable fragmentées par un procédé appelé hydrolyse enzymatique.

Le procédé d'hydrolyse enzymatique qui s'applique aux plantes riches en amidon est relativement simple et bien maîtrisé. C'est pourquoi il a fait l'objet d'un développement à l'échelle commerciale au cours des dernières années en Amérique du Nord. Dans le cas de l'éthanol produit à partir de matière lignocellulosique, couramment appelé éthanol cellulosique, le procédé d'hydrolyse enzymatique est beaucoup plus complexe et laborieux. La matière lignocellulosique est composée de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Ces trois polymères distincts sont étroitement associés dans les différentes couches de la paroi des plantes et ils forment une matrice rigide difficile à déstructurer pour libérer la cellulose. Les premières étapes conduisant à la production d'éthanol cellulosique à partir de la

La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique

matière lignocellulosique sont donc différentes de celles utilisées pour la production d'éthanol à partir de canne à sucre ou de maïs et comporte encore des défis sur le plan technologique. Une fois la cellulose libérée et hydrolysée en glucose, les étapes subséquentes sont toutefois les mêmes. Au terme du procédé, l'éthanol fabriqué à partir de l'une ou l'autre des biomasses utilisées est exactement le même produit.

L'utilisation de l'éthanol

L'éthanol, ou alcool éthylique, est un composé chimique formé de carbone, d'hydrogène et d'oxygène ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$) alors que l'essence qu'il remplace est un hydrocarbure et est uniquement constitué de carbone et d'hydrogène. Bien que l'éthanol puisse être utilisé à l'état pur comme carburant substitut à l'essence dérivée du pétrole, il est généralement utilisé en mélange à des niveaux de concentration variables. Les mélanges d'éthanol et d'essence sont identifiés par l'abréviation « Exx », où « xx » indique le pourcentage d'éthanol inclus dans le mélange. Un carburant E20 contient donc 20 % d'éthanol et 80 % d'essence alors qu'un carburant E100 correspond à de l'éthanol pur. Plusieurs types de mélange sont commercialisés dont les plus fréquents sont le E5, le E10, le E85 et le E100.

L'éthanol dans les véhicules à essence

La plupart des véhicules à essence peuvent fonctionner avec un mélange contenant jusqu'à 10 % d'éthanol (E10). Ce type de mélange n'est disponible qu'à certaines stations-service à travers le Canada, dont certaines stations de la compagnie Petro Canada, qui commercialise des mélanges allant jusqu'à E10, et certaines stations de la compagnie Sonic, qui commercialise un mélange E5. En Saskatchewan, la vente d'éthanol est déjà pratique courante. En effet, depuis le 15 janvier 2007, la législation de la province exige que tout distributeur de carburant mélange en moyenne 7,5 % d'éthanol à l'essence qu'il vend.

Certains moteurs conçus pour être plus résistants à la corrosion de l'éthanol peuvent être alimentés avec un carburant contenant 85 % d'éthanol et 15 % d'essence (E85). Cette proportion d'essence est nécessaire pour le démarrage par temps froid, l'éthanol pur s'enflammant difficilement. Toutefois, étant donné la faible disponibilité de ce carburant au Canada, son utilisation est restreinte à des corporations possédant leur flotte de véhicules et leur propre équipement de distribution et de ravitaillement. Le gouvernement du Canada (Ressources naturelles Canada, Agriculture et Agroalimentaire Canada et d'autres ministères) possède une flotte de véhicules pouvant fonctionner avec un mélange comportant jusqu'à 85 % d'éthanol. Cette flotte, qui utilise chaque année quelque 100 000 litres d'éthanol cellulosique produit par l'usine logen, est la première dans le monde à s'approvisionner à l'éthanol cellulosique de façon régulière.

Performance comparée

Comparé à l'essence, l'éthanol contient près de 40 % moins d'énergie sur base pondérale, mais affiche une masse volumique supérieure de 7 % (cf. Tableau 1). Utilisé dans un système d'injection volumétrique, l'éthanol générera donc moins de puissance qu'une essence, cette diminution étant proportionnelle au contenu en éthanol du carburant. Toutefois, l'incorporation de 10 % d'éthanol dans l'essence ne réduit que de 3 % la puissance du moteur et favorise une meilleure combustion d'un même ordre de grandeur.

Par ailleurs, l'éthanol présente un indice d'octane très élevé, ce qui constitue un avantage pour un moteur à essence. Un fort indice d'octane indique une résistance élevée à la détonation provoquée par un allumage prématuré, ce qui assure une haute performance du moteur, notamment au niveau de la puissance développée. L'éthanol joue à ce titre le rôle des dérivés du plomb autrefois présents dans l'essence.

Tableau 1. Comparaison de certaines caractéristiques de l'éthanol pur (E100) avec une essence sans plomb

Propriétés	Éthanol (E100)	Essence
Énergie disponible (MJ/kg)	26,7	43,5
Masse volumique (kg/m ³)	792	738
Indice octane	113	87 à 94 (selon grade)

Source : Patzek, 2006

Le processus de fabrication de l'éthanol cellulosique

Le processus de fabrication d'éthanol à partir de cellulose est beaucoup plus complexe que celui réalisé à partir d'amidon ou de sucrose. La cellulose doit d'abord être décomposée en molécules fermentescibles. Or, les longues chaînes de molécules de glucose qui composent la cellulose sont encapsulées par de la lignine, une matière très résistante et difficilement désagrégeable.

Plusieurs procédés ont été développés pour produire l'éthanol cellulosique : l'hydrolyse acide, l'hydrolyse enzymatique et le procédé thermochimique (gazéification). Bien que ces procédés dits de « deuxième génération » soient tous techniquement réalisables, à ce jour, le procédé d'hydrolyse enzymatique est le seul procédé utilisé à l'échelle industrielle au Canada qui utilise comme matière première de la biomasse d'origine agricole.

