



**DEMI-JOURNÉE D'INFORMATION SCIENTIFIQUE  
SUR LES FOURRAGES**

Mardi, le 15 février 2011

Organisée par le

Comité des plantes fourragères du CRAAQ

en collaboration avec le

Conseil Québécois des Plantes Fourragères (CQPF)

**COMPTES-RENDUS DES CONFÉRENCES**  
Victoriaville, Québec

N.B. : Les résultats qui sont présentés dans ces comptes-rendus ne peuvent pas être utilisés ou divulgués, en tout ou en partie, sans le consentement préalable des auteurs.

## AVANT-PROPOS

Plus que jamais, la recherche et l'innovation jouent un rôle déterminant dans l'essor d'une agriculture durable tant au point de vue économique qu'environnemental. Il y aura bientôt vingt ans, les scientifiques impliqués dans le développement de connaissances et de technologies en plantes fourragères ont pris l'initiative d'organiser un rendez-vous annuel ayant pour but l'échange d'information sur ce qui a cours dans les laboratoires et les parcelles expérimentales. Ce forum qui se situe en amont du transfert technologique a immédiatement connu un franc succès qui ne s'est pas démenti depuis. Un des buts visé par les organisateurs de cet événement était la présentation de données préliminaires afin de stimuler la discussion, aider à l'interprétation des résultats et s'assurer que les protocoles optimisent les retombées sur le secteur de la production. Il importe de maintenir cette ouverture et d'encourager les échanges de résultats et de concepts qui restent souvent à valider si nous voulons soutenir la vigueur et le dynamisme de l'innovation en plantes fourragères au Québec. La participation de scientifiques, producteurs agricoles, étudiants, conseillers en grandes cultures est essentielle pour assurer les bénéfices de cet exercice. La collaboration entre le Conseil Québécois des Plantes Fourragères et le Comité Plantes Fourragères du CRAAQ dans l'organisation de cette demi-journée scientifique est un élément déterminant à cet égard. Il existe par ailleurs en aval des travaux expérimentaux, plusieurs colloques, journées spécialisées ou autres activités dont la mission est d'assurer le transfert des technologies découlant de la recherche.

Le programme de l'édition 2011 de la demi-journée d'information scientifique sur les fourrages marque bien le dynamisme et l'esprit d'avant-garde de la recherche en plantes fourragères au Québec. La présentation de plusieurs communications sur l'utilisation de nouvelles cultures pour la production de bioénergie et la valorisation de co-produits en alimentation des ruminants illustre la contribution de la science au développement harmonieux de cette filière. Des recherches couvrant le spectre allant de l'amélioration génétique en passant par la culture, la récolte et la conservation et l'alimentation des animaux font état des expertises diversifiées présentes dans nos institutions; Elles démontrent également l'intégration des connaissances tout au long de la chaîne de production. Nous pouvons être fiers du dynamisme et du leadership dans l'innovation des plantes fourragères au Québec.

Vous trouverez dans ce compte-rendu, les sommaires des communications présentées lors de la demi-journée. Je remercie tous ceux et celles qui ont investi de leur temps et leurs efforts pour partager le fruit de leur travail. Je tiens également à souligner la contribution des personnes qui assistent à chaque année en grand nombre et qui contribuent par leur participation à assurer le succès de notre événement.

Yves Castonguay, président,  
Comité Plantes Fourragères du CRAAQ

## TABLE DES MATIÈRES

1- La caractérisation et la distribution des endophytes du panic érigé ( <i>Panicum virgatum</i> ) <u>François Gagné-Bourque</u> .....	4
2- Le millet perlé et le sorgho sucré pour produire une sève sucrée et un sous-produit fourrager <u>Amélia Bernardes</u> .....	7
3- Vocation fourragère du millet perlé sucré cultivé au Saguenay–Lac-Saint-Jean. <u>Hélène Brassard</u> .....	11
4- Ensilages de sorgho sucré pour les vaches laitières. Somaia Amer .....	20
5- Valorisation des fourrages: Un outil de diagnostic à la ferme. <u>Marie-Christine Coulombe</u> ....	21
6- Vers l'amélioration de la luzerne pour la production du bioéthanol. <u>Marc-Olivier Duceppe</u> .	29
7- Exploiter la variabilité génétique de la luzerne pour la production de biocarburants. <u>Marie-Pier Dubé</u> .....	33
8- Le séchage artificiel de foin avec l'énergie solaire et la biomasse. <u>René Morissette</u> .....	35
9- Utilisation d'une remorque autochargeuse pour la récolte de fibres de maïs. <u>Pierre-Luc Lizotte</u> .....	45

