

RPBQ

Bien plus que des plantes

CÉROM
Centre de recherche sur les grains inc.

Réseau des plantes bio-industrielles du Québec

RÉSEAU DES PLANTES BIO-INDUSTRIELLES

Rapport final 2017-2018



Rédaction du rapport

Snizhana Olishevskaya, Ph.D.

Coordonnatrice du Réseau des plantes bio-industrielles du Québec,
Centre de recherche sur les grains inc. (CÉROM)

Coordonnatrice de l'atelier des graminées pérennes

Huguette Martel, agr.

Conseillère en plantes fourragères et plantes pérennes à des fins bio-industrielles, MAPAQ-Estrie

Coordonnateur de l'atelier des saules à croissance rapide :

Michel Labrecque, Professeur

Institut de recherche en biologie végétale (IRBV)

Principaux collaborateurs

Alice Chagnon, Conseillère en développement des entreprises agroalimentaires

Centre local de développement Abitibi

Anne Vanasse, Professeure

Université Laval

Annie Claessens, Chercheuse

Agriculture et Agroalimentaire Canada

Benoît Lafleur, Professeur

Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Céline Georlette, Chercheuse

Centre de développement bioalimentaire du Québec Inc.

Gilles Bélanger, Chercheur

Agriculture et Agroalimentaire Canada

Julie Lajeunesse, Chercheuse

Agriculture et Agroalimentaire Canada

Marjolaine Bernier-Leduc, agr.

MAPAQ-Gaspésie

Philippe Séguin, Professeur

Université McGill

Robert Langlois, Contremaître

Pépinière municipale, Ville de Boisbriand

Roger Samson, Directeur

R.E.A.P.-Canada

Responsable de l'institution de recherche

Pierre Fréchette

Directeur général par intérim,
Centre de recherche sur les grains inc. (CÉROM)

Centre de recherche sur les grains inc. (CÉROM)

740, chemin Trudeau, Saint-Mathieu-de-Beloeil (Québec) CANADA, J3G 0E2

Tél. : 450 464-2715

Télec. : 450 464-8767

www.cerom.qc.ca

Le rapport peut être cité comme suit :

Olishevskaya S. 2018. Rapport final des activités 2017-2018 du Réseau des Plantes Bio-industrielles du Québec (RPBQ). CÉROM. Saint-Mathieu-de-Beloeil, QC. 41 pages.

La réalisation des activités du RPBQ présentées dans ce rapport est soutenue financièrement par le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ)

**Agriculture, Pêcheries
et Alimentation**

Québec 

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|----|
| INTRODUCTION | 4 |
| EXPLORATION DU MARCHÉ POTENTIEL POUR LA BIOMASSE AGRICOLE | 5 |
| Filière agroalimentaire | 5 |
| Filière environnementale | 7 |
| Filière des produits bioraffinés | 8 |
| Biocarburants | 9 |
| Biomatériaux | 18 |
| Produits chimiques biosourcés à haute valeur ajoutée | 20 |
| SOMMAIRE DES ACTIVITÉS 2017 | 25 |
| Atelier saule à croissance rapide | 25 |
| Atelier graminées pérennes | 29 |
| Panic érigé | 29 |
| Semis 2011 | 29 |
| Semis 2012 | 31 |
| Semis 2015 | 33 |
| Semis 2016 | 34 |
| Miscanthus géant | 35 |
| Semis 2011 | 35 |
| Stratford | 37 |
| Semis 2010 | 37 |
| CONCLUSIONS | 38 |
| RÉFÉRENCES | 39 |

INTRODUCTION

En 2010, le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) a créé un réseau d'essais et de développement de diverses cultures à fort potentiel bio-industriel sur le territoire québécois, le Réseau des plantes bio-industrielles du Québec (RPBQ). De 2010 à 2017, différentes cultures telles les graminées pérennes, les graminées annuelles, le triticale, le chanvre, le lin et le saule à croissance rapide ont été évalués. Parmi ces cultures, le saule à croissance rapide (SCR) et les graminées pérennes telles que le panic érigé (PE) et le miscanthus géant (MG) représentent un intérêt particulier en raison de leur bon potentiel de rendement et leur aspect vivace.

Différentes utilisations ont été envisagées pour ces cultures. Parmi celles-ci, les biomatériaux, les produits biosourcés, les biocarburants et les biocombustibles. Car contrairement aux combustibles fossiles, la bioénergie n'entraîne pas nécessairement la production supplémentaire de gaz à effet de serre (GES) atmosphérique puisque la production de cette biomasse est issue de l'utilisation du CO₂ atmosphérique grâce à la photosynthèse. Par conséquent, les biocarburants et biocombustibles solides issus de la biomasse cultivée sur des terres agricoles marginales et abandonnées présentent un bilan neutre en ce qui concerne les émissions en dioxyde de carbone. Si ces énergies renouvelables permettent de remplacer des énergies fossiles, le bilan devient positif.

Le PE, graminée pérenne, suscite un intérêt pour la production de biomatériaux et de bioénergie en raison de sa productivité moyenne à élevée, de sa pérennité, de son efficacité dans l'utilisation de l'eau et des nutriments et de leur adaptation aux conditions climatiques du Québec et de l'Ontario¹. 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 paillis, des pâtes à papier ou des isolants pour les maisons. Par leur enracinement profond et la densité de leurs tiges, ces graminées pourraient servir à la protection des bandes riveraines et à la réhabilitation des terrains contaminés².

Des SCR peuvent présenter des rendements pouvant dépasser les 15 tonnes sèches par hectare par année³. De plus, l'utilisation des SCR ainsi que du PE et du MG a une incidence positive sur la conservation et la restauration des écosystèmes, la fixation du gaz carbonique, la diversification des habitats fauniques et la beauté des paysages.

Dans cette optique, ce rapport présente l'analyse des diverses filières potentiellement intéressantes pour valoriser la biomasse agricole du PE, du MG et du SCR ainsi que l'évolution des rendements moyens de ces espèces cultivées dans les différentes régions du Québec durant les cinq dernières années.

EXPLORATION DU MARCHÉ POTENTIEL POUR LA BIOMASSE AGRICOLE

Le développement d'une chaîne de valeur est nécessaire au succès de futurs projets de valorisation de la biomasse. Le RPBQ explore le marché, les technologies disponibles ainsi que les principales contraintes afin de déployer des chaînes de valeur qui permettraient aux entreprises québécoises, producteurs et transformateurs, de profiter de ces opportunités émergentes dans le domaine du bioraffinage (biocarburants, biomatériaux et produits chimiques biosourcés) et de la bioéconomie⁴.

Dans ce contexte, les producteurs agricoles sont des acteurs de premier plan dans l'approvisionnement de la biomasse pour la production de biocarburants et de bioproduits dans un cadre d'agriculture durable.

Les marchés potentiels pour la biomasse agricole au Québec touchent plusieurs filières telles que la filière agroalimentaire (production agricole, transformation alimentaire, bio-ingrédient, etc.), la filière environnementale (bioremédiation ou phytoremédiation, valorisation des résidus, biocapteurs) et la plus grande filière des produits bioraffinés (biocarburants, biocombustibles solides, produits biosourcés, biomatériaux, etc.) (Figure 1).

La filière agroalimentaire présente une des filières les plus étudiées pour le PE et le SCR.

Filière agroalimentaire

Dans un contexte de production accrue de maïs et de soya, les statistiques démontrent une diminution des superficies ensemencées en céréales. Par conséquent, il y avait la diminution de la disponibilité de la paille de céréales a été observée pour des utilisations agricoles comme la litière et le paillis pour une protection hivernale. Plusieurs projets régionaux et une importante utilisation par les producteurs ont démontré que la paille de PE représente un bon remplacement de la paille de céréales dans la filière agroalimentaire (Tableau 1).

Les paillis de SCR, du bois raméal fragmenté (BRF) produit par Agro Énergie, sont utilisés en horticulture en tant que paillis ornemental de teinte naturelle pour l'aménagement paysager, plate-bande et jardins et en tant qu'un amendement de sol utilisé en culture biologique et jardinage en tout genre.

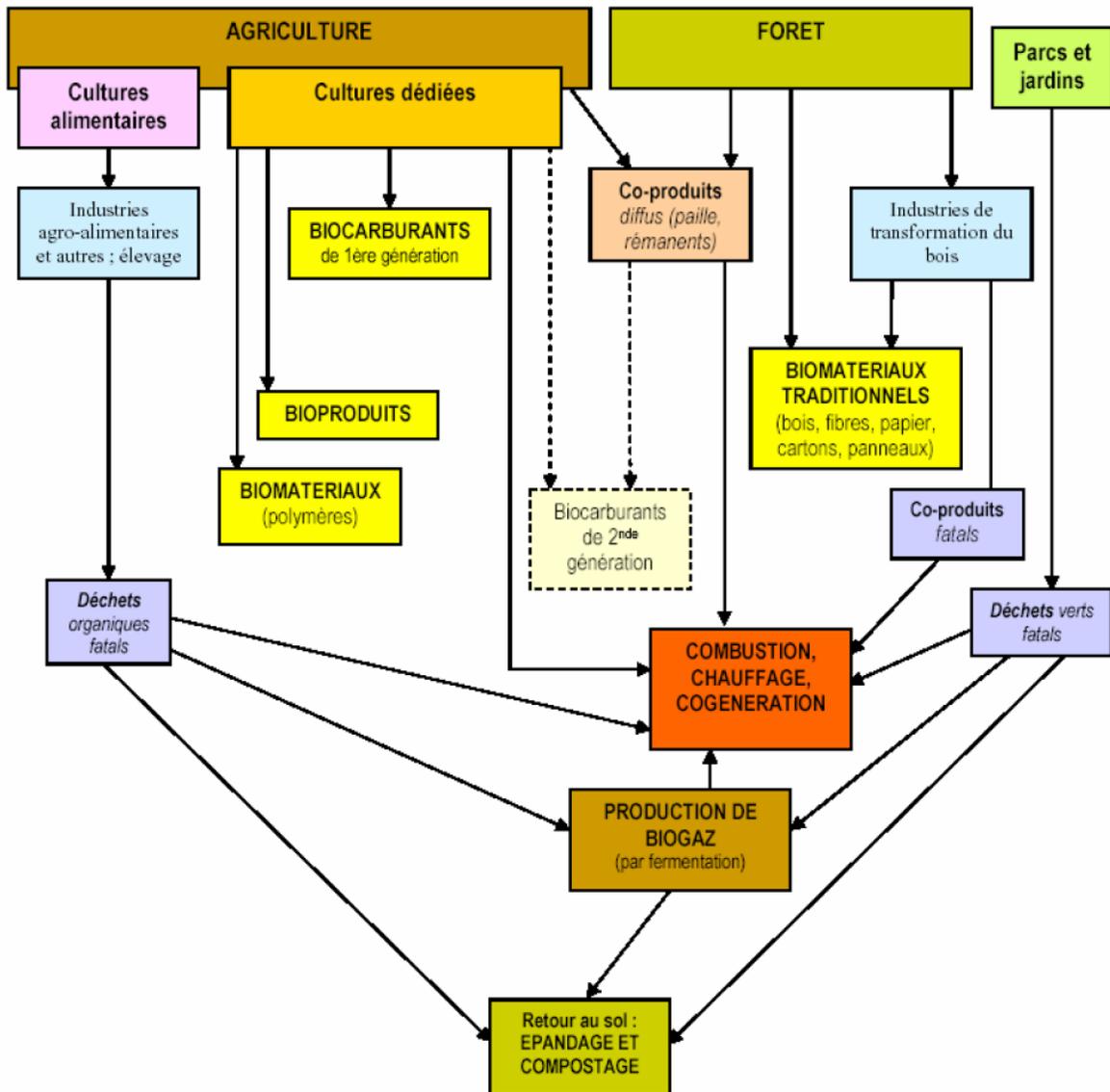


Figure 1. Les différentes filières de production de biocarburants et de bioproduits en fonction de la source de biomasse⁵.

Tableau 1. Les avantages d'application du panic érigé dans la filière agroalimentaire.

| Application | Avantage |
|---|---|
| <u>Fourrage</u> : pour les bovins (laitiers ou de boucherie) | Le panic érigé est riche en fibres (plus de 70%) et faible en potassium ce qui convient à l'alimentation pour les vaches taries. |
| <u>Litière</u> pour différents types d'animaux d'élevage : volailles, ruminants, porcs, chevaux | La paille de panic érigé est une alternative très intéressante pour une utilisation pour litière. |
| <u>Paillis</u> dans la production fruitière et légumière (ex. fraise, ail) | La capacité de protection hivernale de la paille de panic érigé se compare aux paillis de pailles de céréales. Le paillis de panic érigé contient moins de graines de mauvaises herbes que le paillis de céréales, ce qui représente un avantage très concurrentiel surtout en production biologique. Pour certaines régions, l'absence de semences de céréales dans la paille est très appréciée, car elle évite la présence de dindon sauvage dans les champs de fraises paillés. |

Il y a plusieurs aspects bénéfiques du BRF⁶ et des graminées pérennes :

- contrôle les mauvaises herbes, sans effet acidifiant sur le sol;
- prévient le gel et la sécheresse du sol;
- protège le sol de l'érosion hydrique et éolienne causée par l'eau et le vent;
- améliore la structure et la porosité du sol;
- prévient le lessivage de nutriments et facilite leur absorption par les plantes;
- facilite la lutte contre les maladies et parasites en favorisant une biodiversité au sein du sol;
- améliore à long terme la fertilité d'un sol par son effet sur la teneur d'un sol en humus.