Les étapes du procédé d'hydrolyse enzymatique sont similaires à celles du procédé de fabrication de l'éthanol de grains. Toutefois, les techniques et les microorganismes impliqués sont fort différents. Les principales étapes de la production d'éthanol cellulosique par voie d'hydrolyse enzymatique sont les suivantes :

1. Prétraitement

La matière première (fibres) est tout d'abord prétraitée par un procédé de défibrage à explosion de vapeur. Cette étape permet d'accroître la surface spécifique afin d'augmenter l'accessibilité des fibres aux enzymes utilisées dans les étapes suivantes du procédé.

L'efficacité de ce prétraitement est primordiale pour limiter la durée de l'étape d'hydrolyse et donc, les coûts de l'ensemble du procédé.

2. Hydrolyse enzymatique

L'hydrolyse de la cellulose est réalisée à partir des cellulases, un ensemble d'enzymes qui, mises en contact avec la matière première, la décomposent afin de produire des unités de sucres élémentaires. En milieu naturel, les cellulases sont produites par les bactéries symbiotiques présentes dans l'estomac des ruminants et des termites. Ce sont d'ailleurs ces enzymes qui permettent aux ruminants d'utiliser une grande partie de l'énergie contenue dans les plantes. Les cellulases utilisées dans le processus d'hydrolyse de la cellulose doivent rencontrer des critères spécifiques de façon à optimiser le taux de conversion de la cellulose en sucres élémentaires. À l'heure actuelle, cette étape est la plus dispendieuse puisque plusieurs jours sont nécessaires pour compléter cette décomposition. Plusieurs recherches sont actuellement en cours afin d'augmenter l'efficacité de ces enzymes. L'hydrolyse de la cellulose nécessite jusqu'à 100 fois plus d'enzymes que celle de l'amidon.

3. Séparation

Après l'hydrolyse enzymatique, la lignine, demeurée intacte, est séparée de la liqueur puis déshydratée. Elle peut être valorisée directement pour produire de l'énergie thermique ou de l'énergie électrique, de la litière, des absorbants, etc.

4. Fermentation

La liqueur obtenue après la séparation contient les sucres issus de l'hydrolyse enzymatique. Ces sucres sont fermentés par des microorganismes. À cette étape, la recherche de bactéries en remplacement des levures permettrait d'accélérer le procédé et d'améliorer le rendement de la biomasse.

5. Distillation

La liqueur fermentée contient environ 5 à 6 % d'éthanol. L'éthanol est séparé de la liqueur par un système de distillation à plusieurs colonnes qui fournira un alcool pur à 96 %.

6. Déshydratation

Pour les besoins de la commercialisation, l'éthanol est déshydraté par un tamis moléculaire. L'éthanol est alors dit « anhydre ». Un dénaturant y est ajouté en petite quantité (2 à 5 %) afin d'éviter qu'il ne soit commercialisé sur le marché de l'alimentation humaine.

Jusqu'à 75 % de la cellulose et de l'hémicellulose contenues dans la matière première végétale peuvent être transformées partiellement en éthanol. L'efficacité de cette transformation dépend notamment du taux de récupération de la cellulose et de l'hémicellulose, de l'efficacité de leur conversion en sucres fermentescibles ainsi que de l'efficacité de la fermentation du glucose en éthanol.

Les coproduits générés

Deux coproduits sont générés par la fabrication d'éthanol cellulosique : la lignine et le dioxyde de carbone (CO₂) produit lors de la fermentation. La quantité de lignine produite

dépend grandement de la matière première. Elle est minimale pour la transformation des cultures énergétiques en éthanol et maximale pour la transformation de résidus forestiers de conifères. Une fois récolté, nettoyé des impuretés (alcool résiduel) puis comprimé, le dioxyde de carbone trouve un débouché dans la fabrication des boissons gazeuses et de la glace sèche ou dans les processus de refroidissement rapide des aliments. Au total, une tonne de biomasse, sur base de matière sèche, produirait actuellement entre 200 et 230 litres d'éthanol. L'optimisation des procédés de conversion de la cellulose et de l'hémicellulose ainsi que de la fermentation pourrait faire augmenter ce rendement à près de 400 litres¹.

L'éthanol ailleurs dans le monde

Brésil

Le Brésil, qui a cédé son titre de premier producteur mondial aux États-Unis en 2005, fabrique l'éthanol à partir de la canne à sucre (3,3 millions d'hectares, 17 milliards de litres)². C'est l'importante productivité de cette culture, combinée à des coûts de main-d'œuvre très faibles, qui lui permet d'avoir le plus faible coût de production à l'échelle mondiale. La production d'éthanol au Brésil remonte à plus de 30 ans, le marché y est donc bien développé. En 2006, 75 % des voitures brésiliennes étaient « flex-fuel », c'est-à-dire qu'elles pouvaient fonctionner indifféremment avec de l'essence, de l'éthanol ou un mélange des deux.

États-Unis

Aux États-Unis, plusieurs entreprises, pour la plupart déjà impliquées dans la production d'éthanol à base de maïs, produisent de l'éthanol cellulosique ou projettent de construire des usines de production d'éthanol cellulosique. Toutefois, ces projets sont pour la plupart des projets de recherche et de développement de technologies qui sont propres à chaque entreprise. Les capacités de production d'éthanol cellulosique sont donc limitées, soit de l'ordre de quelques millions de litres par année. Le Renewable Fuel Association estime toutefois que les terres agricoles américaines seraient en mesure de produire 1,3 milliard de tonnes de biomasse par année pouvant remplacer plus de 30 % de l'essence consommée au pays³.

L'importante croissance de la production d'éthanol aux États-Unis, principalement à partir de grains de maïs, s'explique par les diverses mesures incitatives mises en place par le gouvernement américain. Dans l'objectif d'augmenter la production d'éthanol à 132 milliards de litres d'ici 2017, le gouvernement américain a élaboré plusieurs politiques nationales de subvention. Les deux principales sont :

¹ Green, N. 2004. *Growing energy. How biofuels can help end America's oil dependence*. Natural Resources Defense Council. 78 p.

