



Bureau de l'efficacité et de l'innovation
énergétiques

GRANULATION

FICHE DÉTAILLÉE

Cette fiche détaillée fait partie d'une série de 16 fiches présentant des mesures et pratiques en efficacité énergétique applicables au secteur agricole.

Le contenu de cette fiche détaillée est tiré intégralement du document intitulé *Étude de faisabilité technico-économique pour la mise en place d'une ferme modèle écoénergétique au Saguenay–Lac-Saint-Jean, Rapport final*. Cette étude résulte d'un projet réalisé par le Collège d'Alma.

ANALYSE ET RÉDACTION

Sylvain Pigeon, ing., M. Sc., BPR Infrastructure inc.
Charles Fortier, ing., agr., BPR Infrastructure inc.
François Coderre, ing. jr., BPR Infrastructure inc.
Jean-Yves Drolet, agr., M. Sc., BPR Infrastructure inc.

COLLABORATEURS

Diane Gilbert, agroéconomiste, Groupe Ageco
Simon Dostie, analyste, Groupe Ageco
David Crowley, ing., Agrinova, centre collégial de transfert technologique (CCTT) du Collège d'Alma

COMITÉ DE SUIVI

Agrinova, CCTT du Collège d'Alma
Direction générale du Collège d'Alma
Ferme Métro
Ferme Gagné
Agence de l'efficacité énergétique

Cette étude a été réalisée en 2009 et 2010 grâce au soutien financier de l'Agence de l'efficacité énergétique, de la Conférence régionale des élus du Saguenay–Lac-Saint-Jean, de la Ville d'Alma, du Collège d'Alma et de la Coop fédérée.

Au moment de sa rédaction, le contenu de l'étude reflétait au mieux les connaissances des différents rédacteurs et collaborateurs. Certaines conditions peuvent avoir évolué et ne plus correspondre à la situation actuelle. La mise en application des mesures et pratiques énoncées et la rentabilité qui en résultera demeurent sous l'entière responsabilité du lecteur.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES

Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétiques
5700, 4^e avenue Ouest, B 406
Québec (Québec) G1H 6R1

Téléphone : 418 627-6379 ou 1 877 727-6655
Télécopieur : 418 643-5828
Site Internet : <http://www.efficaciteenergetique.mrn.gouv.qc.ca/>
Courriel : efficaciteenergetique@mrn.gouv.qc.ca

Photos : Éric Labonté et Marc Lajoie, MAPAQ

Décembre 2012
© Gouvernement du Québec

La granulation à la ferme vise la production de biocombustibles appelés à remplacer un combustible fossile (propane, huile à chauffage ou gaz naturel), consommé par la ferme ou non. Cette section de l'analyse de faisabilité comprend, d'une part, la production même de la biomasse à la ferme et, d'autre part, son conditionnement par granulation pour qu'elle puisse être utilisée comme combustible. La biomasse considérée est celle découlant d'activités de production agricole. On comprend ici la production de cultures énergétiques herbacées (panic érigé, alpiste roseau, agropyron, chanvre, miscanthus, etc.) ou ligneuses (saule à croissance rapide et peuplier hybride). Est donc exclue de l'étude, la production de biocombustibles à partir de résidus de cultures (paille de céréales), de meunerie (grains) et de résidus forestiers (sciure, planure ou autres). Il est entendu, toutefois, que ces autres matériaux pourraient éventuellement être utilisés pour la fabrication de biocombustibles. Il est à noter que le saule et le peuplier étant des espèces à courte rotation, leur production sera réputée être une activité agricole.

1 DESCRIPTION DE LA TECHNIQUE

Deux grandes activités sont donc couvertes par cette section, soit la culture des plantes énergétiques et leur conditionnement pour en faire des biocombustibles commercialisables.