Le PE et le SCR possèdent aussi plusieurs avantages environnementaux qui devraient être pris en considération afin d'utiliser leurs pleins potentiels pour les débouchés.

Filière environnementale

Les avantages environnementaux pendant la production du PE et du SCR sont les suivants¹⁻³ :

- phytoremédiation des eaux usées et des sols;
- stabilisation des berges;
- fixation du gaz carbonique;
- amélioration de la biodiversité des paysages agricoles;

- diversification des habitats fauniques;
- conservation et restauration des écosystèmes;
- amélioration de la structure et de la texture des sols par l'augmentation de la quantité de matière organique et la réduction de l'érosion éolienne et hydrique.

Les SCR peuvent être utilisés pour la filtration des eaux usées en retirant approximativement 90% d'azote et 85% de phosphore⁷. Ils peuvent également être utilisés pour la décontamination des sols pollués par les métaux lourds et le pétrole⁸⁻¹⁰ ou être plantés en bandes riveraines comme filtre biologique pour limiter les pertes en nutriments et pesticides qui autrement peuvent potentiellement contaminer le réseau hydrique¹¹. Plus récemment, il a été démontré que des SCR plantés densément pouvaient avoir une certaine efficacité pour retenir certains pesticides (notamment certains composés de dégradation du Mancozeb, un fongicide abondamment utilisé par les pomiculteurs, et l'atrazine, un herbicide communément utilisé pour contrôler les mauvaises herbes) qui se retrouvent dans les eaux souterraines en provenance des vergers¹².

Désirant démontrer le potentiel du saule en phytoremédiation, Agro Énergie fut l'instigatrice en 2008 d'un projet de filtration naturelle d'eaux usées par l'irrigation de cultures de saule dédiées au chauffage d'une école primaire. Depuis 2010, plus de 10 000 m³ d'eaux usées secondaires produites par la municipalité de Saint-Roch-de-l'Achigan ont été traités annuellement par ce système¹³.

La filière des produits bioraffinés à partir de la biomasse du PE et du SCR est la moins étudiée au Québec parce que cela exige beaucoup plus d'investissement dans la recherche et développement.

Filière des produits bioraffinés

Le terme de bioraffinage est couramment utilisé pour désigner l'ensemble des technologies de valorisation de la biomasse en polymères, matériaux composites, carburants et autres produits chimiques à haute valeur ajoutée.

Malgré quelques exceptions notables, la filière des produits bioraffinés est globalement au stade de développement au Québec. Si certaines technologies de valorisation ont atteint le stade de mise à l'échelle en usine pilote, plusieurs sont toujours confinées au laboratoire en attente des investissements nécessaires à leur développement.

Toutefois, l'évolution des prix de l'or noir au cours de la dernière décennie et la croissance anticipée de la demande mondiale permet d'espérer à l'atteinte de la rentabilité dans un proche avenir. À l'avènement de cette nouvelle révolution industrielle, plusieurs analystes de l'industrie estiment que

l'accès à une source fiable de biomasse de qualité homogène constituera un facteur déterminant dans la capacité des promoteurs à lever les capitaux nécessaires à la commercialisation de leur technologie de bioraffinage.

Biocarburants

Parmi les produits bioraffinés, le secteur de la bioénergie est le plus grand et consiste en la production des biocarburants solides (granules, bûches compressées, copeaux) et liquide (bioéthanol, biodiesel, huiles de pyrolyse) à partir de la biomasse agricole ou forestière en remplacement des méthodes traditionnelles comme les produits pétroliers, le charbon et les combustibles nucléaires (Tableau 2).

Tableau 2. Classification des biocarburants.

| Biocarburants | | |
|--|---|---|
| Solides | Liquides | Gazeux |
| Tirés de matières premières renouvelables | Transformés de matières végétales et animales | Élaborés de méthane et de dioxyde de carbone produits par des bactéries |
| Bois de feu, charbon de bois, briquettes de bois, etc. | Bioéthanol, biodiesel, huiles de pyrolyse | Biogaz, biopropane, gaz de synthèse, etc. |

Il y a quatre générations de biocarburants qui sont classifiés en fonction de la matière utilisée pour les produire et les technologies servant à leur fabrication.

La 1^{re} génération correspond aux biocarburants provenant de plantes spécifiques et tirés de ressources destinées à l'alimentation animale ou humaine telle que les plantes sucrières (betterave à sucre), les cultures amylicées (maïs, blé, pommes de terre) et les oléagineux (graines de soya, graines de tournesol) qui sont les plus utilisés partout dans le monde depuis 2005 (Tableau 3)⁵.

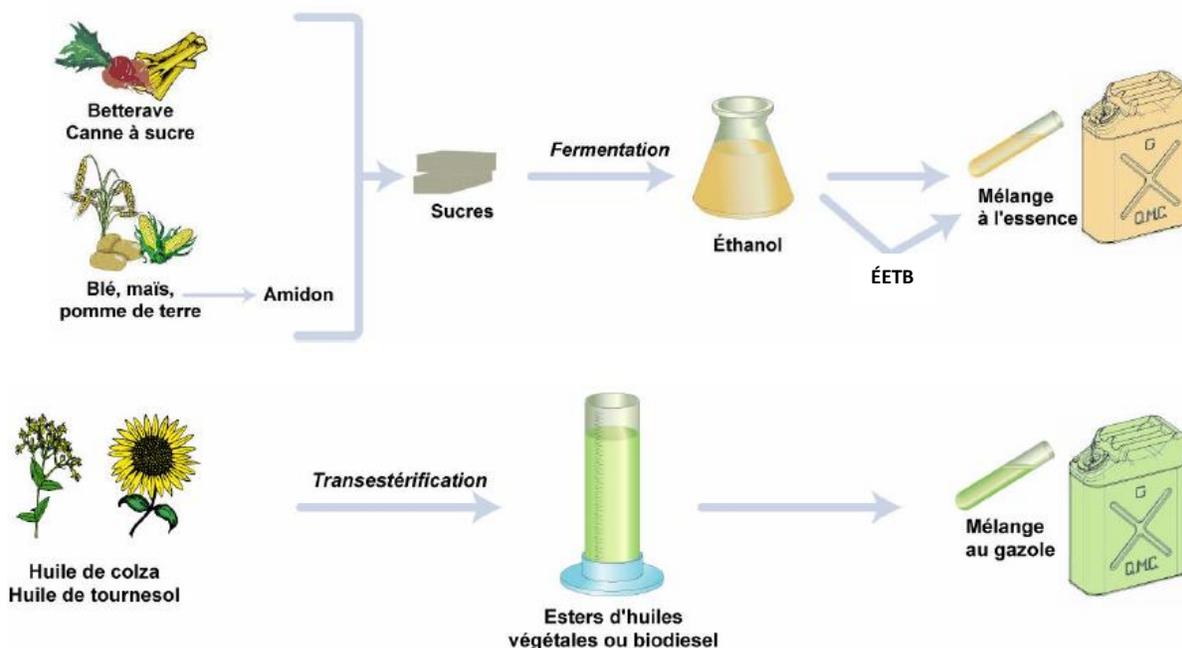
Le procédé de production des biocarburants de la 1^{re} génération consiste en plusieurs étapes (Figure 2):

- hydrolyse enzymatique de la biomasse agricole riche en sucre, suivi par la fermentation du glucose en éthanol qui sera mélangé à l'essence (bioéthanol);
- transestérification de la biomasse agricole riche en huile afin d'obtenir les esters d'huiles végétales (biodiesel) qui pourraient être mélangés à l'essence.

Tableau 3. Production de biocarburants par les principaux pays producteurs⁵.

| Pays/ Province | Année | Matière première | Biocarburant | Volume produit | Prévisions de production |
|-------------------|-------|---|----------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Brésil | 2007 | Canne à sucre | Éthanol | 21 MM litres | |
| Canada | 2007 | Blé, maïs | Éthanol | 840 M litres | 2010: 3,1 MM litres |
| États-Unis | 2006 | Maïs | Éthanol | 19 MM litres | 2009 : 39 MM litres |
| Europe | 2005 | Oléagineux, Céréales | Biodiesel Éthanol | 3,2 MM litres 730 M litres | 2016 : 6,7 MM litres |
| Québec | 2007 | Gras animal et huiles recyclées, maïs | Biodiesel Éthanol | 35 M litres 120 M litres | |

M : million, MM : milliard



*ETBE : *éther éthyle tertiobutyle*

Figure 2. Procédé de fabrication des biocarburants de la 1^{re} génération.

<http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/memoire/2013/biocarburant-microalgue.htm>

Au Québec, en 2007, l'usine Greenfield a été construite à Varennes afin de produire le biocarburant de 1^{re} génération, le bioéthanol à partir de grain de maïs-grain. Cette usine utilise annuellement 350 000 tonnes de maïs, environ 10% de la production québécoise, afin de produire un tiers d'éthanol, un tiers de drêche qui est retournée aux éleveurs, et un tiers de CO₂ utilisé dans les bouteilles de boisson gazeuse ou sous forme de glace sèche employée pour enfumer les scènes d'artistes^{14, 15}.

Les données plus récentes démontrent que dans le monde l'éthanol est produit principalement à partir du maïs et de la canne à sucre, tandis que le biodiésel l'est à partir d'huile végétale et de déchets (Figure 3)¹⁶.

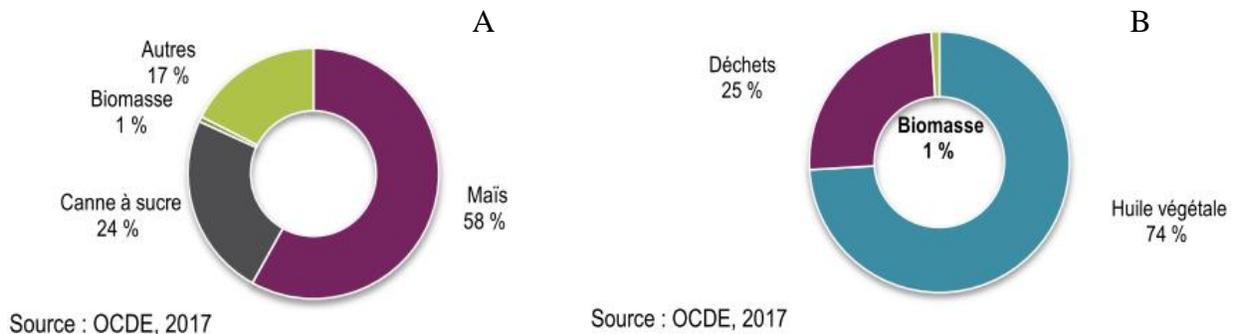


Figure 3. Production mondiale d'éthanol (A) et de biodiésel (B) en 2016¹⁶.

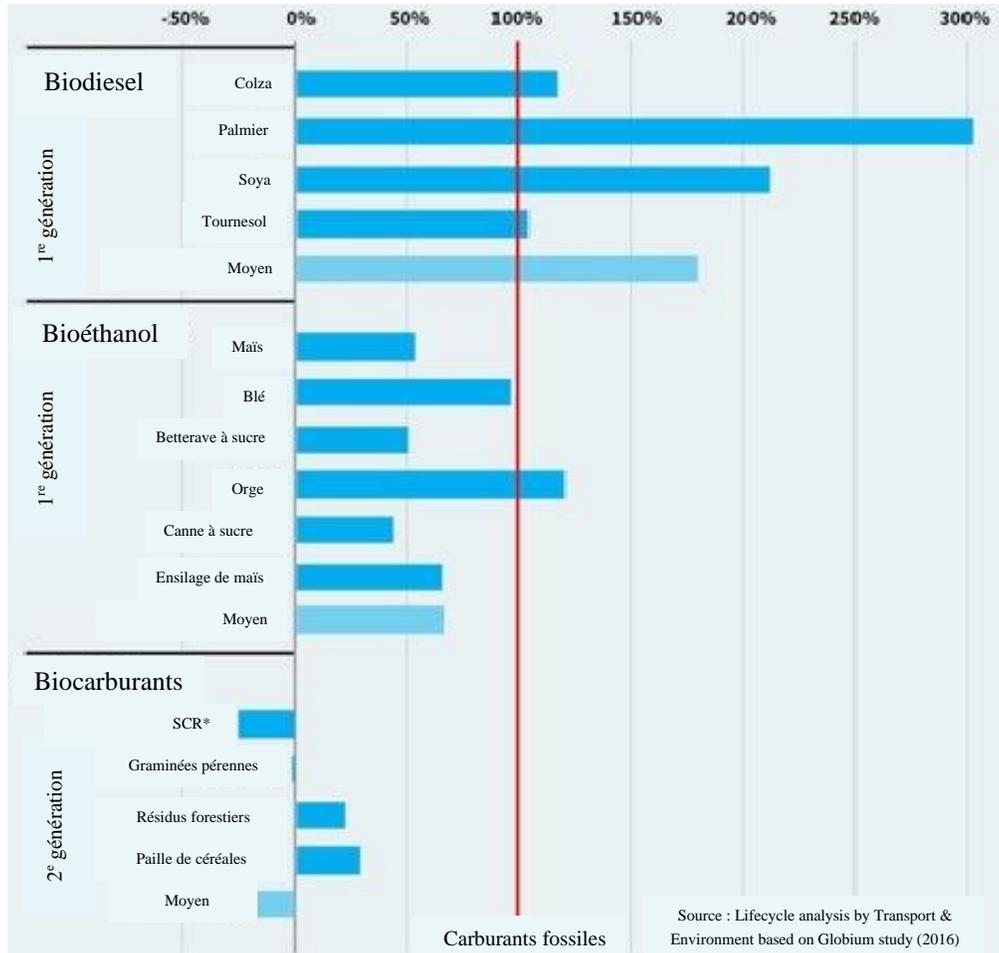
https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/Bioclips2017/Volume_25_no30.pdf

Depuis décembre 2010, selon la réglementation fédérale, le parc automobile canadien, y compris celui du Québec, devrait rouler avec un mélange E5 (5% d'éthanol et 95% d'essence). Selon le Directeur général de l'usine Éthanol Greenfield, Monsieur Jean Roberge, « Cette décision est une catastrophe » parce que pour être conforme à la norme fédérale, il faudrait produire, selon les calculs de M. Roberge, environ 450 millions de litres de bioéthanol, tandis qu'au Québec, seulement 160 millions de litres d'éthanol à base de maïs sont produits et 250 millions doivent être importés du Midwest américain¹⁷.