² Nouahlat, L., *Le tour du monde des agrocarburants. Brésil, États-Unis, Europe, Asie : mais qu'est-ce qui fait chalooper les biocarburants. Réponse dans ce petit tour du monde*, Terra Economica, mai 2007, www.terra-economica.info/Le-tour-du-monde-des, 3268.

³Renewable Fuel Association. *Cellulosic ethanol*. www.ethanolrfa.org/resource/cellulosic/.

La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique

- la « Volumetric Ethanol Excise Tax Credit » : remboursement de la taxe d'accise de 13,5 ¢ US pour chaque litre de mélange carburant-éthanol;
- la « Small Ethanol Producer Tax Credit » : crédit de taxes de 2,6 ¢ US/l aux petits producteurs d'éthanol.

Une politique de subvention visant plus précisément le développement de la filière de l'éthanol cellulosique a également été mise en place par le gouvernement américain en février 2007. D'ici 2011, le Department of Energy (DOE) subventionnera la construction de six usines de production d'éthanol cellulosique à l'échelle commerciale qui transformeront autant des résidus forestiers et agricoles (blé, maïs, orge, riz) que des plantes énergétiques. Les subventions du DOE couvriront jusqu'à 40 % des frais de construction des nouvelles usines, soit environ 385 M\$ au total. Cette initiative vise principalement à abaisser le coût de revient de l'éthanol cellulosique au niveau de celui de l'éthanol grain (environ 0,26 \$ US/l). Par ailleurs, 114 M\$ seront investis d'ici 2010 dans quatre usines pilotes pour des procédés en développement. La sélection des usines pilotes est prévue pour le printemps 2008.

La production d'éthanol cellulosique au Québec et au Canada

Au Canada, on ne compte qu'une seule usine de production d'éthanol cellulosique, Iogen Corporation, située dans la région d'Ottawa. Cette usine de démonstration à grande échelle produit environ 2,5 millions de litres d'éthanol par année à partir d'un approvisionnement quotidien de 30 tonnes de matière première agricole (pailles de blé, d'avoine et d'orge). Deux usines de démonstration sont présentement en construction au Québec, soit à Westbury et à Bromptonville. Le projet d'usine de Westbury, entrepris par la société Enerkem en 2007, produira 4 millions de litres d'alcool de méthanol et d'éthanol par année à partir de « bois urbain » et d'autres matières de base circonstancielle. Cette usine sera ainsi la première usine industrielle à produire de l'éthanol à partir de matières de base non homogènes et peu coûteuses. La production sera effectuée à l'aide d'un procédé de gazéification. Une production de 50 millions de litres est prévue dans une deuxième étape. Le projet d'usine de Bromptonville, sous l'initiative de CRB Innovations, se concentrera sur la valorisation de la biomasse forestière, en partenariat avec la papetière Kruger, ainsi que sur la biomasse agricole. Il aura recours au procédé d'hydrolyse enzymatique.

Les incitatifs gouvernementaux canadiens

Au Canada, diverses mesures incitatives ont été mises en place afin de soutenir le développement de l'industrie de l'éthanol. La mesure la plus importante a été d'exempter la portion en éthanol des mélanges éthanol-carburant de la taxe d'accise fédérale de 10 ¢/l. Cette exonération a pris fin le 1^{er} avril 2008 avec la mise en œuvre de la Stratégie écoÉNERGIE. Dans le but de faire passer le pourcentage moyen d'éthanol dans le carburant à 5 % d'ici 2010, le gouvernement fédéral a conçu cette stratégie dont les principales modalités sont :

- Initiative écoÉNERGIE : un budget de 1,5 milliard de dollars sur neuf ans pour les producteurs de carburants renouvelables. Cette mesure se traduit notamment par un incitatif à la production pouvant atteindre 10 ¢/l pour les trois premières années et diminuant progressivement à 4 ¢/l par la suite;

La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique

- Initiative écoAGRICOLE : programme pluriannuel de 200 millions de dollars (en vigueur jusqu'à 31 mars 2011) accordant des contributions remboursables aux producteurs agricoles pour la construction ou l'agrandissement d'installations destinées à la production de biocarburants de transport à partir de matières agricoles;
- Carburants renouvelables de prochaine génération : 500 millions de dollars pour investir avec le secteur privé dans l'établissement de grandes installations de production de carburants renouvelables de deuxième génération.

Les incitatifs gouvernementaux québécois

En mai 2006, le gouvernement du Québec a mis en place une stratégie énergétique visant à faire en sorte que d'ici 2012, tout carburant vendu au Québec possède un minimum de 5 % d'éthanol. Cette stratégie, qui a précédé la réglementation fédérale de contenu minimum, est assortie de mesures incitatives parmi lesquelles un crédit d'impôt temporaire pour les usines de production d'éthanol. Ces crédits sont accordés lorsque le baril de pétrole affiche un prix mensuel moyen inférieur à 65 \$ US, un prix qui rend alors l'éthanol non compétitif. Depuis l'ouverture de l'usine de Varennes, cette situation ne s'est toutefois jamais présentée et l'usine n'a donc pas bénéficié de cette mesure. En juin 2007, le gouvernement du Québec a annoncé la création de la Chaire de recherche industrielle sur l'éthanol cellulosique à l'Université de Sherbrooke ainsi que son soutien à l'implantation de deux usines de démonstration de production d'éthanol cellulosique en Estrie : les usines d'Enerkem à Westbury et de CRB Innovation à Bromptonville. Plusieurs partenaires seront impliqués dans la Chaire dont l'entreprise Greenfield Ethanol, la papetière Kruger et la pétrolière Ultramar. Pour atteindre l'objectif de 5 % d'éthanol dans l'essence d'ici 2012, le Québec devra produire 420 millions de litres d'éthanol, soit plus du triple de la capacité de production actuelle de l'usine de Varennes qui s'élève à 120 millions de litres.

La rentabilité de la production d'éthanol cellulosique

La production d'éthanol cellulosique est un procédé complexe qui implique des investissements importants et des frais d'exploitation élevés. Afin de rentabiliser ces investissements, d'importants volumes de biomasse doivent être traités. Bien que cette biomasse soit abondante et peu dispendieuse, elle est souvent très dispersée. Le vaste rayon d'approvisionnement de la matière première implique ainsi une logistique et des frais de collecte et de transport qui peuvent s'avérer importants.