Culture de plantes énergétiques

La culture de plantes énergétiques est relativement récente au Québec. Ces plantes sont caractérisées par une croissance rapide, un haut rendement en biomasse ainsi que par une valeur énergétique très intéressante. Le panic érigé est la plante herbacée qui a été le plus étudiée, notamment par REAP-Canada et plus récemment par les directions régionales du MAPAQ. Les résultats de nombreux essais réalisés sur la culture du panic érigé ont d'ailleurs été publiés (Martel et Perron, 2008). Ces essais sont toutefois très récents et très peu de parcelles étaient rendues à maturité. Peu de données de rendement sont donc disponibles. Par contre, ces essais relèvent les principaux défis que représente l'établissement de cette culture. Les résultats obtenus durant plusieurs années sur quelques sites au Québec, notamment à Sainte-Anne-de-Bellevue (Samson, 2010) et à Saint-Lambert-de-Lauzon (Martel et Perron, 2008) indiquent que les rendements espérés peuvent varier de 6 à 12 t/ha, selon le cultivar et, indirectement, des degrés-jours de croissance disponibles pour la région. À ce jour, le cultivar Cave-in-Rock démontre le meilleur potentiel au Québec. Sa production ne nécessite aucun type d'équipement spécialisé autre que ceux normalement requis pour la production de fourrages. Cette culture exige de deux à trois ans pour son implantation et atteint rapidement son plein potentiel par la suite (AAC-REAP-Guelph, 2010). La récolte s'effectue par la suite tous les ans, et ce, pour une période de l'ordre de 10 à 15 ans de production avec récolte. Il est à noter que le panic érigé peut également être utilisé comme litière, fourrage, plante protectrice pour les milieux riverains, pour la fabrication d'éthanol et pour l'industrie des pâtes et papiers. Elle peut donc être entreprise pour des fins autres qu'énergétiques.

Quant à la production de saule, elle est plus récente et moins répandue au Québec (Agro-Énergie, 2010). Les essais effectués à ce jour indiquent un potentiel de rendement variant de 15 à 20 t.m.s./ha. Sa production nécessite des types d'équipement plus spécialisés ou adaptés, notamment pour son implantation par bouturage (planteuse maraîchère traditionnelle ou adaptée) et sa récolte (fourragère adaptée). L'implantation nécessite de 2 à 3 ans puis les récoltes s'effectuent par la suite tous les 2 à 5 ans, selon les conditions de croissance et la taille de récolte souhaitée. Le saule peut être utilisé pour la combustion directement sous forme de copeaux ou il peut être préalablement granulé. Dans ce dernier cas, sa densité plus élevée lui confère un meilleur pouvoir calorifique. Le taux d'humidité du saule à sa récolte demeure élevé. Aussi, une étape de séchage est donc recommandée préalablement à sa combustion directe ou à sa granulation. Comme pour le panic érigé, le saule connaît plusieurs usages, dont la formation de murs antibruits et de brise-vents et la fabrication de panneaux de particules et de matériaux compressés (MDF, HDF).

Granulation

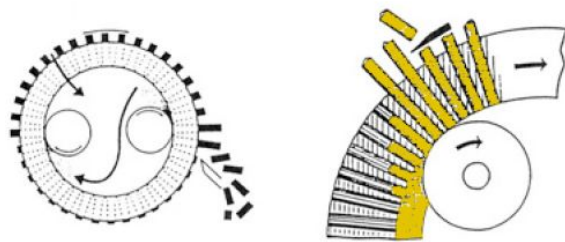
La granulation de la biomasse permet d'obtenir un biocombustible plus facile à manutentionner et d'une plus grande densité, et donc avec un plus grand pouvoir calorifique. Il est à noter que des biocombustibles densifiés sont également disponibles sous forme de briquettes ou de bûches. Le procédé de granulation comprend plusieurs étapes.

Le **séchage** de la biomasse, préalablement à sa granulation, est requis lorsque son taux d'humidité est supérieur à 15 à 20 %. C'est le cas de la biomasse provenant de la production de saules à courte rotation alors que le taux d'humidité du panic érigé à sa récolte est généralement inférieur à ces valeurs. Le **broyage** de la biomasse est effectué avec des broyeurs à marteaux. La taille visée des particules après le broyage est de l'ordre de 6 mm (1/4 po). La biomasse broyée est tamisée afin de ne laisser passer que les particules suffisamment fines pouvant être granulées. Cette biomasse alimente un **extrudeur** qui réalise sa granulation (figures 5-4 et 5-5). De l'eau chaude et de la vapeur sont parfois ajoutées lorsque la biomasse est très sèche. Cette humidité facilite l'écoulement du matériel et réduit la puissance requise par l'extrudeur. La biomasse est sectionnée à la sortie de l'extrudeur pour former les granules. La pression exercée lors de l'extrusion peut augmenter la température de la biomasse jusqu'à 80 °C. Plus la biomasse résiste à l'écoulement, plus la température augmente. Par conséquent, les granules passent par une étape de **refroidissement** avant d'être entreposées. L'air utilisé pour refroidir les granules doit être filtré avant d'être rejeté dans l'atmosphère. Une fois refroidies, les granules sont prêtes à être utilisées.