L'usine de Varenne est efficace, mais elle produit seulement le tiers des besoins en éthanol de la province. De plus, pour éviter la tenace controverse « carburant contre nourriture » et avoir une meilleure empreinte écologique, près de 60% du biocarburant devrait être fabriqué avec d'autres composantes que l'amidon de maïs¹⁷.

De plus, une étude de l'organisation non gouvernementale (ONG) européenne Transport & Environnement a récemment démontrée que les biocarburants de 1^{re} génération (ou agrocarburants), apparus d'abord comme une alternative prometteuse au pétrole dans les transports, émettent en fait plus de GES que les combustibles fossiles (essence ou diesel), tandis que les biocarburants de 2^e génération sont censés remédier, à l'avenir, à ce problème (Figure 4)¹⁸. En outre, l'organisation de coopération et de développement économique (OCDE) indique que les États-Unis ainsi que l'Union européenne fixent certains seuils de production d'éthanol fait à base de denrées agricoles pour limiter les effets négatifs sur l'environnement et la pression sur les prix des céréales¹⁷. Ainsi, l'Organisation des Nations Unies recommande d'éviter l'utilisation des matières premières destinées à l'alimentation animale ou humaine lors du choix de la culture pour la production de bioéthanol. Donc, pour améliorer le bilan des

GES de l'éthanol fabriqué à l'aide du maïs, la recherche a été orientée sur la production d'éthanol valorisant la matière lignocellulosique, couramment appelé éthanol cellulosique et dite de 2^e génération^{17, 18}.



*SCR : saule à croissance rapide

Figure 4. Les émissions de biocarburants (%) versus les émissions de carburants fossiles (100%)*

https://www.lemonde.fr/energies/article/2016/04/28/les-biocarburants-emettent-plus-de-co2-que-l-essence-et-le-diesel_4910371_1653054.html

Les biocarburants de 2^e génération sont fabriqués à partir de ressources lignocellulosiques provenant 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) (Figure 5). Au Québec, il n'y a pas beaucoup de biomasses résiduelles valorisables pour la bioénergie. On manque de paille, car les résidus issus du nettoyage des grains vont à l'alimentation des animaux. Il reste donc les résidus de produits forestiers et, selon les régions, même les résidus forestiers peuvent être limités. Donc, le PE, le MG et le SCR sont les cultures les plus disponibles pour la production des

biocarburants de 2^e génération. De plus, la politique québécoise sur la gestion des matières résiduelles favorise la production des biocarburants de 2^e génération^{15, 19}.



*TCR Saule : Taillis à courte rotation de saule à croissance rapide

Figure 5. Substrats lignocellulosiques pour la production de biocarburant de 2^e génération.

<http://www.enea-consulting.com/wp-content/uploads/2015/06/ENEAConsultingConfC3A9renceAlgoR%C3A9soEclairageinternational-et-tendances-de-la-fili%C3A8re-microalgues.pdf>

Le processus de fabrication de bioéthanol à partir de matière lignocellulosique est très complexe, car la cellulose doit d’abord être décomposée en molécules fermentescibles (glucose) pour être transformée par la suite en éthanol. Or, les longues chaînes de molécules de glucose qui composent la cellulose sont encapsulées par de la lignine, une matière très résistante et difficilement dégradable. La matière première (fibres) devrait tout d’abord être prétraitée par un procédé de défibrage à explosion de vapeur (vapocraquage). Cette étape permet d’accroître la surface spécifique afin d’augmenter l’accessibilité des fibres aux enzymes utilisées dans les étapes suivantes du procédé: hydrolyse enzymatique (effectué par les enzymes produites principalement par les mycètes), séparation des composants, fermentation du glucose en absence d’air par les levures, distillation, déshydratation².

Le contenu en cellulose de la plante est le facteur le plus déterminant pour estimer le rendement potentiel en éthanol. 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. À l'opposé, plus une plante contient des taux élevés en lignine, moins elle contient de cellulose, ce que diminue la quantité de la production d'éthanol. Le tableau 4 présente différentes sources de la biomasse lignocellulosique et leurs compositions potentielles pour la production de biocarburants.

Tableau 4. Sources et compositions potentielles de biomasse lignocellulosique (% poids sec)²⁰.

| Matières premières | Hémicelluloses | Celluloses | Lignines | Autres (<i>i. e.</i>, cendre) |
|---------------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|--------------------------------------|
| Résidus agricoles | 25-50 | 37-50 | 5-15 | 12-16 |
| Bois dur | 25-40 | 45-47 | 20-25 | 0.80 |
| Bois mou | 25-29 | 40-45 | 30-60 | 0.50 |
| Herbes | 35-50 | 25-40 | – | 2-5 |
| Boues de papeteries | 12-20 | 50-70 | 6-10 | 2 |
| Journaux | 25-40 | 40-55 | 18-30 | 5-8 |
| Panic érigé | 30-35 | 40-45 | 12 | 4-5 |

« – » absent ou non disponible

Étant donné que la lignine est une molécule dont le précurseur est la phénylalanine qui est connue comme inhibiteur de la fermentation, il serait préférable de choisir la biomasse avec le taux de cellulose le plus élevé et avec un contenu minimal (5-15%) de lignine pour la production de biocarburant de la 2^e génération à partir de la matière lignocellulosique. Selon le tableau 4, le meilleur substrat pour la production de biocarburant de la 2^e génération est soit les résidus de cultures agricoles, soit la biomasse du PE.

Bien que les cultures dédiées aient beaucoup d'avantages par rapport aux autres cultures pour la production des biocarburants de la 2^e génération, la production de bioéthanol et de biodiesel à partir de la biomasse agricole, tel que le maïs, est encore populaire parce que la production des biocarburants de la 2^e génération coûte trois fois plus cher que les usines de la filière classique éthanol-maïs (Tableau 5).

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 cellulose². De plus, les puissants acteurs comme Shell ou DuPont préfèrent investir en Amérique du Sud plutôt qu'en Amérique du Nord parce que les investisseurs misent sur une technologie éprouvée¹⁴.

Tableau 5. Comparaison de certains éléments de coût de production de l'éthanol à partir de matière sèche cellulosique et de maïs^{2, 21}.

| | 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 |

De surcroît, l'énergie électrique et l'électrification des transports se développent beaucoup plus rapidement, surtout au Québec, en raison du coût de l'électricité abordable (Tableau 6).

Tableau 6. Comparaison de développement des biocarburants et de l'énergie électrique.

| Critérium | Biocarburants | Énergie électrique |
|----------------------------|--|--|
| Processus de développement | Long et compliqué (depuis 20 ans), encore au stade R&D | L'énergie électrique et l'électrification des transports se développent rapidement |
| Potentiel de développement | Réduit par rapport aux années 1970, vu que le prix du pétrole a fortement diminué en 2014 ¹⁶ | Augmenté, en raison du coût de l'électricité abordable |
| Produits sur le marché | On ne peut pas dépasser plus de 5% d'ajout d'éthanol à l'essence. Il corrompt la tuyauterie ⁶ . | Les véhicules électriques sont déjà sur le marché |

Il y a beaucoup de véhicules entièrement électriques déjà présents sur le marché; BMW i3, Chevrolet Bolt, Chevrolet Spark EV, Ford Focus Électrique, Hyundai IONIQ électrique, Kia Soul EV, Mitsubishi i-MiEV, Nissan Leaf, Smart fortwo Electric Drive, Volkswagen e-Golf, Tesla (Model S - 100 D, S - 60 D, S - 75 D, S - 90 D, X - 100 D, X - 70 D, X - 75 D).

Malgré ces enjeux, il y a plusieurs projets pilotes chez des entreprises comme Enerkem et CRB Innovations situées au Québec et qui sont en train d'explorer la possibilité de production de bioéthanol ou de biodiesel à partir de la biomasse de cultures dédiées.

Éthanol Cellulosique Varennes (QC, Canada) est une entreprise, ayant Enerkem comme actionnaire unique, visant une future usine de production de bioéthanol en partant de 100,000 tonnes métriques de déchets non recyclables riches en matière lignocellulosique. L'usine sera située sur un site adjacent à l'actuelle usine d'éthanol de première génération de GreenField. Le lancement de la construction est prévu en 2018²². La future usine sera construite en deux phases. La première phase permettra la production de biométhane dès la mise en service de l'établissement. La deuxième phase permettra de convertir le biométhane en bioéthanol dont une grande partie sera cellulosique. L'usine devrait permettre de produire 38 millions de litres d'éthanol cellulosique annuellement. Enerkem estime que ce projet permettra de réduire de 110 000 tonnes par année les émissions de GES. De plus, cela aura pour avantage de diminuer la dépendance au pétrole et de réduire l'importation d'essence de 33 millions de litres par années. La technologie est déjà déployée en Alberta, où Enerkem possède une usine de capacité similaire à celle étant conçue pour Varennes, produit du gaz de synthèse à partir des résidus solides ultimes après tri et séparation¹⁷.

Étant donné que les prix des déchets municipaux et industriels ainsi que des résidus d'agriculture et forestiers seront moins élevés que les prix des cultures dédiées, y compris leurs régies et leur transport, la production des biocarburants de la 2^e génération à partir de PE et de SCR reste encore un marché à long terme. Donc, à court terme, la biomasse de ces cultures pourrait être utilisée pour la production de biocombustible plutôt solide sous forme de granule (PE) ou de bûches compressées, et de copeaux (SCR) que pour la production de bioéthanol.

Il y a plusieurs entreprises québécoises qui fabriquent les granules à partir de la biomasse ainsi que des fabricants de chaudières pour le chauffage à la biomasse forestière (Tableau 7).

Au Québec, le SCR constitue une avenue potentielle de valorisation pour les quelques centaines de milliers d'hectares de terres agricoles actuellement sous-utilisées ou en friches. Avec une balance énergétique à la ferme pouvant atteindre 55 unités d'énergie produites par unité d'énergie consommée, le bois de saule permet à ses utilisateurs de se protéger à long terme contre la volatilité des prix des énergies fossiles ainsi que de minimiser la variation des paramètres pouvant affecter la performance d'une chaudière (composition des cendres, taux d'humidité, présence de contaminants, granulométrie, etc.)¹³. Le remplacement de combustibles fossiles par le chauffage au bois du saule constitue l'une des stratégies les plus efficaces pour réduction des émissions de GES (Figure 6).

Tableau 7. Les entreprises québécoises, fabricantes des biocombustibles et des chaudières à biomasse.

| BIOCOMBUSTIBLES | | CHAUDIÈRES À BIOMASSE | |
|---|---|--------------------------|---|
| Airex Énergie | production de granules torréfiés à partir de la biomasse forestière (biocharbon) | Biofour | chauffage à la biomasse et aux résidus |
| Pyrovac inc. | production de granules torréfiées (biocharbon) à partir de résidus de biomasse forestière | Combustion Expert | chauffage à la biomasse |
| Energex | fabricant de granules écoénergétiques | Compte Fournier | chauffage à la biomasse |
| Granules LG | fabricant de granules écoénergétiques | Combustion idéal | chauffage à la biomasse pour applications industrielles et commerciales |
| Lauzon bois énergétique recyclé inc. | fabricant de granules écoénergétiques | | |
| Therméal | production de briquettes énergétiques (Pyro-Bloc) | | |
| Trebio | fabricant de granules écoénergétiques | | |

Selon l'entreprise Agro Énergie, le chauffage de bâtiments au bois de saule implique un approvisionnement de proximité (< 100 km), permettant de réduire significativement l'exportation des dollars énergétiques tout en stimulant la création d'emplois locaux durables¹³.