La rentabilité de la production d'éthanol cellulosique passe inévitablement par l'amélioration du rendement de la transformation de la biomasse en alcool. Elle suppose le développement de bactéries et d'enzymes spécifiques qui réduiront le temps de traitement de la biomasse et, par conséquent, les coûts liés à l'hydrolyse enzymatique. À l'heure actuelle, le coût relié à cette étape est un des principaux facteurs qui affecte la rentabilité de cette production, notamment par rapport à l'éthanol-maïs. Toutefois, selon Esteban Chornet, titulaire de la Chaire de recherche sur l'éthanol cellulosique de l'Université de Sherbrooke, lorsque la technologie de l'éthanol cellulosique sera davantage maîtrisée, le coût de production de l'éthanol cellulosique pourrait diminuer de 40 à 50 %⁴. Le tableau 2

⁴ Renaud, R. 2007. *Nouvelle Chaire de recherche en éthanol cellulosique*. Université de Sherbrooke. 14 juin. www.usherbrooke.ca/liaison_vol41/n19/a_ethanol.html.

La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique

compare certains éléments de coûts relatifs à la production d'éthanol cellulosique par voie enzymatique et à la production d'éthanol à base de maïs.

Tableau 2. Comparaison de certains éléments de coût de production de l'éthanol à partir de matière cellulosique et de maïs

	Maïs	Cellulosique
Coût en capitaux pour construire l'usine	0,33 à 0,40 \$ US/l	1,14 à 1,45 \$ US/l
Rendement en éthanol	371 l/t	265 à 303 l/t
Coût des enzymes	0,01 \$ US/l	0,08 à 0,13 \$ US/l
Coût de transport	Faible	Élevé

Source : Collins, 2006

La production de biomasse énergétique agricole

L'éthanol cellulosique peut être produit à partir de résidus de culture (pailles de blé, d'avoine ou d'orge), de meuneries (résidus d'émondage du maïs, résidus de soya et d'avoine et remoulage de blé) et de forêts (copeaux de bois et bran de scie). Il peut également être produit à partir de plantes énergétiques (panic érigé, etc.) et de plantations d'arbres à courte rotation (peuplier hybride, saule, etc.). Alors que les résidus de culture sont essentiellement une valorisation des rejets d'autres productions, les plantes ligneuses (saule et peuplier hybride) et les plantes herbacées (alpiste roseau, miscanthus géant et panic érigé) peuvent être produites spécifiquement dans l'objectif de produire de l'énergie. Leur croissance rapide, leur haut rendement en biomasse ainsi que leur grande valeur énergétique sont tous des caractéristiques qui en font de bons candidats pour leur utilisation comme intrants énergétiques. Le contenu en cellulose de la plante est le facteur le plus déterminant pour estimer le rendement potentiel en éthanol. À l'opposé, plus une plante contient des taux élevés en lignine et en hémicellulose, moins elle contient de cellulose et donc moins elle produira d'éthanol.

La culture des plantes herbacées

La production de panic érigé est la culture énergétique qui fait le plus parler d'elle au Québec, autant pour les aspects touchant la conduite de la culture (implantation, entretien, fertilisation, récolte, etc.) que pour son apport énergétique. Les recherches réalisées sur le sujet ont principalement été menées par Resource Efficient Agricultural Production Canada (REAP) de Sainte-Anne-de-Bellevue et par les Directions régionales de Chaudière-Appalaches, de l'Estrie et de la Montérégie du MAPAQ.

Les graminées telles que le panic érigé suscitent un intérêt pour la production de bioénergie en raison de leur productivité moyenne à élevée, de leur pérennité, de leur efficacité dans l'utilisation de l'eau et des nutriments et de leur adaptation aux conditions climatiques du Québec et de l'est du Canada. De plus, ce sont des cultures à usages multiples. Elles peuvent potentiellement servir à produire aussi bien de l'éthanol cellulosique que des granules/briquettes de biocombustibles, du biogaz, de la litière pour les animaux, des pâtes à papier ou des isolants pour les maisons. Par leur enracinement profond et la densité de

La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique

leurs tiges, ces graminées pourraient éventuellement servir à la protection des bandes riveraines et à la réhabilitation des terrains contaminés. Elles comportent l'avantage de devoir être renouvelées tous les 10 à 15 ans seulement.

Plusieurs activités de recherche appliquée sur la mise en culture du panic érigé (Figure 4) ont été menées par le MAPAQ et par REAP-Canada. Les résultats ont démontré que :

- le panic érigé possède un réseau développé de racines qui lui permet de bien résister à la sécheresse ou à l'excès d'eau;
- le panic érigé est une plante vivace compétitive qui requiert un minimum d'herbicide pour son implantation;
- la récolte du panic érigé est identique à celle des fourrages. Elle s'effectue avec la même machinerie sous forme de balles rondes ou carrées (Figure 2);
- la récolte tardive à l'automne semble la meilleure option afin d'éviter les pertes hivernales de feuilles et de têtes cassées au champ pendant l'hiver;
- le rendement en biomasse du panic érigé varie selon la région, le type de sol, la fertilisation et les variétés, mais est de l'ordre de 8 à 12 tonnes de MS par hectare par année.

Ces résultats de recherche semblent donc indiquer que cette culture présente un potentiel intéressant en tant que culture énergétique. Son utilisation pour la production d'éthanol cellulosique ou pour d'autres fins dépendra de l'évolution des différentes filières en concurrence pour son utilisation.