La densité du produit fini varie selon plusieurs paramètres, dont le diamètre et la longueur des perforations, la composition de la matière première (cendres et fibres) et le taux d'humidité du matériel. Des essais de granulation de panic érigé ont été menés par le REAP (Resource Efficient Agricultural Production). Ils ont permis de démontrer que pour le panic érigé, des granules de 5 mm de diamètre (3/16 po) et de 40 mm de longueur (1,5 po) donnent de meilleurs résultats puisqu'elles produisent des granules d'une densité de 600 à 700 kg/m³.

2 DOMAINE D'APPLICATION

La production de biomasse agricole, avec ou sans sa transformation à la ferme, s'adresse à toute entreprise agricole qui dispose de superficies en culture. Dans le contexte actuel, cette production est vue comme complémentaire aux productions traditionnelles des entreprises agricoles et qui est principalement destinée à occuper les territoires moins propices à l'agriculture. Toutefois, dans une perspective à plus long terme, cette production pourrait être appelée à devenir la principale production d'une entreprise agricole. Par ailleurs, les entreprises agricoles qui produisent déjà des fourrages (entreprises laitières, bovines, ovines) pourraient être plus spécifiquement intéressées par la culture de plantes herbacées (panic érigé, alpiste roseau, etc.), car elles disposent déjà, dans la majorité des cas, de la machinerie requise pour la production de ces plantes.



**Rouleaux et couteaux
pour la fabrication des granulés**

Figure 4-4
Schéma de fonctionnement d'un extrudeur
(Source : Université Laval, FSAA, Compétence
2000)

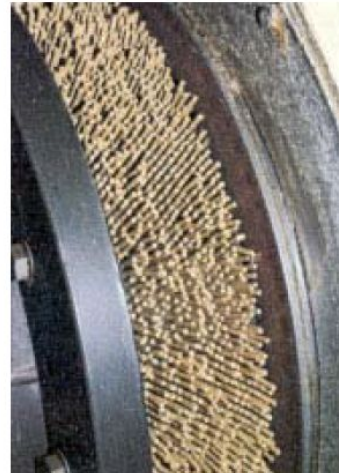


Figure 4-5
**Vue des granules après extrusion et avant
sectionnement** (Source : Université Laval, FSAA,
Compétence 2000)

3 POTENTIEL D'ÉCONOMIE ET/OU DE PRODUCTION D'ÉNERGIE

Les biocombustibles produits à partir de la biomasse ligneuse ou herbacée contiennent entre 30 et 50 %, sur base massique, de l'énergie contenue dans les combustibles fossiles communément utilisés pour le chauffage (tableau 4-7). Les granules de bois dur présentent la plus grande valeur calorifique (en moyenne : 22,7 GJ/t) parmi les biomasses courantes. Cette valeur considère une biomasse anhydre (taux d'humidité = 0 %). Le pouvoir calorifique diminue avec une augmentation du taux d'humidité en raison de l'énergie requise pour évaporer l'eau contenue dans la biomasse. En considérant le contenu en eau de même que l'efficacité de la combustion, une (1) tonne de granules de panic érigé produirait autant d'énergie utile que 464 litres d'huile à chauffage par exemple (tableau 4-8). Ainsi, une culture de panic érigé affichant un rendement de 10 t/ha générerait, une fois celui-ci granulé, 3 155 \$/ha d'équivalent énergétique en huile à chauffage.

Tableau 4-7
Valeur calorifique typique et valeur économique de quelques combustibles

Combustible	Pouvoir calorifique supérieur (GJ/t.a.) ¹	Coût du combustible ²	Teneur en eau (%)	Efficacité de combustion (%)	Valeur économique (\$/GJ)
Huile à chauffage	45,60	0,69 \$/L	-	80	22,62
Gaz naturel	52,75	0,48 \$/m ³	-	95	14,11
Propane	50,40	0,60 \$/L	-	95	24,45
Granule de bois dur	22,70	200 \$/t	5	80	11,66
Granule de saule	19,40	175 \$/t	5	80	11,87
Granule de panic érigé	18,70	175 \$/t	5	80	12,31
Copeau de saule	19,40	65 \$/t	30	80	5,98

¹ t.a. : tonne anhydre

² Tarif de février 2010 pour les combustibles fossiles; estimation pour les biocombustibles.