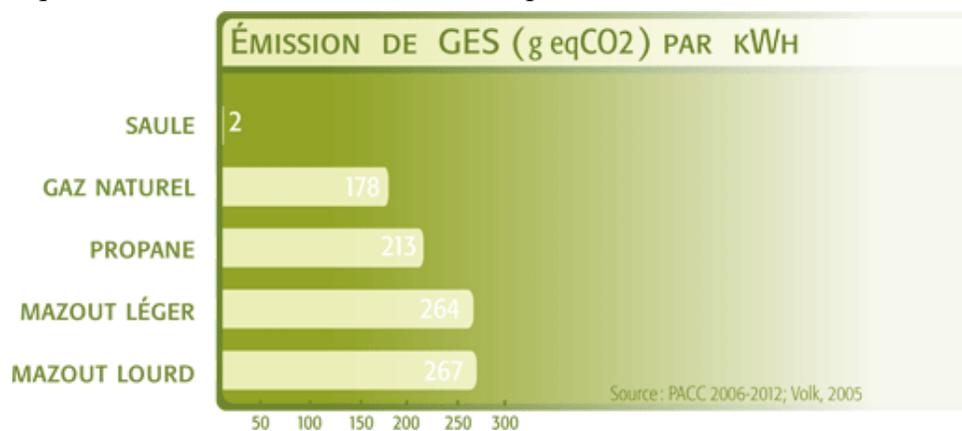


Figure 6. Émission de gaz à effet de serre (GES) produit par les différentes sources d'énergie.

<http://agroenergie.ca/le-saule-et-le-developpement-durable/le-saule-un-levier-de-developpement-durable-en-region>

En même temps, il y a certains désavantages à l'utilisation du SCR pour la production de bioénergie en grande échelle:

- manque d'expertise,
- manque d'aide gouvernementale,
- prix élevé de la biomasse,
- manque d'usines de transformation.

L'investissement pour la production du SCR reste encore très élevé. Le saule est une culture difficile à rendre économiquement viable, en raison du contexte énergétique peu favorable. De ce fait, il est primordial d'explorer tous les autres débouchés qu'offre le SCR ainsi que le PE. Il faudra fabriquer aussi une gamme de produits rentables à base de chimie verte : bioplastiques, teintures naturelles, produits de beauté, en passant par des matériaux d'emballage, des mousses isolantes, etc. Toutefois, le potentiel de production est énorme considérant la grande quantité de terres marginales disponibles à travers le Québec.

Il y a aussi un autre frein dans la chaîne de valeur du bioraffinage. Selon Patrick Girouard de La Coop fédérée, c'est la complexité de l'approvisionnement en biomasse. Il faut créer des liens avec les producteurs agricoles, convenir du niveau de qualité de la matière première requise par l'industriel ou les clients, et mettre en place une production et un approvisionnement fiables et réguliers. La Coop fédérée a élaboré sa stratégie 2013–2016 dans le secteur des bioproduits²³. Elle se positionne comme un leader et un acteur incontournable dans l'approvisionnement en biomasse agricole et forestière au Québec et au Canada, de la ferme à l'usine de transformation²⁴.

Parmi les produits bioraffinés, les biomatériaux représentent une avenue intéressante permettant à la fois de réduire la consommation des matières d'origine fossile et d'améliorer le bilan carbone des produits finaux.

Biomatériaux

Les biomatériaux sont les matériaux transformés qui sont issus entièrement ou partiellement de la biomasse (ex. bioplastiques, isolants, dérivés de la cellulose, agromatériaux, biocomposites, etc.). Bien que les perspectives liées à l'utilisation du PE dans les biomatériaux soient nombreuses, il existe pour le moment peu d'applications commerciales au Canada. La taille du marché des biocomposites de fibres naturelles était estimée à une valeur de 2,89 millions de dollars en 2013 et devrait atteindre 5,83 millions de dollars en 2019⁴.

Des coproduits peuvent aussi être développés avec des fibres de cultures énergétiques, comme la production de pâte mécanique pour le développement de produits thermomoulés recyclables et/ou biodégradables (les contenants pour semences, lessive, coin de protection pour les meubles, etc). Une collaboration entre le Conseil Pleine Terre, la MRC de Napierville et Innofibre est aussi envisagée pour explorer la possibilité de produire un bioproduit à partir du PE pour remplacer la styromousse utilisée dans les emballages d'aliments dans les épicerie⁴.

La fabrication des éco-matériaux devient aussi de plus en plus populaire. En 2010, Agro Énergie a créé une nouvelle filiale Les Écrans Verts (<http://www.lesecransverts.ca/>) à Saint-Roch-de-l'Achigan (QC, Canada) qui se spécialise dans la fabrication d'écrans végétalisés contre la pollution sonore et visuelle. Ces murs végétalisés ont une plus grande capacité antibruit même s'ils sont dénudés en hiver. Les tiges de saules en forme de palissade exigent un entretien simple. En 2017, Agro Énergie a installé 3,8 km d'écrans et l'entreprise estime avoir 40% de croissance annuelle pour les prochaines années.

Naturefibres est la première entreprise en Amérique du Nord à se spécialiser dans la production d'éco-matériaux, notamment des isolants, des panneaux acoustiques et du béton, le tout à partir de chanvre industriel²⁵. L'entreprise va recevoir environ 2,5 millions de dollars d'aide de Québec et de la MRC des Sources (région de l'Estrie) afin d'installer un bâtiment dans l'ancien parc industriel de la mine Jeffrey. De plus, Naturefibres prévoit cultiver le chanvre dans la région pour faire une diminution du coût d'approvisionnement de la biomasse.

Dans cette optique, il est possible d'envisager que les fibres du PE peuvent être aussi utilisées en tant qu'ajout aux autres matériaux de construction, mais tout d'abord cela devrait être confirmé par l'analyse de la biomasse et le projet pilote.

Bien que le béton contenant les fibres de chanvre possède des performances thermiques et acoustiques, son utilisation est limitée à cause d'un manque de la garantie concernant sa durabilité. Le vieillissement du béton contenant des fibres du chanvre industriel induit la porosité du matériel ainsi que la diminution de la densité du squelette. De plus, les fibres de chanvre sont une bonne source de carbone pour le développement des moisissures lorsque la température avoisine 28°C, que l'humidité relative est élevée (90%) et que le pH est neutre²⁴.

L'activité d'eau est un des facteurs importants pour le développement des moisissures sur les biomatériaux. Certaines espèces de champignons (*Aspergillus niger*, *Penicillium brevicompactum*) peuvent se propager avec une faible activité d'eau ($A_w < 0.8$), ou encore quand l'humidité augmente ($0,8 < A_w < 0,9$) *Clostridium sphaerospermum* peut se développer. D'autres espèces peuvent aussi

contaminer les substrats mouillés ($A_w > 0,9$). Les bactéries peuvent aussi contaminer le béton et former des colonies avec les cellules agglutinées dans le gel (biofilm)²⁶.

La colonisation du béton par les moisissures induit sa biodégradation par deux mécanismes :

- par action physique due au développement des hyphes des champignons qui mène aux ruptures;
- une action chimique due à la production des divers métabolites, surtout les acides organiques tels que les acides gluconique, oxalique, citrique, qui causent de la lixiviation des éléments structurels du béton (Ca, Si, Fe, Al)^{26, 27}.

Le développement des microorganismes, surtout des moisissures, a créé un véritable obstacle pour l'utilisation large des matériaux biosourcés. La présence des fibres lignocellulosiques dans le béton et l'humidité de matériel élevé sont des conditions très favorables pour la prolifération des microorganismes. La vérification de la résistance des matériaux biosourcés à la contamination par les moisissures et les bactéries, surtout pour les structures porteuses comme le béton et le plâtre, devrait être prise en considération avant d'être introduite sur le marché. Le rajout d'un fongicide pourrait être une solution à ce problème, mais le prix des matériaux biosourcés sera augmenté.

Ainsi, les fibres des graminées pérennes telles que le PE et le MG possèdent une perspective d'être utilisées pour la fabrication des matériaux biosourcés, mais on n'a pas encore beaucoup de recherche scientifique par rapport à ce sujet.

Une autre filière dans la bioraffinerie qui devient de plus en plus importante est la fabrication des produits ou des molécules à haute valeur ajoutés.

Produits chimiques biosourcés à haute valeur ajoutée

Les produits biosourcés sont les produits chimiques issus d'intrants biologiques est une alternative aux intrants pétroliers :

- industriels (produits chimiques et résines);
- biocosmétiques (savons, crèmes, lotions);
- pharmaceutiques (anticorps, vaccins).

La pyramide de valeur de la biomasse montre la cascade des produits à valeur ajoutée qui peuvent être produits à partir de la biomasse agricole résiduelle ou d'autres résidus ainsi que de la biomasse de graminées pérennes et de SCR (Figure 7)²⁸.

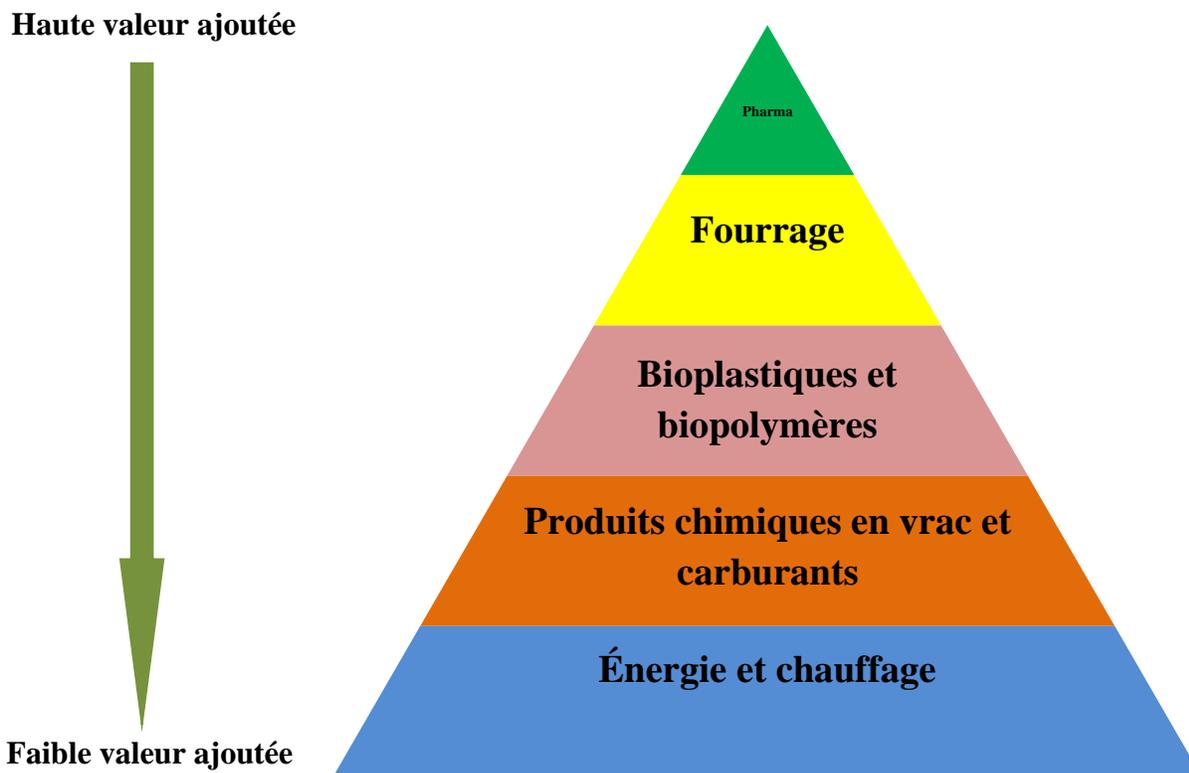


Figure 7. Pyramide de la production des produits à valeur ajoutée à partir de la biomasse²⁸.

La valeur la plus basse est atteinte en brûlant la biomasse pour le chauffage et l'électricité. Les produits à haute valeur ajoutée pourraient être fabriqués en utilisant la haute technologie et les enzymes²⁹. Parmi les produits biosourcés indiqués dans la pyramide, les produits pharmaceutiques ont la plus haute valeur ajoutée parce qu'on a besoin d'une valeur économique supplémentaire pour acquérir des biens et services à transformer au cours du processus de production.

Plusieurs produits chimiques biosourcés tels que composés phénoliques présentent un grand intérêt pharmaceutique et nutraceutique. Les nutraceutiques sont des produits alimentaires (aliments fonctionnels, suppléments) ayant des propriétés bénéfiques pour la santé, alors que les ingrédients naturels sont surtout utilisés dans les cosmétiques et les produits de soins de la peau. Selon les prévisions, le marché mondial des nutraceutiques, évalué aux environs de 198,7 milliards de dollars US en 2016, devrait progresser de 7,5% annuellement pour atteindre 285 milliards de dollars US en 2021²⁹.