Figure 1. Champ de panic érigé

Xavier Desmeules, Agrinova



Figure 2. Récolte de panic érigé

Xavier Desmeules, Agrinova

La culture des plantes ligneuses

Les cultures ligneuses pérennes (saule et peuplier) présentent également un potentiel pour la production d'éthanol parce qu'elles sont riches en cellulose. Les recherches sur les plantes ligneuses à croissance rapide ont démontré que le saule présenterait le meilleur potentiel énergétique en raison de son aptitude à produire de façon répétitive des rejets de souches après recépage. L'établissement de la culture s'effectue par bouturage des plants à raison de 10 000 à 20 000 plants/ha⁵ à l'aide de planteuses mécaniques spécifiques. « Le sol approprié pour le saule doit présenter un drainage modéré jusqu'à imparfait, une profondeur minimale de 1 mètre et un pH entre 5,5 et 7,5 »⁶. L'établissement de la plantation requiert une lutte mécanique et chimique aux mauvaises herbes et une fertilisation minimales.

La récolte est effectuée après chaque cycle de croissance d'une durée de trois ou quatre ans. Cette récolte se fait par tiges entières ou avec broyage. Dans les deux cas, des machines adaptées dérivées de récolteuses de canne à sucre, d'ensileuses ou de presses à balles rondes doivent être utilisées. Le rendement au Québec serait de l'ordre de 7 à 23 tonnes de MS/ha/an⁷ selon les conditions climatiques, le type de sol, la fertilisation et les clones de saules utilisés. « Les terrains pierreux, très mal drainés, trop acides, avec une texture très lourde ou sableuse sont à éviter. Sur ces types de sols, la culture du saule est possible, mais les rendements sont moindres et les coûts de production plus élevés »⁸. La récolte doit être séchée à l'air libre ou par aération mécanique, à température ambiante ou avec de l'air chaud. Le renouvellement de la culture se fait après 15 à 25 ans de production continue.

Le tableau 3 dresse un sommaire des caractéristiques des principales cultures de plantes ligneuses et herbacées faisant l'objet de recherches pour la production d'énergie au Québec.

⁵ Sirois, G. 2000. *Étude sur la culture d'essences à croissance rapide*. Rapport final, SADC de Charlevoix.

⁶ Labrecque, M. et T.I. Teodorescu. 2004. *La culture intensive de saules en courtes rotations (CICR)*. Institut de recherche en biologie végétale. Jardin botanique de Montréal. Document non publié.

⁷ Labrecque, M. et T.I. Teodorescu. 2003. *High biomass yield achieved by Salix clones in SRIC following two 3-year coppice rotations on abandoned farmland in southern Quebec, Canada*. Biomass and Bioenergy 25: 135-146.

⁸ Labrecque, M. et T.I. Teodorescu. 2004. *La culture intensive de saules en courtes rotations (CICR)*. Institut de recherche en biologie végétale. Jardin botanique de Montréal. Document non publié.

Tableau 3. Caractérisation sommaire des cultures énergétiques adaptées au climat du Québec

Espèce	Stade de développement	Rendement annuel (t/ha)	Points forts	Points faibles
Plantes herbacées				
Panic érigé	Déjà implanté chez certains producteurs du Québec	8 à 12* (sud-ouest du Québec)	<ul style="list-style-type: none"> - Fait l'objet de plusieurs recherches - Productif pendant plus de 10 ans - Peu exigeant en fertilisant 	<ul style="list-style-type: none"> - Implantation lente et difficile - Rendement plus faible en zone de production froide (UTM faible)
Miscanthus géant	Essais au Bas-Saint-Laurent	10 à 20** (France)	<ul style="list-style-type: none"> - Hauteur jusqu'à 4 m - Productif de 5 à 18 ans 	<ul style="list-style-type: none"> - Implantation par rhizomes : coût très élevé - Sensibilité au froid le 1er hiver
Alpiste roseau	Des essais avec le MAPAQ	3,9 à 7,9*** (Estrie, récolte au mois d'août)	<ul style="list-style-type: none"> - Hauteur jusqu'à 1,9 m - Très résistant à la sécheresse - Bonne tolérance en sol mal drainé - Facilité d'implantation - Bonne croissance en région froide également 	<ul style="list-style-type: none"> - Taux de cendres plus élevé (2 à 6,5 % en Estrie)***
Plantes ligneuses				
Saule	Déjà implanté chez certains producteurs du Québec	7 à 23****	<ul style="list-style-type: none"> - Hauteur de 4 à 6 m - Arbre à croissance rapide - Haute qualité de combustion - Productif de 20 à 25 ans 	<ul style="list-style-type: none"> - Récolte aux 3 ou 4 ans - Besoin en machinerie adaptée pour la récolte - Implantation avec boutures

Source : *Samson, 2007; **Garnier, novembre 2006; ***Martel, novembre 2007 et février 2008; ****Labrecque, 2002.

La mise en marché de la récolte

Le marché de l'éthanol cellulosique ne constitue pas encore un débouché commercial pour la production de plantes énergétiques au Québec puisque aucune usine ne produit de l'éthanol à partir de plantes énergétiques riches en cellulose. Les technologies de deuxième génération sont encore au stade de la recherche et développement. Leur application

La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique

commerciale, quoique prometteuse, ne devrait se faire que d'ici 8 à 10 ans⁹. D'ici là, les producteurs souhaitant implanter des cultures énergétiques sur leurs terres peuvent tenter de viser d'autres marchés tels que ceux des biocombustibles solides (production de granules), de la litière pour animaux ou des isolants de maison. Ces marchés demeurent toutefois peu développés et représentent donc un défi en termes de mise en marché.

Évaluation de la rentabilité de la production de panic érigé

Le futur du panic érigé comme culture énergétique dépendra de sa compétitivité relative comme source d'intrant pour la production d'éthanol cellulosique. Les recherches effectuées à ce jour ont permis d'obtenir des estimations du coût de production du panic érigé, notamment pour son utilisation dans la production de granules. En considérant un rendement de 10 tonnes/ha/an sur base sèche, le coût de production du panic érigé livré à l'usine serait au minimum de 46 \$/t¹⁰. La distance séparant la ferme du lieu de livraison revêt une grande importance pour limiter les frais de transport. Pour rentabiliser la production, on estime que le producteur devrait obtenir un prix variant entre 73 et 90 \$/t¹¹ livrée à l'usine (à des fins de granulation). À l'heure actuelle toutefois, il semblerait que le marché de la litière offrirait un meilleur prix que celui des biocombustibles, soit environ 150 \$/t¹². La répartition des coûts de production sur 10 ans dans les différents postes budgétaires varie selon les sources. Cette répartition est présentée au tableau 3.