Tableau 4-8
Équivalences énergétique et économique d'une (1) tonne de différents biocombustibles.

Biocombustible	Équivalent énergétique			Équivalent économique ¹		
	Huile à chauffage (L)	Gaz naturel (m ³)	Propane (L)	Huile à chauffage (\$)	Gaz naturel (\$)	Propane (\$)
Granule de bois dur	560	504	661	388	242	398
Granule de saule	481	433	568	333	208	343
Granule de panic érigé	464	418	548	321	200	330
Copeau de saule	355	319	419	246	153	252

¹ Huile à chauffage : 0,69 \$/l; gaz naturel : 0,48 \$/m³ et propane: 0,60 \$/l.

4 DISPONIBILITÉ DE LA TECHNIQUE

Actuellement, seules des usines régionales de granulation de résidus ligneux sont en fonction. Le tableau 4-9 présente quelques fabricants de biocombustibles, essentiellement de bois densifié, et d'autres entreprises intervenant dans le domaine des biocombustibles. Par ailleurs, Bio-Combustibles International prévoit la construction d'une première usine de granulation de panic érigé en Montérégie dès 2010. Cette usine disposerait d'une capacité de 45 000 t/an, et pourrait donc recevoir la production de 4 500 ha de panic érigé (rendement de 10 t/ha). Un second projet est en élaboration dans la région du Témiscouata par la Coopérative forestière Haut Plan Vert. Ce projet, d'une capacité de l'ordre de 30 000 t/an, prévoit approvisionner les nombreux acériculteurs de la région qui auront modifié leur évaporateur pour les chauffer aux granules. Un investissement de l'ordre de 3 M \$ y est envisagé pour la construction de l'usine.

Bien que la production de biocombustibles soit principalement envisagée sur une base régionale au Québec, il existe quelques types d'équipement de petite capacité qui peuvent être installés à la ferme. Ces types d'équipement doivent être utilisés pour les mêmes fonctions que dans une usine. Toutefois, les équipements étant de plus petite dimension, la dissipation de chaleur se fait plus facilement de sorte que le refroidissement de la biomasse à la sortie du granulateur n'est pas essentiel. À petite échelle, le séchage, dans le cas de produits ligneux, se fait naturellement.

Tableau 4-9
Liste d'entreprises produisant des biocombustibles au Québec

Entreprise	Produits	Coordonnées
Bio-Combustible International 1036 chemin St-Armand St-Armand (Québec) J0J 1T0	Granules à base de panic érigé	Téléphone : 450-248-3863 Télécopieur 450-248-4241 Courriel : info@bio-combustible.com Site : www.bio-combustible.com
Granules L.G. inc. 750, de la Moraine Saint-Félicien (Québec)	Biocombustibles et litière faits de granules à base de résidus ligneux	Téléphone : (418) 679-2647 Télécopieur : (418) 679-8790 Courriel : info@granuleslg.com Site : www.granuleslg.com
Granules Combustibles Energex Inc. 3891, Président-Kennedy Lac-Mégantic, G6B 3B8	Biocombustibles domestiques et industriels faits de granules à base de résidus ligneux	Téléphone : 819-583-5131 Télécopieur : 819-583-5862 Courriel : sales@energex.com Site : www.energex.com
Lauzon Bois énergétique recyclé Inc. 3201 Lucille Bastien St-Paulin, J0K 3G0	Bûches de bois densifié (résidus de bois franc : érable, chêne et merisier)	Tél. : (819) 268-5129
Les Bûches Éco-Logic 40, rue du Pacifique Est Bromont, J2L 1J5	Bûches de bois densifié faites à partir de sciure récupérée des usines de bois franc (érable, chêne et merisier)	Tél. : 450.534.3235 Télécopieur : 450.534.3248 Courriel : info@eco-logic.ca Site : www.eco-logic.ca/
BÛCHE ÉNERGIE 3095, Boul. Hamel Québec, G1P 4C6	Bûches de bois densifié faites à partir de sciure récupérée des usines de bois franc (érable, chêne et merisier) Granules de chauffage <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bois ▪ Maïs ▪ Blé 	Tél. : 418-682-2647 Télécopieur : 418-683-3389 Courriel : info@bucheenergie.com Site : www.bucheenergie.com
Bois BSL Énergie	Bûches de bois reconstituées,	Téléphone : (418) 775-5360