# LA CARACTÉRISATION ET LA DISTRIBUTION DES ENDOPHYTES DU PANIC ÉRIGÉ (*PANICUM VIRGATUM*)

FRANCOIS GAGNÉ-BOURQUE<sup>1</sup>, SUHA JABAJI<sup>1</sup>, PHILIPPE SEGUIN<sup>1</sup>, ROGER SAMSON<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of plant science, McGill University, Macdonald campus, 21 111 Lakeshore road, Saint-Anne-de-Bellevue, H9X 3V9. <sup>2</sup> REAP-Canada, 21 111 Lakeshore road, Saint-Anne-de-Bellevue, H9X 3V9

Courriel: francois.gagne-bourque@mail.mcgill.ca

---

## Mise en contexte

L'intérêt pour les biocarburants a augmenté, dans les dernières années, avec la recherche de sources d'énergie vertes et renouvelables pour remplacer les énergies fossiles de plus en plus dispendieuses ainsi que pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il est connu que les plantes dont les plantes vivaces peuvent capturer et emmagasiner, de façon efficace, l'énergie solaire en biomasse par la photosynthèse. En 1985, les États-Unis ont entrepris un programme de cinq ans pour identifier et développer les meilleures plantes vivaces herbacées bioénergétiques(1). Le panic érigé (*Panicum vergatum* L.) a été identifié comme un modèle de plantes herbacées bioénergétiques.

Le panic érigé est une plante vivace pouvant être productive pendant plusieurs dizaines d'années. De plus, le panic érigé possède une gestion des ressources édaphiques très efficace lui permettant de faire beaucoup avec peu, il possède une bonne capacité d'adaptation sur les sols marginaux. Cette importante caractéristique permet au panic érigé de ne pas être en compétition avec les autres cultures commerciales (destinées à la consommation humaine et animale) pour l'utilisation des bonnes terre agricoles. Des études canadiennes (2) ont prouvé que le panic érigé est très bien adapté et a la capacité d'être très productif au Québec et en Ontario. Une autre étude (3) a déterminé que le panic érigé possède une excellente balance énergétique, il requiert peu d'intrants pour un très faible coup de production. De plus, il permet d'augmenter le niveau de matière organique dans les sols.

En 2008, on estimait qu'entre trente-sept et cinquante entreprises au Québec produisaient quatre cent cinquante hectares de panic érigé. En 2010, ce compte est passé à cent seize entreprises ayant une superficie en production de huit cent seize hectares ce qui démonte un intérêt grandissant pour cette culture (4). La biomasse produite sert principalement dans la production de granule de chauffage ainsi que comme litière pour les productions animales.

Près de la totalité des plantes vasculaires étudiées pour démontrer la présence d'endophytes ont révélé qu'elles possédaient soit: des champignons et/ou des bactéries endophytiques (5,6). Ces organismes ont développé une relation de mutualiste avec leur plante hôte. Les deux parties bénéficient de cette interaction (7). Dans le cas des graminées, les endophytes interagissent avec un nombre de microorganismes dans le sol, les feuilles, les tiges, les racines et parfois même les graines des plantes. Les endophytes colonisent l'intérieure de la plante obtenant nutrition et protection de la part de l'hôte. En retour, les endophytes confèrent généralement une plus grande vitalité à la plante hôte en la protégeant contre les sécheresses, les maladies fongiques et bactériennes à l'aide de métabolites, en amplifiant les traits agronomiques supérieures de la plante, en augmentant le niveau de photosynthèse

ainsi qu'en alliant un effet répulsif prononcé sur la prédation des herbivores par la production de certains alcaloïdes (7,8). Nous pensons donc pouvoir améliorer les qualités agronomiques du panic érigé en réintroduisant différents endophytes, isolés à partir d'autres plants et/ou cultivars de panic érigé.

Ce projet de recherche a pour but d'ajouter un nouveau outil au group REAP Canada qui travaille depuis maintenant 15 à effectuer de la sélection génétique de panic érigé.