Tableau 4. Répartition des coûts de production du panic érigé sur 10 ans

Poste budgétaire	MAPAQ ¹³	REAP-Canada
Établissement	13 %	3 %
Fertilisation	30 %	16 %
Récolte et transport	31 %	46 %
Main-d'œuvre	11 %	5 %
Autres (location des terres, taxes foncières, divers)	16 %	30 %

Sources : MAPAQ et REAP-Canada

Les avantages et les inconvénients

La production de plantes énergétiques comme le panic érigé exige peu d'entretien comparativement aux cultures maraîchères et aux grandes cultures (ensemencement aux 10-15 ans, pas de labourage, etc.). Elle permettrait par ailleurs de valoriser certaines terres marginales. Puisque ces plantes ne sont pas persistantes, le retour aux cultures céréalières demeure possible si l'expérience des cultures énergétiques ne s'avère pas concluante, et cela,

⁹ Centre de développement du porc du Québec inc. 2007. Compte-rendu du quatrième Sommet de l'Association canadienne des énergies renouvelables. 2 au 4 décembre. Québec.

¹⁰ MAPAQ. 2007. *Budget foin de panic érigé en semis pur*. Guy Beaugard, Louis Robert et Pierre Dufort, agronomes. Adapté par Xavier Desmeules, agronome et David Crowley, ingénieur junior, Agrinova. Non publié.

¹¹ MAPAQ. 2007. *Budget foin de panic érigé en semis pur*. Guy Beaugard, Louis Robert et Pierre Dufort, agronomes. Adapté par Xavier Desmeules, agronome et David Crowley, ingénieur junior, Agrinova. Non publié.

¹² Caron, N. 2008. Communication personnelle. 21 février.

¹³ MAPAQ. 2007. *Budget foin de panic érigé en semis pur*. Guy Beaugard, Louis Robert et Pierre Dufort, agronomes. Adapté par Xavier Desmeules, agronome et David Crowley, ingénieur junior, Agrinova. Non publié.

La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique

même pour les plantes ligneuses. Toutefois, la plantation de certaines cultures énergétiques peut exiger l'utilisation d'équipements spécialisés. Par exemple, sur de petites superficies, les boutures de saule peuvent être plantées à la main. Cependant, sur de grandes superficies, la plantation doit être mécanisée et la machinerie agricole doit être adaptée en conséquence (dans le cas des machineries disponibles au Canada) ou importée d'Europe. Le prix des semences et des boutures est par ailleurs élevé.

La disponibilité de l'expertise et de l'information pour guider les producteurs dans ces nouvelles pratiques représente sans aucun doute un enjeu pour le développement de ce type de cultures énergétiques, ce qui est normal puisqu'il s'agit de productions naissantes. Des recherches sont toujours en cours pour évaluer le potentiel de ces productions dans le contexte québécois.

Le marché des plantes énergétiques est encore très peu développé au Québec. Parvenir à vendre sa production à un prix qui assure une certaine rentabilité s'avère donc une entreprise risquée, malgré les quelques marchés potentiels actuels ou futurs (éthanol cellulosique, chauffage, fabrication de litière, isolation des maisons, etc.). La longue période d'implantation des cultures énergétiques (2 à 3 ans sont nécessaires avant d'être en mesure de récolter) vient ajouter au risque lié à ce choix de production. De plus, contrairement à la plupart des grandes cultures dont le maïs pour la production d'éthanol, ce type de culture n'est pas couverte par le Programme d'assurance stabilisation des revenus agricoles (ASRA), ce qui augmente la part du risque assumée par le producteur.

L'éthanol cellulosique : une option durable à long terme?

En 2007, le gouvernement du Québec a indiqué son intention de privilégier le développement de la filière cellulosique au détriment de la filière à base de maïs, et ce, principalement pour des raisons environnementales. En effet, les impacts environnementaux liés à la production d'éthanol à base de maïs et de céréales suscitent la controverse et le développement de cette filière est donc loin de faire l'unanimité. Alors que le maïs et le blé sont des cultures intensives consommant une grande quantité de produits de synthèse (engrais minéraux, pesticides), la biomasse utilisée pour produire l'éthanol cellulosique en consomme peu (plantes énergétiques) ou pas du tout (résidus de culture, forestiers, etc.). L'impact potentiel de cette production sur la qualité des sols (teneur en matière organique, érosion hydrique et éolienne, compactage) et des eaux souterraines et de surface est donc beaucoup moins important. Par contre, les prélèvements de résidus agricoles et forestiers peuvent se faire au détriment du maintien d'un certain taux de matière organique dans les sols.

L'utilisation d'éthanol fabriqué à partir de matière cellulosique permettrait par ailleurs de réduire davantage les émissions de GES (6 à 8 % pour un mélange E10) que l'éthanol fabriqué à partir de maïs (3 à 4 % pour un mélange E10)¹⁴. Cette différence s'explique essentiellement par la différence de consommation d'énergie lors de la culture des plantes, les cultures de maïs et de céréales étant beaucoup plus intensives. Les conclusions ne sont toutefois pas unanimes lorsque le cycle de vie complet de l'éthanol cellulosique est considéré.

¹⁴ Ressources naturelles Canada. 2006. *L'éthanol un carburant écologique d'avenir*. Octobre. http://oee.nrcan.gc.ca/publications/infosource/pub/lescarburants/ethanol/M92_257_2003.cfm.

La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique

En effet, le prétraitement de la fibre (voie thermique ou chimique) et la distillation consomment beaucoup d'énergie, ce qui s'explique par la résistance de la cellulose pour libérer ses sucres fermentescibles et par l'obtention d'une solution plus diluée d'éthanol. Ainsi, certains résultats suggèrent plutôt un bilan énergétique négatif de 0,5 unité d'énergie disponible sous forme d'éthanol par unité d'énergie fossile consommée (Iogen, 2008; Pimentel et Patzek, 2005).