Entreprise	Produits	Coordonnées
2101, rue Bourque, C. P. 4 Mont-Joli (Québec) G5H 3K8	marque SmartLog (résidus de planage de bois franc)	Télécopieur : (418) 775-5860 Courriel : infosmartlog@boisbsl.com Site : www.bsllcanada.com
Granules de la Mauricie inc. 4435, avenue Georges-Bornais Shawinigan (Québec) G9N 6T5	Granules de bois	Téléphone : (819) 536-3589 Télécopieur : (819) 536-5321
Granule Boréal inc. 201, 6e Rue Ouest Amos (Québec) J9T 4E1	Granules de bois mou	Téléphone : (819) 732-8651 Télécopieur : (819) 732-8656 Courriel : info@granuleboreal.com Site : granuleboreal.com
Rosario Poirier inc. 130, route Saint-Alphonse C. P. 88, Saint-Alphonse (Québec) G0C 2V0	Bûches de bois reconstituées	Téléphone : (418) 388-5216 Télécopieur : (418) 388-2281 Courriel : admin@rosariopoirier.com Site : www.rosariopoirier.com
Produits forestiers St-Armand inc. 1435, chemin Saint-Armand Saint-Armand (Québec) J0J 1T0	Bûches de bois reconstituées	Téléphone : (450) 248-4334 Télécopieur : (450) 248-4556
Industries P.W.I. inc. 8000, avenue Duplessis Saint Hyacinthe (Québec) J2R 1S6	Bûches de bois reconstituées, bois franc, marque Logik-ê	Téléphone : (450) 796-1770 Télécopieur : (450) 796-2188 Courriel : info@pwi-industries.com Site : www.pwi-industries.com
Agro Énergie 588 Ruisseau des Anges Sud St-Roch de l'Achigan (Québec) J0K 3H0	Bouture de saule à courte rotation Services conseils	Téléphone : 450-588-0013 Fax : 450-588-5675 Courriel : info@agroenergie.ca Site : www.agroenergie.ca
Oliotechnology B.P. 10016 67171 Wissembourg Cedex France	Granulateurs de capacité allant de 150 kg/h à 400 kg/h	Téléphone : Télécopieur : Courriel : Site : www.oliotechnology.fr

5 ESTIMATION DE LA RENTABILITÉ

La rentabilité pour ce type de production est encore difficile à établir. D'une part, le coût de production des différentes biomasses agricoles demeure à être précisé. En effet, pour la presque totalité des biomasses, les techniques de production (exigences agronomiques, travaux culturaux) ne sont pas encore maîtrisées par les producteurs et les rendements à en espérer en production de type commercial (non pas en parcelle expérimentale) ne sont pas encore connus pour les différentes régions du Québec ni pour les différentes biomasses.

Du côté de la consommation de la biomasse, les types d'équipement de combustion demandent à être adaptés à ces nouveaux combustibles. De plus, la réglementation les encadrant et le marché ainsi que les filières de commercialisation des biomasses ne sont pas encore établis.

En se basant sur des données actuellement connues, le budget établi par Mongeau (2007) fait état d'un coût de production de l'ordre de 47 \$/t en ne considérant que les frais variables de la machinerie, et ce pour un rendement de la culture de 8,5 t/ha. Toutefois, en considérant des travaux culturaux à forfait, le coût de production est plutôt de 77,97 \$/t. Ces coûts incluent le transport de la biomasse vers une usine de granulation. Quant au prix du panic érigé, comme il n'est, en pratique, pas encore utilisé pour des fins énergétiques, il est plutôt établi sur la base du prix de la paille d'orge dont il se rapproche en termes de litière (MAPAQ, 2010). Le prix estimé était alors de 1,25 \$ et de 1,75 \$ respectivement pour la paille de blé et d'orge pour des balles d'une masse de 12 kg, soit l'équivalent de 105 \$/t et de 145 \$/t. Ainsi, sur cette seule base, la production de panic se révèle rentable.

Selon Samson (2007), le coût de la granulation à la ferme du panic érigé aurait été de l'ordre de 40 \$/t, soit un coût total de l'ordre de 110 \$/t pour une utilisation à la ferme (production et granulation). Pour sa commercialisation, en considérant des coûts d'entreposage, d'ensachage, de transport et de commercialisation, le coût serait plutôt de l'ordre de 175 \$/t.