## **Objectifs et méthodologie**

Le premier objectif de ce projet est d' :

- i. Étudier la distribution des endophytes dans la partie aérienne du panic érigé en déterminant les différents endophytes présent (champignons et bactéries). Pour réaliser cet objectif, on analysera la fréquence de ces différents organismes dans plusieurs sites au Québec et en Ontario. Cet objectif sera réalisé en utilisant des techniques de stérilisation de surfaces des tissus, suivi de l'isolation des différents endophytes sur des médias de cultures spécifiques. Lorsque les organismes seront isolés, la région située entre le gène 18S rRNA et le gène 28S rRNA (via les séquences d'amorce générique ITS1f/4) (9) sera amplifiée pour l'identification des champignons et la région 16S rRNA (via les séquences d'amorce 27f/1492R) (11) sera amplifiée pour les bactéries. Ces régions seront séquencées et utilisées pour l'identification en comparant le pourcentage d'homologie de la séquence avec la base de donnée de GenBank®.
- ii. À l'aide de la séquence obtenue, il sera possible de développer des séquences d'amorces spécifiques qui permettront de faciliter et d'augmenter de beaucoup la précision de nos observations pour réaliser notre premier objectif. Ces séquences seront aussi très utiles pour contrôler l'exactitude du deuxième objectif de notre étude.

Le second objectif est de :

Réintroduire dans le panic érigé certains endophytes sélectionnés pour leurs propriétés avantageuses sous forme de bio-inoculant dans l'optique d'évaluer leur impact sur l'augmentation de la résistance face, entre autre: à la sécheresse, aux herbivores, aux maladies, à l'augmentation de la production. Les critères de sélection des endophytes pour réintroduction seront validés en fonction de leurs réponses en test in vitro. Les différents endophytes seront mis en contacts avec différents pathogènes afin d'évaluer leur potentiel effet antifongique. Nous baserons également nos sélections sur la littérature spécifique à chaque endophyte.

## **Résultats**

Quatre différents cultivars de panic érigé ont été échantillonnés. Pour chacun de ces cultivars deux différents phénotypes (grande et petite) ont été identifiés. L'échantillonnage a été effectué lors des saisons 2009 et 2010. De ces échantillons, vingt-un différents champignons et vingt-un différentes bactéries ont été isolés dans les feuilles du panic érigé.

À ce jour, quatre de ces bactéries ont été séquencées et identifiées; *Microbacterium testaceum*, *Curtobacterium flaccumfaciens*, *Bacillus subtilis* et *Serratia marcescens*. Ces résultats sont encourageant et confirment notre méthode d'isolation car les quatre bactéries isolées sont des endophytes connus dans d'autres espèces végétales. (11) Certaines de ces bactéries (e.g., *Bacillus* et *Serratia*) ont même déjà été utilisées comme bio fongicide dans le traitement de certaines maladies fongiques. Des tests in vitro, nous ont permis de confirmer la nature antifongique de certaines de nos bactéries. Ces bactéries sont présentement testées pour trouver les métabolites responsables et ainsi prouvées leur nature antifongique.

À l'aide des différentes séquences d'amorce et PCR nous avons pu confirmer que les endophytes utilisent les graines comme vecteur pour passer d'une génération à l'autre. Pour cela, nous avons simplement récolté des plantes en graine, testé le plan mère, certaine des graines produites et les plants suivant la germination des autres graines. Cela nous a permis de démontrer que l'utilisation d'endophytes pour augmenter la valeur agronomique des plantes est une solution simple et efficace à long terme.

L'identification des différents endophytes vivant en symbiose avec le panic érigé et le développement d'une technique de colonisation des endophytes dans la plante hôte permettra d'améliorer les qualités agronomiques du panic érigé. Cela permettra aussi de développer des variétés adaptées à différentes conditions de sols, de température, de niveau de précipitation, en autre. Cette plus grande versatilité et efficacité contribuera à l'établissement du panic érigé comme culture commerciale pour les biocarburants.

### **Bibliographie :**

1. **Samson, R.** 1991. Switchgrass: A living solar battery for the prairies. Sustainable Farming. Fall 1991. 4-6.
2. **McLaughlin, S. & Kszos, L.** 2005. Biomass and Bioenergy. 28: 515-535.
3. **Samson, R. et al.** 1997. Technology evaluation and development of short rotation forestry and switchgrass for energy production. Final report by REAP-Canada to the Bioenergy Development Program, Natural Resources Canada, Ottawa, Ont. 218 pp.
4. **Martel, H.,** 2010. Personnel communication, not published.
5. **Stone Jk et al.** 2000. Microbial endophytes. Pp.3-30.
6. **Rosenbleuth & Martinez-Romero.** 2006. MPMI. 19: 827-837.
7. **Carol, GC.** 1992. Mycology 9:327-354.
8. **Schultz. B. & Boyle C.** 2005. Mycol. Rev. 109:661-686.
9. **Schardl C.L. et al.** 2004. Ann. Rev. Plant Biol. 55:315-340
10. **White, T.J. et al.** 1990. Analysis of phylogenetic relationships by amplification and direct sequencing of ribosomal RNA genes. In PCR Protocols: a Guide to Methods and Applications. Innis, M.A., Gelfand, D.H., Sninsky, J.J., and White, T.J. (eds). New York: Academic Press, pp. 315-322.
11. **Adhikari, T.B., et al.** 2001. Evaluation of bacteria isolated from rice for plant growth promotion and biological control of seedling disease of rice. Canadian Journal of Microbiology. 47(10) :916-924