À l'heure actuelle, il demeure que les impacts environnementaux appréhendés pour l'approvisionnement des usines de cette filière sont moindres que ceux de la filière maïs. Les nombreuses recherches effectuées sur la production d'éthanol cellulosique devraient permettre d'apporter des améliorations importantes à l'efficacité du processus de transformation de la cellulose en éthanol au cours des prochaines années. Ainsi, l'évolution de la recherche dans cette filière pourra avoir un impact majeur sur les conclusions tirées des bilans énergétiques.

La même analyse peut être faite relativement au problème de l'utilisation des terres productives pour d'autres fins que l'alimentation. La production d'éthanol à partir de matière première cellulosique permet potentiellement de valoriser des matières premières abondantes (résidus de culture, résidus forestiers, etc.) ainsi que des terres marginales (cultures énergétiques). Toutefois, si ces cultures énergétiques sont réalisées sur des superficies autrement consacrées à la production de cultures pour la fabrication d'aliments, la même controverse sera suscitée que pour l'éthanol à base de maïs. L'utilisation de terres (ou plus directement de produits agricoles) à des fins autres qu'alimentaires a pour effet de faire grimper le prix des cultures destinées à l'alimentation humaine et, ultimement, le prix des aliments, ce qui constitue un effet non souhaitable de la production d'énergie renouvelable. Or, l'importance des coûts de transport de la matière première tend à favoriser la production de ces cultures dans les zones d'agriculture intensive, souvent plus près des réseaux de transport ou de distribution ou même des marchés. D'ailleurs, la question de la logistique a été le principal élément évoqué lors du Cellulosic Ethanol Summit de Washington en octobre 2007. La production d'éthanol cellulosique nécessite la collecte et le déplacement d'importantes quantités de matière première par rapport à l'éthanol à base de maïs ou de céréales. Actuellement, aucune infrastructure de transport et de stockage n'est en place pour assurer l'approvisionnement en matière première, sans compter les équipements et les pratiques agricoles ou forestières spécialisées nécessaires à la collecte des résidus qui ne sont toujours pas adaptés. Cette question revêtira donc une importance majeure dans le développement des zones de production d'éthanol à base de matière cellulosique.

Le principal frein au développement de l'éthanol cellulosique demeure ainsi de nature économique. Tant que les coûts d'approvisionnement et de fabrication demeureront élevés, l'utilisation de matière lignocellulosique ne pourra se substituer à l'utilisation de matière première à base d'amidon ou de sucrose à moins d'une intervention des pouvoirs publics. Par ailleurs, les processus de production étant passablement différents, les usines qui fabriquent actuellement de l'éthanol à base de maïs ou d'autres céréales ne pourront être converties (sinon à très grands frais) pour fabriquer de l'éthanol à base de cellulose. Ainsi, les investissements importants qui ont déjà été effectués à ce jour aux États-Unis et dans une moindre mesure au Canada continueront d'influencer la demande en maïs pour de nombreuses années à venir et continueront à alimenter la controverse.

La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique

La rentabilité de la filière de l'éthanol cellulosique passe donc par le développement de technologies, principalement les procédés enzymatiques, qui permettront de réduire son coût de production ainsi que par la diminution des coûts d'investissement nécessaires à l'implantation des usines grâce notamment à des mesures de soutien gouvernementales. D'ailleurs, l'expérience récente du développement des différentes filières d'énergie renouvelable dans les pays développés tend à monter le rôle central joué par les pouvoirs publics pour orienter ce développement. Les recherches déjà réalisées et celles à venir contribuent à générer l'information permettant d'effectuer des choix éclairés.

Références

- Badger, P.C. 2002. *Ethanol from cellulose: A general review*. Dans : Trends in new crops and new uses. J. Janick et A. Whipkey (édit.).
- Baum, B. 2006. *Termites could eat into oil's bottom line*. Renewable Energy World Online. 20 septembre. www.renewableenergyworld.com/ .
- Bulletin Investissement Québec. 2007. *Les biocarburants au Québec : En route vers 2012*. Mars. Volume 14, numéro 1. www.investquebec.com/fr/index.aspx?page=2185 .
- Bulletins-electroniques.com. 2007. *La production d'éthanol cellulosique passe à l'échelle industrielle*. 12 mars. www.bulletins-electroniques.com/actualites/41686.htm .
- Bullis, K. 2007. *Will cellulosic ethanol take off?* MIT Technology Review. 26 février.
- Collins, K. 2006. *US agriculture and the emerging bioeconomy*. USDA www.usda.gov/documents/Dr.CollinsEnergyConference.ppt .
- Centre de développement du porc du Québec inc. 2007. *Compte-rendu du quatrième Sommet de l'Association canadienne des énergies renouvelables*. 2 au 4 décembre. Québec. www.cdpqinc.qc.ca/document/CR-Sommet%20de%20l'Association%20canadienne%20des%20%C3%A9nergies%20renouvelables%20Final.pdf .
- Dien, B.S., H.-J.G. Jung, K.P. Vogel, M.D. Casler, J.A. Lamb, L. Iten, R.B. Mitchell et G. Sarath. 2006. *Chemical composition and response to dilute-acid pretreatment and enzymatic saccharification of alfalfa, reed canarygrass, and switchgrass*. Biomass and Bioenergy 30(10): 883.
- Department of Energy. 2008. *U.S. Department of Energy to invest up to \$33.8 million to further development of commercially viable renewable fuels*. Communiqué de presse. 26 février. www.energy.gov/news/6015.htm .
- Department of Energy. 2008. *U.S. Department of energy selects first round of small-scale biorefinery projects for up to \$114 million in federal funding*. Communiqué de presse. 29 janvier. www.energy.gov .
- Eiland, F., M. Leth, M. Klamer, A.M. Lind, H.E.K. Jensen et J.J.L. Iversen. 2001. *C and N turnover and lignocellulose degradation during composting of miscanthus straw and liquid pig manure*. Compost Science and Utilisation. 9(3): 188.