Les composés phénoliques, contenus dans l'écorce de saule, sont recherchés pour leurs propriétés médicales. Dans le cadre du projet du RPBQ (CÉROM) en collaboration avec le Professeur Michel Labrecque de l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV), plusieurs composés phénoliques ont

été extraits de divers cultivars du SCR cultivés dans les différents sites du Québec (Beloeil, La Pocatière, Saint-Siméon et Saint-Roch) (Tableau 8)³⁰.

Tableau 8. Utilisation des composés phénoliques extraits du saule à croissance rapide.

| Extraits phénoliques | Propriété/Application | Rendement/Site de production de SCR²⁶ |
|---|--|---|
| Acide shikimique | Synthèse d'oséltamivir ayant un effet antiviral | 7.2 g ha ⁻¹ an ⁻¹ à Beloeil |
| Acide hydroxycinnamique et les dérivés tels que l'acide coumarique et l'acide chlorogénique | Anti-oxidante, antiplaquettaire, antitumorale, antimicrobienne, antimutagène, antimélanogénèse, anti-inflammatoire | 0.69 g ha ⁻¹ an ⁻¹ à La Pocatière |
| Acide benzoïque et les dérivés | Antifongique, antibactérienne, antimutagène et antifaucille, anti-inflammatoire et anti-oxydante | 0.31 g ha ⁻¹ an ⁻¹ à Beloeil |
| Lignans | Antifongique, antibactérienne et anti-oxydante | 0.22 g ha ⁻¹ an ⁻¹ à St-Siméon, |
| Flavonols: quercétine, kaempférol, myricétine, fisetin | Suppléments biologiques dans les produits nutraceutiques et cosmétiques | 1.45 g ha ⁻¹ an ⁻¹ à La Pocatière 0.97 g ha ⁻¹ an ⁻¹ à St-Roch |

La plupart de ces composés phénoliques possèdent une activité anti-oxydante, antifongique, antibactérienne, antimutagène, anti-inflammatoire, etc. Certains possèdent une activité antivirale. Par exemple, l'oséltamivir est un médicament antiviral produit à partir d'acide shikimique utilisé pour le traitement et la prévention des gripes A et B. Il est distribué sous la marque *Tamiflu*. Les flavonols tels que la quercétine, le kaempférol, la myricétine et le fisetin sont utilisés en tant que suppléments biologiques dans les produits nutraceutiques et cosmétiques. L'acide salicylique et acétylsalicylique (extraits du saule) peut être utilisé comme exfoliant pour le traitement des rides et ridules³⁰.

La compagnie BioAmber Inc. s'intéresse particulièrement à la production d'acide succinique à partir du xylose (un sucre C5), qui se trouve en grande quantité dans le PE, afin de fabriquer par la suite une large gamme de produits (ex. polyuréthane, peintures, adhésifs, plastiques, cosmétiques, composés pharmaceutiques, additifs alimentaires et aromatiques, etc.)⁴.

De plus, il est intéressant d'étudier le marché potentiel pour les sous-produits que l'on peut obtenir lors des procédés de la bioraffinerie, car ils peuvent avoir plusieurs valeurs afin de trouver les meilleures utilisations innovantes et durables.

La production de biocharbon par la pyrolyse est un bon exemple d'utilisation des sous-produits qu'on obtient pendant ce processus. La pyrolyse est la décomposition chimique d'un composé organique en l'absence d'oxygène et à haute température (environ 500°C).

Au Québec, il y a seulement quelques entreprises (BlueLeaf inc., Pyrovac in. et GECA Environnement) qui se spécialisent dans la production de biocharbon par la pyrolyse des résidus agricoles ou forestiers.

Le marché principal pour le biocharbon est son application en tant qu'amendement à différents types de sols dans le but d'améliorer leurs fonctions et réduire les émissions de GES. Par ailleurs, le biocharbon est un produit solide de la pyrolyse et contient beaucoup de carbone. Il peut donc remplacer le charbon fossile, la tourbe et le charbon activé dans toutes sortes d'applications et peut aussi être transformé et utilisé tel quel dans plus d'une centaine de domaines. Le coproduit du biocharbon, la biohuile, peut être utilisée pour la fortification des granules ou pour la production de biodiesel pour la machinerie et les véhicules. Tous ces produits peuvent se vendre sur le marché de l'énergie.

En résumé, le biocharbon est un outil simple, mais puissant, ayant plusieurs aspects bénéfiques :

- 1) réduction des déchets agricoles;
- 2) production d'un amendement de sol qui conserve le carbone et rend le sol plus fertile;
- 3) combat le réchauffement climatique;
- 4) production de l'énergie propre et renouvelable.

Selon le Directeur de l'entreprise Pyrovac inc. (QC, Canada), lors de la pyrolyse à partir de la biomasse agricole ou forestière, on peut obtenir 25-30% de biocharbon, 50% de bio-huile et 10-20% de phase aqueuse. Il y a aussi beaucoup de sous-produits tels que les biomolécules qui peuvent être extraites de la bio-huile et de la phase aqueuse.

Étant donné que l'acide acétique se trouve en grande quantité parmi les biomolécules trouvées dans les deux phases, l'ensemble de ces molécules porte le nom de « vinaigre de bois » (VB). Le VB, sauf l'acide acétique, contient des composées phénoliques ayant un effet antimicrobien, antifongique et insecticide³¹. Ils peuvent donc être utilisés en tant que désinfectants et biopesticides dans les hôpitaux et en agriculture. De plus, le VB contient beaucoup d'autres molécules chimiques telles que l'acétone, l'acétaldéhyde, l'allyle alcool, le furfural et les acides formique, propionique et butyrique qui pourraient être appliqués dans plusieurs domaines ou servir comme précurseur pour la production d'autres produits à haute valeur ajoutée. Le VB est aussi connu en tant qu'engrais et comme biostimulant de la croissance des plantes³¹. Ainsi, le marché pour l'utilisation du VB ou les biomolécules extraites du VB provenant de la biomasse agricole ou forestière, est très large. Actuellement, le marché du VB est très populaire au Japon et dans d'autres pays asiatiques (comme en

Thaïlande, au Cambodge et en Chine)^{31, 32}, mais il est encore au stade de développement au Canada malgré son grand potentiel. Les « VB-biopesticides » dérivés de la biomasse peuvent faire évoluer positivement la bio-industrie en agriculture au Québec. Cette filière encore méconnue en Amérique du Nord devrait prendre un essor important au cours des prochaines années.

Le fait qu'une entreprise puisse prendre en charge la biomasse entière pour produire le biocharbon et les coproduits qui pourraient être vendus selon les besoins (ex. biopesticides, biocharbon, biohuile) présente un avantage certain, ce qui peut élargir le marché potentiel pour les cultures dédiées telles que le PE, le MG et le SCR.

Malgré que ces cultures présentent un potentiel pour le développement des biocarburants de 2^e génération, certains enjeux devront être résolus avant de voir la filière de la biomasse agricole se développer de façon significative :

- manque d'expertise en transformation de la biomasse sur de plus grandes échelles;
- manque d'usines de transformation de la biomasse sur de plus grandes échelles.

Le cas échéant, les cultures énergétiques pourraient devenir, à moyen terme, une source d'approvisionnement complémentaire à la biomasse forestière résiduelle⁴. Considérant les défis posés par l'accès à la matière première de qualité et à bas prix dans un contexte où les énergies fossiles sont peu coûteuses, la filière énergétique doit miser sur l'extraction de produits à haute valeur ajoutée pour assurer sa rentabilité et soutenir ses activités de bioraffinage³³.

SOMMAIRE DES ACTIVITÉS 2017

Atelier saule à croissance rapide

En 2017, le suivi des plantations des SCR par le RPBQ consistait à évaluer la performance agronomique selon le cycle de récolte (récolte à chaque 2 ans vs récolte à chaque 3 ans) à partir de plantations déjà établi en 2011 et ayant subi un premier recépage en 2014.

Pour répondre aux objectifs de cette étude, huit sites qui présentaient des différences de climat régional ont été sélectionnés à travers le Québec (Tableau 9):

- ✓ La Morandière en Abitibi-Témiscamingue ayant un climat plus froid (température annuelle moyenne 2°C),
- ✓ Saint-Siméon en Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine et La Pocatière au Bas-Saint-Laurent soumise à un climat modéré (température annuelle moyenne 4°C),
- ✓ Boisbriand des Laurentides, Saint-Roch-de-l’Achigan de la région Lanaudière et Saint-Mathieu-de-Beloil de la région Montérégie ayant le climat plus chaud (température annuelle moyenne 6°C).

Cinq cultivars de saules, soient *Salix dasyclados* (‘SV1’), *Salix viminalis* (‘SV 5027’), *Salix miyabeana* (‘SX61’, ‘SX64’ et ‘SX67’) ont été plantés dans chacun de ces sites pour évaluer le rendement selon le cycle de récolte.

Tableau 9. Localisation et principale caractéristiques¹ climatiques des sites d’étude.

| Site | Température annuelle moyenne (°C) | Précipitation annuelle moyenne (mm) | Température moyenne M-J-J-A ² (°C) | Précipitation totale M-J-J-A ² (mm) | Degrés-jour Annuel (> 5°C) |
|----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|---|--|----------------------------|
| La Morandière | 1.2 | 918 | 14.2 | 389 | 1400 |
| Alma* | 2.3 | 887 | 15.2 | 359 | 1546 |
| St-Siméon | 2.6 | 1220 | 13.6 | 457 | 1426 |
| St-Lambert* | 4.7 | 1170 | 16.5 | 464 | 1782 |
| La Pocatière | 4.1 | 962 | 15.6 | 347 | 1641 |
| Boisbriand | 5.0 | 1064 | 16.8 | 373 | 1866 |
| St-Roch-de-l’Achigan | 5.6 | 1006 | 17.8 | 367 | 2015 |
| Beloil | 5.8 | 1046 | 17.5 | 356 | 2008 |

¹ Les données climatiques sont tirées des normales climatiques publiées par Environnement Canada pour la période 1971-2000.

² M-J-J-A : signifie Mai, Juin, Juillet et Août, et correspond à la saison de croissance.

* Site ne faisant plus partie de l’étude

La moitié des parcelles (deux blocs parmi les quatre) établies dans toutes les régions a été récoltée après un cycle de 2 ans en 2016, tandis que l'autre moitié (deux autres blocs) a été récoltée après un cycle de 3 ans en 2017.

Les rendements en biomasse ont été ramenés à une valeur annuelle en tonne sèche par hectare et les résultats obtenus selon les cultivars et les sites sont présentés à la Figure 8. Des différences significatives ont été observées selon les sites de culture ($p < 0.001$). Cependant aucune différence n'a été observée entre les cultivars qui présentaient des rendements comparables ($p = 0,372$). Il est intéressant de constater que les valeurs de rendement des saules à La Pocatière ne différaient pas significativement de celles enregistrées à Beloeil et Boisbriand, régions pourtant situées beaucoup plus au sud de la province. Encore ici, les résultats obtenus à La Pocatière sont fort impressionnants. Des rendements annuels évalués à près de 25 tonnes ($24,67 \pm 6,53 \text{ t ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) ont été enregistrés pour les *S. miyabeana* 'SX64'.

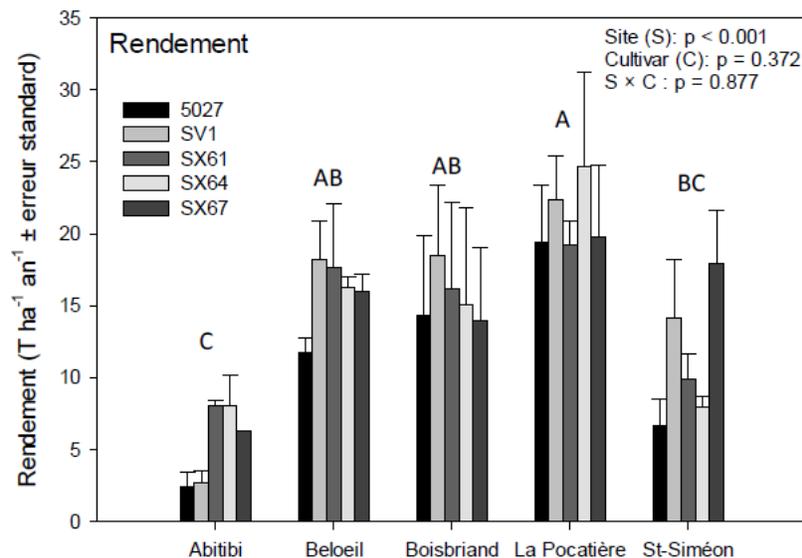


Figure 8. Comparaison des rendements annuels en biomasse aérienne pour cinq cultivars de saule cultivés dans cinq régions aux caractéristiques pédoclimatiques différentes. Des lettres majuscules différentes au-dessus des colonnes indiquent une différence significative ($p < 0,05$) entre les sites. Sur un même site, aucune différence significative n'a été trouvée entre les rendements des cultivars.