5.1 Sensibilité au coût de l'énergie (électricité et/ou hydrocarbure)

Le tableau 4-8 indique qu'une (1) tonne de granules de panic érigé produirait autant d'énergie utile que 464 litres d'huile à chauffage ou 548 litres de propane, soit 321 \$ d'huile à chauffage (à 0,69 \$/l) et 330 \$ de propane (à 0,60 \$/l). Aussi, et compte tenu d'un coût de production de l'ordre de 175 \$/t, le granule de panic érigé est très compétitif comme source énergétique. Une telle estimation vaut également pour le saule dont la combustion ne requiert pas obligatoirement sa granulation.

5.2 Type et taille de la ferme

La rentabilité de la culture de biomasse dépend peu de la superficieensemencée si l'entreprise possède déjà la machinerie requise pour sa production et si la granulation est effectuée dans un centre plus régional. Dans le cas de la production de saule, qui nécessite certains types d'équipement plus spécialisés (plantation et récolte), il est préférable d'envisager un partage de ces appareils sauf si les superficies plantées sont importantes.

6 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

Les principaux avantages reliés, d'une part, à la production de cultures énergétiques et, d'autre part, à leur granulation sont les suivants :

Production de cultures énergétiques

- Rendement potentiel de biomasse élevé
- Utilisation potentielle de terres marginales
- Cultures souvent pérennes (panic érigé, saule, alpiste roseau, etc.)
- Travaux culturaux très limités
- Amélioration des caractéristiques du sol
- Conservation du sol (protection contre érosion)
- Augmentation de la matière organique du sol
- Besoins très limités de fertilisation et de pesticides (établissement)
- Bilan énergétique très favorable (énergie produite / énergie consommée)
- Peut favoriser le développement régional en créant des circuits courts
- Nouvelle production qui pourrait permettre de maintenir la production agricole dans plusieurs régions

Granulation

- Produit localement des biocombustibles
- Favorise l'autonomie énergétique locale
- Favorise le développement régional (réduit les importations d'énergie)

Les principaux inconvénients appréhendés :

Production de cultures énergétiques

- Période d'établissement de 2 à 3 ans pour la majorité des cultures
- Difficulté d'établissement de certaines cultures
- Manque de connaissances sur la production de ces cultures
- Potentiel seulement partiellement connu sous différents climats et types de sols
- Marché non encore établi, donc volatilité du prix de la biomasse
- Pourraient éventuellement se substituer aux cultures alimentaires

Granulation

- Le marché n'est pas encore établi
- Le prix de la granule est volatile

7 RECOMMANDATIONS

Compte tenu de sa rentabilité et de son niveau de développement, cette filière est prête pour un essor très prochain. Il est primordial de bien connaître le potentiel de ces productions sous différentes conditions de production (climat et sol). Ainsi, on doit vérifier que ces cultures ont vraiment le potentiel d'être produites sur des terres marginales tout en maintenant un niveau de rentabilité intéressant.

8 RÉFÉRENCES

AAC – REAP – Université de Guelph, 2010. *Le panic érigé dans l'Est de l'Ontario : un guide pour les producteurs*. [En ligne] [www.agrireseau.qc.ca/horticulture-serre/documents/SwitchgrassGuide98Fr.pdf] (Consulté le 8 février 2010).

Agro Énergie, 2010. *Les cultures intensives sur courtes rotations pour la production d'énergie*. [En ligne] [<http://www.agroenergie.ca/guide/GuideCICR.pdf>] (Consulté le 8 février 2010).

MAPAQ, 2007. « Manque de litière : pistes et solutions ». *Journal Vision agricole*, octobre 2007. [En ligne] [<http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Regions/chaudiereappalaches/journalvisionagricole>].

Martel, H. et M.-H. Perron, 2008. *Compilation des essais de panic érigé réalisés au Québec*. CRAAQ. [En ligne] [www.craaq.qc.ca].

Mongeau, R., 2007. *Panic érigé ; potentiel en Montérégie*. Conférence aux Journées grandes cultures – Cultures et marchés émergents, 4 décembre 2007.

Samson, R., 2010. *Sources d'énergie de biomasse pour le chauffage en serriculture*. [En ligne] [http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-serre/documents/HullCQVBBioenergie_samson.pdf] (Consulté le 8 février 2010).

Samson, R., 2007. *La bioénergie : opportunités croissantes pour le secteur agricole*. REAP-Canada. Présentation PowerPoint. Novembre. [En ligne] [<http://www.craaq.qc.ca/DATA/RAPPORT/23.pdf>] .