# LE MILLET PERLÉ ET LE SORGHO SUCRÉS POUR PRODUIRE UNE SÈVE SUCRÉE ET UN SOUS-PRODUIT FOURRAGER

AMÉLIA BERNARDES<sup>1</sup>, ANNE VANASSE<sup>1</sup>, GAËTAN TREMBLAY<sup>2</sup>, GILLES BÉLANGER<sup>2</sup>, PHILIPPE SEGUIN<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, Université Laval, 2425 rue de l'Agriculture, Québec, QC, G1V 0A6;

<sup>2</sup>Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et grandes cultures, 2560 boulevard Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3

<sup>3</sup>Département des sciences végétales, Campus Macdonald, Université McGill, 21 111 Lakeshore road, Sainte-Anne-de-Bellevue, H9X 3V9

Courriel : amelia.dos-passos-bernardes.1@ulaval.ca

---

## Introduction

Le sorgho et le millet perlé sucrés possèdent un rendement élevé en biomasse, variant entre 10 et 21 t MS/ha pour le sorgho sucré et 12 à 17 t MS/ha pour le millet perlé sucré, ainsi qu'une bonne tolérance à la sécheresse et aux sols peu fertiles (Andrews et Kumar, 1992). Ces deux cultures annuelles peuvent être considérées comme étant à double vocation, soit pour la production d'une sève sucrée pouvant servir à la production d'éthanol et pour la production d'un sous-produit fourrager obtenu après extraction de la sève et utilisé dans l'alimentation des bovins de boucherie. Certaines études ont démontré que le sorgho sucré avait un potentiel de production de 8000 L d'éthanol/ha, soit environ le double de celui du maïs (Hunter et Anderson, 1997; Bennet et Anex, 2009). Ces cultures permettraient un certain équilibre entre la production alimentaire et énergétique, évitant ainsi la concurrence des terres tout en offrant une diversification des revenus aux producteurs agricoles.

Le moment de récolte a une grande influence sur la production et la qualité de la biomasse du millet perlé et du sorgho sucrés. Les travaux de Leblanc et coll. (2008) ont montré que les récoltes effectuées de la fin août jusqu'à la fin septembre entraînent une augmentation du rendement en biomasse et en sucres, tandis que celles effectuées au début du mois d'août permettent d'obtenir un fourrage de meilleure valeur nutritive.

Dans cette étude, nous avons comparé les effets de l'espèce et de la date de récolte sur le rendement de même que sur la valeur nutritive du fourrage et du sous-produit fourrager obtenu après extraction de la sève.

## Matériel et méthodes

Cet essai a été réalisé à deux sites, soit à Saint-Augustin-de-Desmaures (Saint-Augustin) avec 2300 à 2500 UTM et à Sainte-Anne-de-Bellevue (Sainte-Anne) avec 2900 à 3100 UTM au cours de l'été 2010. Les cultures de millet perlé et de sorgho sucrés ont été ensemencées au début de juin, à un espacement entre les rangs de 18 cm et à une dose de semis de 10 kg ha<sup>-1</sup> sur un sol léger avec une fertilisation azotée de 100 kg N/ha. Un arrangement factoriel de traitements a été

étudié : 2 espèces fourragères (millet perlé et sorgho sucrés) et 2 dates de récolte (mi-août et au début-septembre pour le site de Saint-Augustin et fin-août et mi-septembre pour le site de Sainte-Anne). Le dispositif expérimental au champ était un plan en tiroir avec les espèces fourragères en parcelles principales et les dates de récolte en sous-parcelles avec 3 répétitions. Le hachage a été effectué à l'aide d'une fourragère à maïs, alors que le pressage a été effectué à l'aide d'une presse de type CP8 (Vincent Corporation, Tampa, Floride). Des échantillons de fourrage (250 g) ont été prélevés avant et après le pressage puis chauffés au four micro-ondes pendant 1 minute afin d'arrêter d'éventuelles activités enzymatiques (Pelletier et coll., 2010). Ces échantillons ont ensuite été séchés à 55°C pendant 48 heures et moulus à 1 mm. Les échantillons de fourrage ont été analysés pour leurs concentrations en sucres solubles totaux (Suzuki, 1971 avec modifications), en protéine brute (PB), en fibres ADF et NDF (Mertens, 2002), de même que pour leur digestibilité *in vitro* de la MS (DIVMS) et leur digestibilité *in vitro* de la fibre NDF (dNDF; Goering et Van Soest, 1970).