Les Figures 9 et 10 présentent les résultats comparant les rendements annuels selon que les saules ont été récoltés après deux ou trois ans. La Figure 9 montre que les rendements varient selon les sites ($p < 0,001$). Les rendements annuels des saules, tous cultivars confondus, atteignent des valeurs annuelles avoisinant les 30 tonnes de matières sèches par hectare. Les rendements les plus bas

s'observent à La Morandière en Abitibi. Globalement, il n'y a pas de différence significative entre les rendements annuels des saules récoltés après deux ans ou trois ans ($p = 0,593$). Toutefois, il y aurait des interactions entre les cycles de récolte (deux ou trois ans) et les sites où les saules étaient cultivés ($p < 0,001$). Ainsi, à La Pocatière, les saules récoltés sur un cycle de deux ans ont montré un rendement significativement supérieur (Figure 9). La Figure 10 montre qu'il n'y a aucune différence significative entre les cultivars ($p = 0,469$) et il n'y a pas d'interaction entre les sites et les cultivars ($p = 0,992$). Ceci signifie que tous les cultivars obtiennent un rendement semblable, quel que soit le site où ils ont été cultivés.

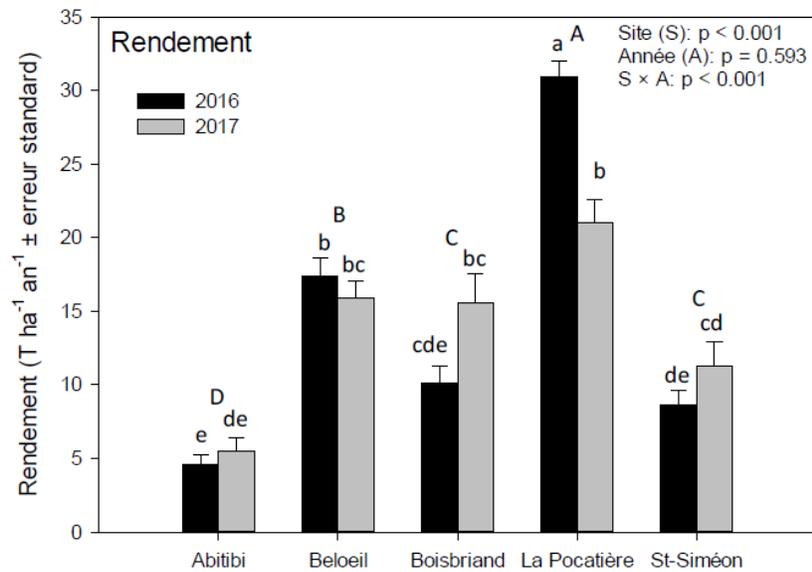


Figure 9. Comparaison des rendements annuels tous cultivars confondus (tonne sèche par hectare) obtenus sur chacun des cinq sites. Des lettres majuscules différentes au-dessus des colonnes indiquent une différence significative ($p < 0,05$) entre les sites. Des lettres minuscules au-dessus des colonnes indiquent des différences significatives en tenant compte des cycles de récolte (deux ans ou trois ans).

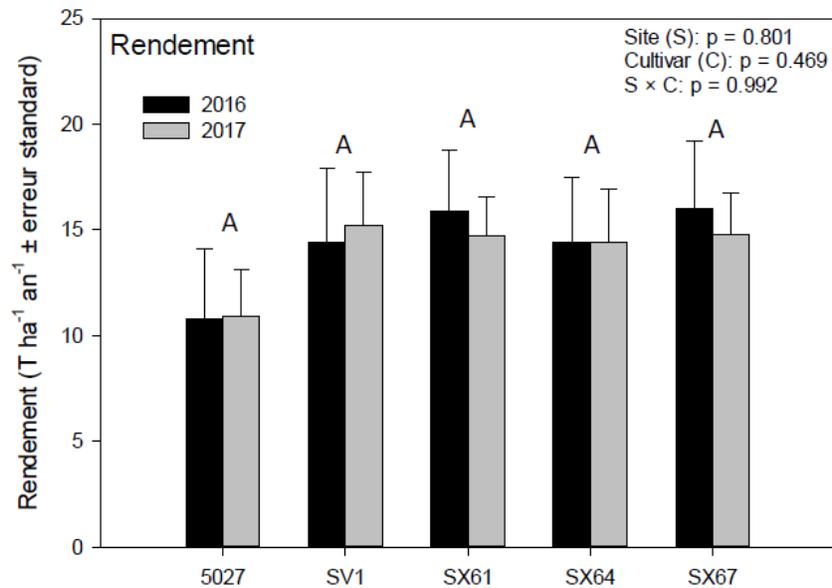


Figure 10. Comparaison des rendements annuels en biomasse (tonne sèche par hectare) selon les cultivars utilisés tous sites confondus. Des lettres majuscules différentes au-dessus des colonnes indiquent une différence significative ($p < 0,05$) entre les sites. Aucune différence significative entre les années de récolte n'a été trouvée.

La poursuite de cette étude, qui s'est amorcée en 2011, est forte intéressante pour notre compréhension des performances et des rendements des saules cultivés pour des fins énergétiques ainsi que pour l'exploration d'autre marché potentiel dans la bio-industrie.

D'une région à l'autre, les cultivars traités ont présenté des rendements qui se comparaient. C'est-à-dire que pour une région donnée, il n'y a pas un cultivar qui se démarque des autres par ses performances de croissance. Cela signifie que tous les cultivars pourraient être utilisés, quelle que soit la région, permettant ainsi de miser sur une diversité de cultivars pour la production de biomasse.

Le plus étonnant de ces résultats a été mis en évidence par ces rendements particulièrement élevés qui ont été obtenus sur le site de La Pocatière. On s'explique mal que les saules aient pu atteindre un tel rendement annuel, dépassant même 30 tonnes sèches par hectare! Pour l'instant, nous concluons qu'il existe probablement un ensemble de conditions (température, précipitations, absence de ravageurs) qui favorise la croissance des cultivars de saules testés dans cette région du Québec.

Atelier graminées pérennes

En 2010, trois espèces de graminées pérennes (l'alpiste roseau, le MG et le PE) ont été retenues par le RPBQ pour effectuer des essais d'adaptabilité et de performance agronomique au Québec. Vu que le rendement de l'alpiste roseau semé en 2011 a été atteint un plateau en 2013-2014, ce rapport présente les données de rendement seulement de PE et de MG.

Panic érigé

Le potentiel de rendement du PE en biomasse sèche varie en fonction de l'accumulation d'unités de chaleur et du type de sol (granulométrie et égouttement). Le plein rendement du PE s'obtient généralement à la troisième année de production. Sur des sols plus marginaux ou dans des régions plus nordiques, le plein potentiel peut être atteint qu'à la quatrième année de production.

Semis 2011

Le tableau 10 présente les rendements moyens obtenus sur cinq fermes expérimentales du Québec, dans le cadre des essais du RPBQ (2011 à 2017). Les rendements varient de 4 t/ha à 16 t/ha entre le cultivar, le site et les années de récoltes (Tableau 10).

Les cultivars Cave-in-Rock et Shawnee ont obtenu les rendements moyens les plus élevés soit 8,9 t/ha durant les cinq dernières années (2013-2017) de récolte (Tableau 10). Des observations sur le terrain nous ont permis de constater que le cultivar Cave-in-Rock est le mieux adapté aux conditions climatiques de plusieurs régions du Québec.

Le rendement moyen du PE en fonction du site était significativement différent entre les cinq sites (Tableau 10). Le rendement moyen le plus élevé (12 t/ha) a été atteint au site de Saint-Mathieu-de-Beloeil (SMB), tandis que le rendement le plus faible (5 t/ha) a été atteint au site de Normandin (NOR) (Tableau 10). Cette différence s'explique par des conditions climatiques défavorables à la croissance du PE sur les sites nordiques.

Les rendements du PE en fonction des années de récolte ont été au plus haut dès la troisième (2014) et la quatrième (2015) année de récolte, avec 8,4-8,8 t/ha, pour ensuite diminuer jusqu'à l'atteinte d'un plateau depuis deux ans (2016 et 2017) à environ 7 t/ha (Tableau 10). Les différences de conditions climatiques saisonnières expliquent en grande partie ces écarts. Les rendements plus élevés sont attribuables en grande partie à des températures plus chaudes durant les mois de croissance active du PE.

Tableau 10. Rendements moyens (2013-2017) du panic érigé en fonction des cultivars, des sites et des années de récolte (semis 2011).

| Cultivars <i>Moyenne des années et sites/cultivars</i> | Sommaire de 5 ans | Rendement en matière sèche, kg/ha | | | | |
|--|------------------------------|--|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | Sommaire annuel | | | | |
| | | 2017 | 2016 | 2015 | 2014 | 2013 |
| Blue Jacket | 8093 ^B | 6994 ^{ABC} | 6012 ^B | 9706 ^{ABC} | 9196 ^{AB} | 7902 ^{AB} |
| Cave-in-Rock | 8935 ^A | 7920 ^A | 7322 ^{AB} | 10903 ^A | 9596 ^{AB} | 8422 ^A |
| Forestburg | 6506 ^E | 5713 ^C | 6308 ^{AB} | 6016 ^E | 7328 ^D | 7018 ^{ABC} |
| Nebraska | 6837 ^{CE} | 6006 ^{BC} | 5577 ^B | 7446 ^{DE} | 7710 ^{CD} | 7047 ^{ABC} |
| Shawnee | 8913 ^A | 7869 ^A | 7301 ^{AB} | 10715 ^{AB} | 10118 ^A | 8232 ^A |
| Southlow | 7768 ^{BD} | 8220 ^A | 6936 ^{AB} | 9217 ^{BC} | 7969 ^{CD} | 6453 ^{BCD} |
| Sunburst | 7140 ^{CDE} | 6878 ^{ABC} | 6526 ^{AB} | 8443 ^{CD} | 8146 ^{BCD} | 5580 ^{CD} |
| Tecumseh | 7235 ^{CD} | 7487 ^{AB} | 7936 ^A | 8163 ^{CD} | 7435 ^D | 5363 ^D |
| Sites | | | | | | |
| <i>Moyenne des cultivars et années/site</i> | | | | | | |
| La Pocatière | 8837 ^B | 7850 ^B | 9920 ^A | 10037 ^B | 9278 ^B | 7205 ^B |
| Normandin | 5025 ^E | 5381 ^C | 4093 ^D | 4182 ^E | 4543 ^C | 6735 ^B |
| Saint-Augustin-de-Desmaures | 5674 ^D | 5820 ^C | 7623 ^B | 5856 ^D | 4536 ^C | 4693 ^C |
| Sainte-Anne-de-Bellevue | 6725 ^C | 5923 ^C | 5972 ^C | 8048 ^C | 8448 ^B | 5256 ^C |
| Saint-Mathieu-de-Beloeil | 12751 ^A | 9969 ^A | - | 16077 ^A | 14420 ^A | 10536 ^A |
| Années de récolte | | | | | | |
| <i>Moyenne des cultivars et sites/année</i> | | | | | | |
| 2013 | 7002 ^B | | | | | |
| 2014 | 8444 ^A | | | | | |
| 2015 | 8893 ^A | | | | | |
| 2016 | 6756 ^B | | | | | |
| 2017 | 7107 ^B | | | | | |

« - » les données de rendement du panic érigé récolté en 2016 à Saint-Mathieu-de-Beloeil n'ont pas été prises en considération lors du calcul du rendement moyen.

Semis 2012

Le tableau 11 présente l'évolution des rendements moyens du PE pour les cinq années de récolte, depuis son implantation en 2012, aux sites de St-Augustin-de-Desmaures (AUG), La Pocatière (LAP), Normandin (NOR), Ste-Anne-Bellevue (SAB) et St-Mathieu-de-Beloeil (SMB).

Les cultivars CIRE-II et CIR-II dérivés de Cave-in-Rock et Shawnee ont obtenu les rendements moyens les plus élevés soit 8,4 et 9 t/ha respectivement durant les cinq dernières années (2013-2017) de récolte (Tableau 11). Les cultivars Forestburg, Southlow et Tecumseh ont produit les plus faibles rendements soient 6,5 t/ha durant les cinq dernières années (Tableau 11).

Les rendements moyens sur cinq ans de tous les cultivars ont été significativement les élevés aux sites de SAB avec environ 11 t/ha, suivi de LAP avec environ 9 t/ha. Les plus faibles rendements du PE ont été observés au site de SMB et d'AUG avec 6 t/ha. Le site de NOR était le moins favorable pour la production du PE avec le rendement moyen le plus faible, environ 5 t/ha (Tableau 11).

Une différence significative entre le rendement moyen du PE en fonction des années de récolte a été observée. Les rendements ont été les plus élevés dès la troisième année de récolte, en 2015, avec 9160 kg/ha. Depuis, le rendement a diminué chaque année pour atteindre 7153 kg/ha en 2017 (Tableau 11).