La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique

- Eklund, R. et al. 1995. *The influence of SO₂ and H₂SO₄ impregnation of willow prior to steam pretreatment*. *Bioresource Engineering* 52: 226.
- Gouvernement du Canada. *ÉcoÉNERGIE. La stratégie concernant les carburants renouvelables*.
www.ecoaction.gc.ca/ecoenergy-ecoenergie/renewablefuels-carburantsrenouvelables-fra.cfm .
- Green, N. 2004. *Growing energy. How biofuels can help end America's oil dependence*. Natural Resources Defense Council. 78 p.
- Gouvernement du Canada. *Initiative pour un investissement écoagricole dans les biocarburants* (IIEB). www.ecoaction.gc.ca/ecoagriculture/biofuels-biocarburants-fra.cfm .
- Gouvernement du Canada. 2007. *Le plan budgétaire de 2007*. Viser un Canada plus fort, plus sécuritaire et meilleur. 19 mars. p. 73.
- Gouvernement du Québec. 2007. *Près de 25 millions de dollars d'investissements dans la recherche sur l'éthanol cellulosique en Estrie*. Communiqué de presse. 7 juin.
www.premier-ministre.gouv.qc.ca/salle-de-presse/communiques/2007/juin/2007-06-07.shtl .
- Gouvernement de la Saskatchewan. 2008. *Saskethanolnow*. Saskatchewan Ethanol Program.
www.saskethanolnow.ca/Default.aspx?DN=7452ac97-9d92-48e7-b2fe-02ecccabb54 .
- Iogen Corporation. Site officiel. www.iogen.ca .
- Jamet, P. 2007. *L'éthanol cellulosique entre incertitudes et espoirs*. Compte rendu du « Cellulosic Ethanol Summit ». Ambassade de France aux États-Unis. Washington, DC. Novembre. www.econologie.com/biocarburant-l-ethanol-cellulosique-entre-incertitudes-et-espoirs-nouvelle-3682.html .
- Labrecque, M. et T.I. Teodorescu. 2004. *La culture intensive de saules en courtes rotations* (CICR). Institut de recherche en biologie végétale. Jardin botanique de Montréal. Document non publié.
- Labrecque, M. et T.I. Teodorescu. 2003. *High biomass yield achieved by Salix clones in SRIC following two 3-year coppice rotations on abandoned farmland in southern Quebec, Canada*. *Biomass and Bioenergy* 25: 135-146.
- Mae-Wan, H. 2006. *Ethanol from cellulose biomass not sustainable nor environmentally benign*. Institute of Science in Society Press Release. 15 mars.
- MAPAQ. 2007. *Budget foin de panic érigé en semis pur*. Guy Beauregard, Louis Robert et Pierre Dufort. Adapté par Xavier Desmeules et David Crowley, Agrinova. Non publié.
- Martel, H. Novembre 2007 et février 2008. Communications personnelles. MAPAQ. Xavier Desmeules. Agrinova.
- Pimentel, D. et T.W. Patzek. 2005. *Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower*. *Natural Resources Research* 14(1): 65-76.

La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique

- Renaud, R. 2007. *Nouvelle Chaire de recherche en éthanol cellulosique*. Université de Sherbrooke. 14 juin. www.usherbrooke.ca/liaison_vol41/n19/a_ethanol.html .
- Renewable Fuel Association. *Cellulosic ethanol*. www.ethanolrfa.org/resource/cellulosic/ .
- Ressources naturelles Canada. 2006. *L'éthanol, un carburant écologique d'avenir*. Octobre. http://oee.nrcan.gc.ca/publications/infosource/pub/lescarburants/ethanol/M92_257_2003.cfm .
- Revenu Québec. *Crédit d'impôt pour la production d'éthanol*. www.revenu.gouv.qc.ca/fr/entreprise/impot/credits/ressources/ethanol.asp .
- Samson, R. 2007. *La bioénergie : opportunités croissantes pour le secteur agricole*. REAP-Canada. Présentation PowerPoint. Non publié.
- Samson, R. 2006. *Biomass energy alternatives from energy crop farming in Canada*. REAP-Canada. Présentation PowerPoint. www.reap-canada.com/library.htm .
- Samson, R. [non daté]. *Sources d'énergie de biomasse pour le chauffage en serriculture*. REAP-Canada. Présentation PowerPoint. www.agrireseau.qc.ca/horticulture-serre/documents/HullCQVBBioenergie_samson.pdf .
- Samson, R., P. Duxbury et L. Mulkins. 2000. *Assessment of pelletized biofuels*. REAP-Canada. www.reap-canada.com/library.htm .
- Samson, R., P. Duxbury et L. Mulkins. 2000. *Research and development of fibre crops in cool season regions of Canada*. REAP-Canada. www.reap-canada.com/library.htm .
- Samson, R., S.B. Stamler, J. Dooper, S. Mulder, T. Ingram, K. Clark et C. Ho Lem. 2008. *Analysing Ontario biofuel options: Greenhouse gas mitigation efficiency and costs*. Final Report. Biocap Foundation. www.reap-canada.com/library.htm .
- Sirois, G. 2000. *Étude sur la culture d'essences à croissance rapide*. Rapport final. SADC de Charlevoix.
- USDA. 2007 *Farm Bills proposals*. Tiré de J.-P. Sirois, BioClips. *Le point sur le développement de l'éthanol*. Volume 10, numéro 3. Septembre.
- Welke, S. 2006. *L'éthanol de bois au Canada : Les technologies de production, les sources de produits forestiers et les incitatifs politiques*. Réseau de gestion durable des forêts. Note de recherche. N° 22. 6 p.
- Welke, S. 2006. *Les plantations dans le but de produire de l'éthanol de bois et leurs implications sur l'aménagement durable des forêts*. Réseau de gestion durable des forêts. Note de recherche. N° 23. 6 p.
- Wowogno, K. 2005. *Canada : Premier parc de véhicules à utiliser l'éthanol cellulosique*. Médiaterre International. 13 janvier. www.mediaterre.org/international/actu,20050113110637.html .