Donc, la production de divers cultivars du PE implantés en 2011 et en 2012 a la même tendance:

- le PE a atteint le plus haut rendement à la troisième ou quatrième année de production;
- les cultivars CIRE-II et CIR-II dérivés de Cave-in-Rock (CIR) ainsi que leurs témoins CIR et Shawnee sont les plus productifs (de 8 à 9 t/ha) dans la province;
- SMB est le site le plus favorable pour la production du panic érigé (environ 12 t/ha) au Québec, probablement grâce à la qualité de sol;
- sur tous les sites, le PE semble avoir atteint un plateau dans le gain de rendement en 2015 ce qu'il reste à confirmer pendant la saison de récolte en 2018.

Tableau 11. Rendements moyens (2013-2017) du panic érigé en fonction des cultivars, des sites et des années de récolte (semis 2012).

| Cultivars <i>Moyenne des années et sites/cultivars</i> | Sommaire de 5 ans | Rendement en matière sèche, kg/ha | | | | |
|--|------------------------------|--|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | | Sommaire annuel | | | | |
| | | 2017 | 2016 | 2015 | 2014 | 2013 |
| Blue Jacket | 8130 ^{BCD} | 7242 ^{ABCD} | 7798 ^{ABC} | 9474 ^{BCD} | 8839 ^{ABC} | 7409 ^{AB} |
| Cave-in-Rock | 8730 ^{AB} | 7756 ^{ABC} | 9181 ^A | 9823 ^{BCD} | 9341 ^A | 7706 ^A |
| CIR-II | 8423 ^{ABC} | 8330 ^{AC} | 8143 ^{ABC} | 10187 ^{ABD} | 9024 ^{ABC} | 6545 ^{ABCD} |
| CIRE-II | 9057 ^A | 7837 ^{ABC} | 9257 ^A | 11125 ^{AD} | 9436 ^A | 7789 ^A |
| Carthage | 7309 ^{DEF} | 6536 ^{ABCD} | 7727 ^{ABC} | 9309 ^{BCDE} | 7910 ^{CD} | 5406 ^{CD} |
| Forestburg | 6702 ^F | 6120 ^{BD} | 6516 ^C | 7353 ^E | 7219 ^{ABCD} | 6382 ^{ABCD} |
| Shawnee | 8952 ^{AD} | 8319 ^A | 9067 ^{AB} | 11842 ^A | 9258 ^{ABC} | 6746 ^{ABC} |
| Shelter | 7545 ^{CDEF} | 7932 ^{ABC} | 7567 ^{ABC} | 9051 ^{BCDE} | 7893 ^{BCD} | 5583 ^{BCD} |
| Southlow | 6803 ^F | 5641 ^D | 7224 ^{ABC} | 8319 ^{BCE} | 7026 ^{ABCD} | 6100 ^{ABCD} |
| Summer | 7774 ^{CDE} | 7287 ^{ABCD} | 7453 ^{ABC} | 8051 ^{CE} | 8850 ^{ABC} | 7317 ^{ABC} |
| Sunburst | 7251 ^{EF} | 6706 ^{ABCD} | 7113 ^{BC} | 7976 ^{CE} | 8270 ^{ABCD} | 6328 ^{ABCD} |
| Tecumseh | 6591 ^F | 6305 ^{BCD} | 7366 ^{ABC} | 7516 ^E | 7269 ^D | 4626 ^D |
| Sites | | | | | | |
| <i>Moyenne des cultivars et années/site</i> | | | | | | |
| La Pocatière | 8870 ^B | 8471 ^B | 9477 ^B | 10738 ^B | 10020 ^B | 5931 ^B |
| Normandin | 5202 ^E | 6090 ^{CD} | 5517 ^E | 5045 ^E | 4634 ^D | 5311 ^C |
| Saint-Augustin-de- Desmaures | 6049 ^D | 5101 ^D | 7269 ^C | 6359 ^D | 5298 ^D | 6032 ^B |
| Sainte-Anne-de-Bellevue | 6256 ^C | 6102 ^C | 6017 ^D | 7643 ^C | 7822 ^C | 5172 ^C |
| Saint-Mathieu-de-Beloil | 11547 ^A | 9929 ^A | 10684 ^A | 14024 ^A | 13372 ^A | 9487 ^A |
| Années de récolte | | | | | | |
| <i>Moyenne des cultivars et sites/année</i> | | | | | | |
| 2013 | 6571 ^E | | | | | |
| 2014 | 8399 ^B | | | | | |
| 2015 | 9160 ^A | | | | | |
| 2016 | 7882 ^C | | | | | |
| 2017 | 7153 ^D | | | | | |

Semis 2015

Afin d'augmenter les performances agronomiques des cultivars déjà existants, de nouveaux cultivars ont été sélectionnés à partir de Cave-in-Rock (CIR), Summer et Sunburst et implantés à SMB en 2015.

Lors de la première année de récolte en 2016, le rendement du PE de la nouvelle sélection était très faible, de 2,6 à 4,1 t/ha, tandis que lors de la deuxième année de récolte en 2017, le rendement du panic érigé était trois fois supérieur, de 10 à 12 t/ha (Tableau 3).

Il n'y avait pas de différence significative ($p>0,05$) entre les rendements de la nouvelle sélection du PE et leurs témoins, à l'exception du RC CIRE-IV, qui était plus productif (environ 12 t/ha) que le témoin CIR (environ 9 t/ha) après la deuxième année de production. RC Tecumseh-V ainsi que le croisement RC High Tide-IIxCIR-III n'ont pas permis de produire significativement plus de rendements que leurs témoins Summer et CIR (Tableau 12). Il est intéressant de noter que la différence entre le rendement de divers cultivars récoltés en 2016 et 2017 était identique (Tableau 3). Il faudra vérifier si la tendance reste la même après la récolte de 2018.

Tableau 12. Rendements moyens des nouvelles sélections de panic érigé semé à Saint-Mathieu-de-Beloil en 2015.

| Cultivars | Témoin et référence | Rendement en matière sèche, kg/ha | |
|--------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|
| | | Sommaire annuel | |
| | | 2017 | 2016 |
| Cave-in-Rock (CIR) | T1 | 8826 ^{BC} | 2182 ^{BC} |
| Summer | T2 | 7103 ^C | 2220 ^C |
| Sunburst | T3 | 8560 ^{BC} | 2293 ^{BC} |
| Blue Jacket | 3 | 11112 ^{AB} | 3589 ^{AB} |
| RC Blue Jacket-V | 3 | 9951 ^{ABC} | 3218 ^{ABC} |
| RC CIR-V | 1 | 10860 ^{AB} | 2619 ^{AB} |
| RC CIRE-IV | 1 | 12258 ^A | 4183 ^A |
| RC HT-II x CIR-III | 1 | 11671 ^{AB} | 2731 ^{AB} |
| RC Tecumseh-V | 2 | 10288 ^{ABC} | 3398 ^{ABC} |

Semis 2016

En 2016, les nouveaux cultivars dérivés de Cave-in-Rock (CIR), Summer et Sunburst ont été semés à SMB et à LAP afin de comparer l'influence des différences climatiques sur la survie et le rendement du PE. La récolte de ces cultivars à SMB n'a pas été effectuée en 2017 à cause du très haut recouvrement (50-90%) de mauvaises herbes dans les parcelles. Ainsi, la prise de données et la récolte des nouveaux cultivars du PE ont été effectuées uniquement à LAP.

La productivité de nouveaux cultivars du PE et leurs témoins n'étaient pas significativement différents ($p>0,05$) avec un rendement moyen de 4 à 5 t/ha (Tableau 13).

Tableau 13. Rendements moyens (2017) de nouvelles sélections du panic érigé semé à La Pocatière en 2016.

| Rendement en matière sèche, kg/ha | | |
|-----------------------------------|---------------------|--------------------|
| Cultivars | Témoin et référence | Sommaire annuel |
| | | 2017 |
| Cave-in-Rock (CIR) | T1 | 4533 ^{AB} |
| Summer | T2 | 1668 ^B |
| Sunburst | T3 | 1563 ^B |
| RC Blue Jacket-VI | 3 | 4187 ^{AB} |
| RC Tecumseh-VI | 2 | 4313 ^{AB} |
| RC CIR-VI | 1 | 5587 ^A |
| RC CIRE-IV | 1 | 4855 ^A |
| RC HT-II × CIR-III (Cycle2) | 1 | 5098 ^A |
| RC CIR-III × HT-II (Cycle 2) | 1 | 4795 ^A |
| RC CIRE-IV × BJ-V | 1 et 3 | 5413 ^A |

HT=High Tide and E=Early

Miscanthus géant

Semis 2011

Le tableau 14 présente les rendements moyens de MG pour les cinq années de récolte, depuis son implantation en 2011, pour l'hybride Nagara seulement. La trop grande quantité de données manquantes pour l'hybride Europe n'a pas permis d'effectuer l'analyse statistique en conservant les deux hybrides. Le site de Normandin a été abandonné par manque de rusticité.

En 2016 et 2017 à Saint-Augustin-de-Desmaures (AUG), les rendements moyens mesurés ont été supérieurs (environ 30 t/ha) à ceux mesurés en 2015 (23,7 t/ha). Toutefois, il y a eu une baisse de rendement de 26 t/ha (en 2015) à 21 t/ha (en 2017) dans le site expérimental de Sainte-Anne-de-Bellevue (SAB), tandis que le rendement du MG à SMB récolté en 2015 et en 2017 était égal (environ 17 t/ha), montrant qu'un plateau en fonction du temps a été atteint sur ce site ce qu'il reste à confirmer en 2018.

Le rendement moyen sur cinq ans de MG hybride Nagara a été le plus haut au site d'AUG, suivi de SAB et enfin de SMB. Le rendement moyen du miscanthus en fonction des années de récolte était significativement ($p < 0,05$) le plus élevé en 2016, mais c'était juste les données présentées d'un site d'AUG. Les données du rendement du miscanthus récolté en 2016 à SAB et à SMB n'ont pas été prises en considération pour le calcul du rendement moyen à cause d'une erreur se produite pendant la prise de données au champ. Donc, la saison 2018 pourrait permettre de mieux documenter les données dans ces deux sites.

Tableau 14. Rendements moyens (2013-2017) du miscanthus géant hybride Nagara en fonction des cultivars, des sites et des années de récolte (semis 2011).

| Sites <i>Moyenne des cultivars et années/site</i> | Sommaire de 5 ans | Rendement en matière sèche, kg/ha | | | | |
|---|--------------------------|--|-------|---------------------|--------------------|--------------------|
| | | Sommaire annuel | | | | |
| | | 2017 | 2016 | 2015 | 2014 | 2013 |
| Saint-Augustin-de-Desmaures | 24407 ^A | 30292 ^A | 29233 | 23738 ^{AB} | 15809 ^A | 22966 ^A |
| Sainte-Anne-de-Bellevue | 21171 ^B | 21854 ^B | - | 26298 ^A | 19971 ^A | 16563 ^B |
| Saint-Mathieu-de-Beloeil | 16514 ^C | 17159 ^B | - | 17502 ^B | 15822 ^A | 15575 ^B |
| Années de récolte | | | | | | |
| <i>Moyenne des cultivars et sites/année</i> | | | | | | |
| 2013 | 18368 ^{CD} | | | | | |
| 2014 | 17200 ^D | | | | | |
| 2015 | 22513 ^{BC} | | | | | |
| 2016 | 29233 ^A | | | | | |
| 2017 | 23102 ^B | | | | | |

« - » les données de rendement du Miscanthus géant récolté en 2016 à SAB et à SMB n'ont pas été prises en considération lors du calcul du rendement moyen à cause d'une erreur se produite pendant la prise de données au champ.

Stratford

Semis 2010

Une ferme commerciale à Stratford a été choisie afin d'évaluer la survie et le rendement du Panic érigé (PE), de la Spartine pectinée (SP), du Barbon de Gérard (BG) et du Miscanthus géant (MG) implantés sur une terre en friche. Ce site situé en Estrie près de Mégantic compte autour de 2100 UTM.

Depuis 2013, les rendements maximaux ont toujours été obtenus par le MG, avec des rendements supérieurs à 15 t/ha (Figure 11). L'année 2015 a été exceptionnelle avec près de 40 t/ha. Dans le cas des autres cultures, les rendements moyens n'ont pas dépassé les 10 t/ha. Bien que sensibles à la verse, le BG et la SP font relativement bonne figure face au PE dans des conditions fraîches sur des terres moins bien égouttées.

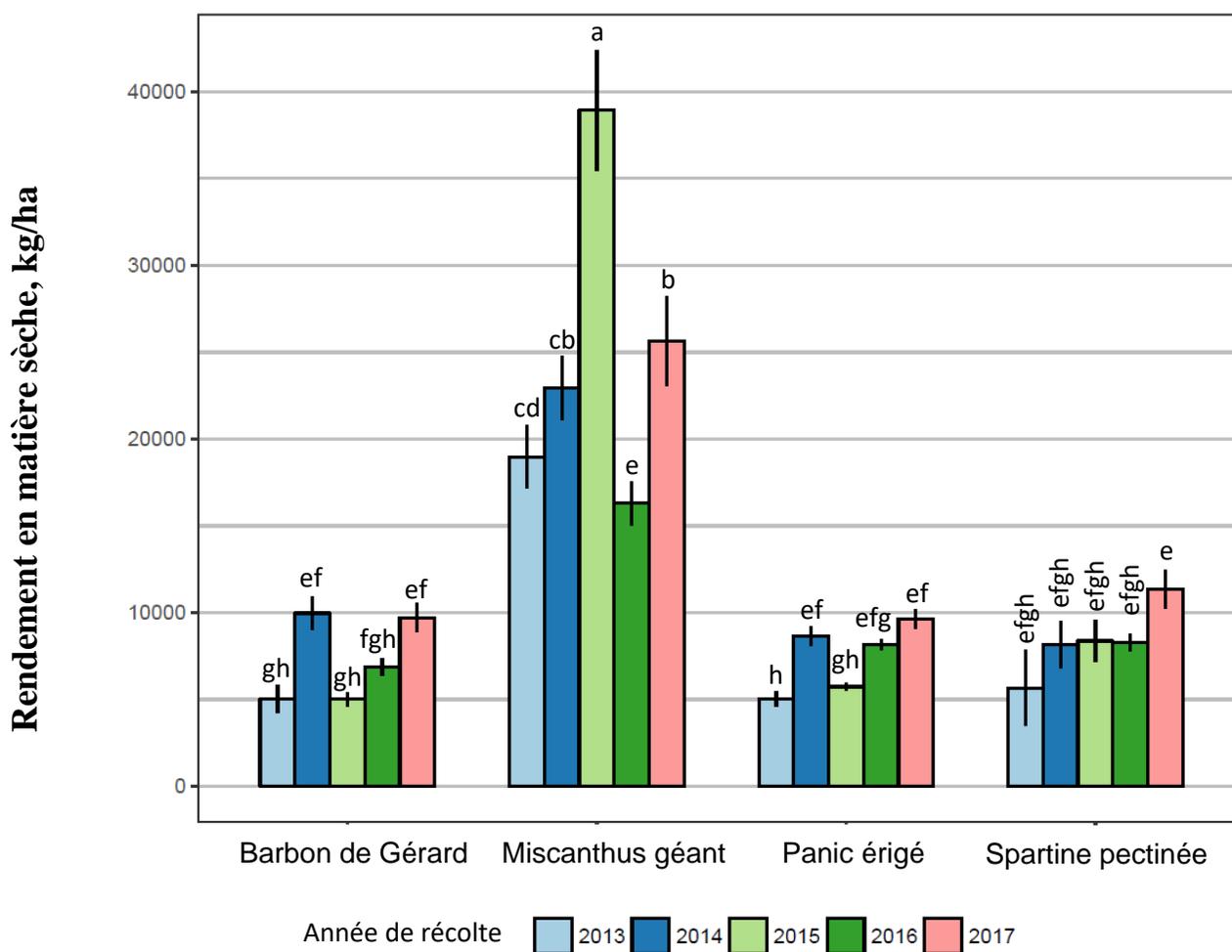


Figure 11. Rendements moyens (2013-2017) de diverses plantes bio-industrielles semées en 2010 à Stratford.

CONCLUSIONS

Les activités du RPBQ en 2017-2018 ont permis d'évaluer les aspects agronomiques des cultures pérennes telles que le PE et le MG dans les cinq sites expérimentaux : NOR, AUG, SMB, SAB, LAP.

La production de divers cultivars du panic érigé implantés en 2011 et en 2012 a la même tendance:

- le PE a atteint le plus haut rendement à la troisième ou quatrième année de production;
- les cultivars CIRE-II et CIR-II dérivés de Cave-in-Rock (CIR) ainsi que leurs témoins CIR et Shawnee sont les plus productifs (de 8 à 9 t/ha) dans la province;
- SMB est le site le plus favorable pour la production du panic érigé (environ 12 t/ha) au Québec, probablement grâce à la qualité de sol;
- sur tous les sites, le PE semble avoir atteint un plateau dans le gain de rendement en 2015 ce qu'il reste à confirmer pendant la saison de récolte en 2018.

Les nouvelles sélections du PE implantées en 2015 à SMB et en 2016 à LAP ont beaucoup de perspectives d'obtenir le rendement plus élevé par rapport aux cultivars implantés en 2011 et 2012 parce que leur rendement a déjà été assez élevé après la première et la deuxième année d'implantation. La saison 2018 pourrait permettre de mieux documenter les données dans ces sites.

Selon les rendements moyens de MG pour les cinq années de récolte, depuis son implantation en 2011, le site d'AUG semble avoir eu les meilleures conditions pour la production de cette culture avec le rendement moyen d'environ 25 t/ha.

Les cultures dédiées telles que le PE, la SP, le BG le MG, implantées en terre en friche dans une ferme commerciale à Stratford, sont bien adaptées aux conditions climatiques avec un rendement moyen de 10 t/ha pour le PE, la SP, le BG et de 20-25 t/ha pour le MG.

Les résultats obtenus au cours des deux dernières années ont mis en évidence le très grand potentiel de productivité des SCR et démontré que ces rendements (15-20 t/ha/an) peuvent se maintenir même après plusieurs années de culture.

Selon l'analyse de la littérature, le PE et le SCR possèdent un fort potentiel de leur utilisation dans la filière agroalimentaire et environnementale ainsi que dans la bioraffinerie. Le développement des modèles de chaîne de valeur pour ces cultures exige plus de financement et de temps pour la recherche scientifique et l'évaluation de la rentabilité économique ainsi que pour le lancement des projets pilotes qui pourrait dévoiler les vrais enjeux liés au développement du marché potentiel pour les cultures dédiées.

RÉFÉRENCES

1. Martel H., Lalonde O. 2018. Guide de production du panic érigé. Publication du Réseau des Plantes Bio-industrielles du Québec sur Agri-Réseau. Janvier 2018. 31 p. <https://www.agrireseau.net/documents/96746/panic-erige-guide-de-production>
2. La production d'éthanol à partir de matière lignocellulosique. 2008. Centre de recherche en agriculture et agroalimentaire du Québec. Édition de Ferland, CRAAQ, Québec. 17 p.
3. Labrecque M., Lajeunesse S.L. 2017. Guide de production de saules en culture intensive sur courtes rotations. Publication du Réseau des Plantes Bio-industrielles du Québec sur Agri-Réseau. Mars 2017. 29 p. <https://www.agrireseau.net/documents/96859/guide-de-production-de-saules-en-culture-intensive-sur-courtes-rotations>
4. Rapport final 2016-2017 réalisé par le CÉROM, Réseau des plantes bio-industrielles. 40 p.
5. Production de biocarburant et de bioproduits, avantages et impacts pour le secteur agricole québécois. 2007. Groupe conseil Nutshimit Inc. Commission sur l'avenir de l'agriculture et l'agroalimentaire québécois. Rapport finale. Mashteuiatsh, QC, Canada. 57 p.
6. Bois raméal fragmenté (BRF) de saule. Fiche technique. 2012. Agro Énergie. http://agroenergie.ca/pdf/Fiche_BRF_Agroenergie2012.pdf
7. Guidi Nissim W., Jerbi A., Lafleur B., Fluet R., Labrecque, M. 2015. Willows for the treatment of municipal wastewater: long-term performance under different irrigation rates. *Ecological engineering*. 81 : 395-404.
8. Bissonnette L., St-Arnaud M., Labrecque M., 2010. Phytoextraction of heavy metals by two Salicaceae clones in symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi during the second year of a field trial. *Plant and Soil*. 332 : 55-67.
9. Mosseler A., Major J.E., Labrecque M. 2014. Growth and survival of seven native willow species on highly disturbed coal mine sites in eastern Canada. *Can. J. For. Res.* 44 : 340-349.
10. Grenier V., Pitre F.E., Guidi Nissim W., Labrecque M. 2015. Genotypic differences explain most of the response of willow cultivars to petroleum-contaminated soil. *Trees Structures and function*. 29 (3) : 871-881.
11. Hénault-Ethier L., Smedbol E., Dagenais G., Racine J.F., Juneau P., Lepage L., Labrecque M., Lucotte M. Les bandes riveraines en agriculture : Une approche pluridisciplinaire pour une application concrète. *Vecteur Environnement*, Septembre, 2014. P. 52-57.
12. Lafleur B.S., Sauvé, S., Duy V., Labrecque, M. 2016. Phytoremediation of groundwater contaminated with pesticides using short-rotation willow crops: a case study of an apple orchard. *International Journal of Phytoremediation*. 18 (11): 1128-1135.
13. Agro Énergie inc. 2012. <http://agroenergie.ca/applications-commerciales/genie-environnemental>

14. Le Coopérateur agricole. 2013. L'industrie américaine de l'éthanol se heurte à un mur. P. 40-43.
https://issuu.com/lecooperateuragricole/docs/cooperateur_avril-2013_1
15. Hébert J. 2013. Quel avenir pour le développement des biocarburants de deuxième génération au Québec ? Thèse de maîtrise en environnement. Université de Sherbrooke. 103 p.
16. Morin-Rivet. 2017. Actualité Bioalimentaire. BioClips. 25 (30), le 24 octobre 2017. 2 p.
https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/Bioclips2017/Volume_25_n_o30.pdf
17. Le Coopérateur agricole. 2013. Éthanol: Québec, un leader mondial ? P. 44-45.
https://issuu.com/lecooperateuragricole/docs/cooperateur_avril-2013_1
18. Angela Bolis. Les biocarburants émettent plus de CO₂ que l'essence et le diesel. Le Monde. 28.04.2016 https://www.lemonde.fr/energies/article/2016/04/28/les-biocarburants-emettent-plus-de-co2-que-l-essence-et-le-diesel_4910371_1653054.html
19. Doyon M., Mondon M., Mondor S. 2011. Impact du développement des biocarburants de seconde génération sur le marché des matières résiduelles. Rapport du projet. 46 p.
20. Kang Q., Appels L., Tan T., Dewil R. 2014. Bioethanol from lignocellulosic biomass: Current Findings Determine Research Priorities. The scientific world journal. Hindawi Publishing Corporation. 13 p.
21. Collins K. 2006. US agriculture and the emerging bioeconomy. USDA.
www.usda.gov/documents/Dr.CollinsEnergyConference.ppt
22. Enerkem. 2018. <http://enerkem.com/fr/usines/projects-partenariats/>
23. Patrick Dupuis. 2014. Développement durable. Le bioraffinage : un nouveau vecteur de croissance. Le Coopérateur agricole. Mai-Juin 2014. P. 53.
https://issuu.com/lecooperateuragricole/docs/le_cooperateur_agricole_mai-juin_20
24. Marceau S., Glé P., Guéguen-Minerbe M. et al. 2017. Influence of accelerated aging on the properties of hemp concretes. Virtual special issue. Bio Based Building Materials. Construction and building materials. 139 : 524-530.
25. Des matériaux de construction à base de chanvre bientôt produits à Asbestos. Radio Canada. Ici Estrie. Publié le mardi 4 avril 2017. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1026104/des-materiaux-de-construction-a-base-de-chanvre-bientot-produits-a-asbestos>
26. Marceau S. and Delannoy G. 2017. Chapter 8. Durability of bio-based concretes. In: Bio-aggregates based building materials. Eds. S. Amaziane and F. Collet. RILEM State-of-the-Art Reports 23. P. 167-187.
27. Fomina M., Podgorsky V.S., Olishkevskaya S.V., et al. 2007. Fungal deterioration of barrier concrete used in nuclear waste disposal. Geomicrobiol. J. 24 (7) : 643-653.
28. Lange L., Bech L., Busk P.K. et al. 2012. The importance of fungi and of mycology for a global development of the bioeconomy. International Mycological Association. Fungus. 3 (1) : 87-92.

29. Nardi C. 2013. Un projet de 3 M\$ meurt sous les yeux des citoyens. Echo de Laval. [https://www.lechodelaval.ca/actualites/actualites/162124/un-projet-de-3-m\\$-meurt-sous-les-yeux-des-citoyens](https://www.lechodelaval.ca/actualites/actualites/162124/un-projet-de-3-m$-meurt-sous-les-yeux-des-citoyens)
30. Brereton N.J.B., Berthod N., Lafleur B., Pedneault K., Pitre F.E., Labreque M. 2017. Extractable phenolic yield variation in five cultivars of mature short rotation coppice willow from plantations in Quebec. *Industrial Crops and Products*. 97 : 525-535.
31. Tiilikkala K., Fagernäs L. and Tiilikkala J. 2010. History and use of wood pyrolysis liquids as biocide and plant protection product. *The Open Agriculture Journal*. 4 : 111-118.
32. Mokusaku wood vinegar pyroligneous acid. 2009. http://www.doishouten.co.jp/english/page_english1/e_wood.html
33. Vision Biomasse Québec. 2015. Nouvelle politique énergétique québécoise : La filière du chauffage à la biomasse forestière résiduelle doit faire partie de la solution. 22 p. http://visionbiomassequebec.org/wp-content/uploads/2015/03/ME15-05-11_Lettre-ouverte-Vision-Biomasse-Qu%C3%A9bec.pdf