## Résultats et discussion

### *Sorgho vs. millet perlé*

Les rendements moyens en biomasse des deux espèces étaient similaires (14,9 t MS/ha) à Saint-Augustin. À Sainte-Anne, cependant, le rendement moyen du millet perlé sucré (25,8 t MS/ha) était significativement ( $P < 0,05$ ) plus élevé que celui du sorgho sucré (16,3 t MS/ha). De faibles densités de peuplement du sorgho sucré ont été observées à ce dernier site.

Le fourrage de sorgho sucré était de meilleure valeur nutritive que celui de millet perlé sucré à Sainte-Anne. En moyenne pour les deux dates de récolte, la DIVMS (76,8 vs. 72,6 % MS) et la teneur en sucres (25,5 vs. 11,9 % MS) étaient significativement plus élevées, alors que les teneurs en fibres ADF (37,6 vs. 43,9 % MS) et NDF (56,8 vs. 65,0 % MS) étaient plus faibles pour le sorgho sucré que pour le millet perlé sucré. À Saint-Augustin, le fourrage de sorgho sucré avait des teneurs en fibres ADF (37,3 vs. 41,3 % MS) et NDF (59,6 vs. 65,6 % MS) inférieures et une teneur en sucres (21,1 vs. 11,9 % MS) plus élevée que celui de millet perlé sucré.

La valeur nutritive du sous-produit fourrager, obtenu après extraction de la sève par pressage, était aussi supérieure pour le sorgho sucré que pour le millet perlé sucré, et ce, seulement à Sainte-Anne. En moyenne pour les deux dates de récolte, la DIVMS (67,9 vs. 66,4 % MS) et les teneurs en sucres (11,6 vs. 7,7 % MS) et en PB (6,2 vs. 5,9 % MS) étaient effectivement plus élevées alors que les teneurs en fibres ADF (48,0 vs. 49,3 % MS) et NDF (74,3 vs. 75,7 % MS) étaient plus faibles dans le sous-produit fourrager de sorgho sucré que dans celui de millet perlé sucré. À Saint-Augustin, il n'y avait pas de différence significative dans la valeur nutritive du sous-produit fourrager des deux espèces.

### *Dates de récolte*

Les rendements en biomasse du millet perlé et du sorgho sucrés étaient plus élevés à la récolte plus tardive. À Saint-Augustin, le fait de retarder la récolte de la mi-août jusqu'au début de septembre a permis d'obtenir une augmentation de rendement de 43% dans le millet perlé sucré alors que le rendement du sorgho a pratiquement doublé. À Sainte-Anne, les augmentations de



rendement entre les récoltes faites à la fin-août et la mi-septembre étaient de 42% dans le millet perlé sucré et de 35% dans le sorgho sucré.

Une récolte plus tardive a causé une baisse de la DIVMS (79,0 vs. 76,4 % MS) et de la teneur en PB (8,8 vs. 6,9 % MS) du fourrage à Saint-Augustin. À Sainte-Anne, elle a causé une baisse de la dNDF (61,2 vs. 55,5 % NDF) et des teneurs en PB (8,3 vs. 6,5 % MS) et en NDF (65,3 vs. 56,6 % MS;  $P = 0.08$ ) du fourrage.

L'effet de la date de récolte sur la valeur nutritive du sous-produit fourrager a été plus marqué à Sainte-Anne qu'à Saint-Augustin. À Saint-Augustin, la dNDF (63,9 vs. 60,0 % NDF;  $P = 0,08$ ) de même que la teneur en PB (7,1 vs. 5,7 % MS;  $P = 0,09$ ) du sous-produit fourrager étaient plus faibles au début de septembre qu'à la mi-août. À Sainte-Anne, la dNDF (57,8 vs. 54,5 % NDF), les teneurs en fibres ADF (50,8 vs. 46,6 % MS) et NDF (78,6 vs. 71,4 % MS) et en PB (6,6 vs. 5,6 % MS;  $P = 0.10$ ) étaient plus faibles alors que les teneurs en sucres (5,3 vs. 14,0 % MS) du sous-produit fourrager étaient plus élevées à la mi-septembre qu'à la fin août.

#### *Fourrage vs. sous-produit fourrager*

La valeur nutritive du sous-produit fourrager, obtenu après extraction de la sève par pressage, était inférieure à celle du fourrage. En moyenne pour les deux sites, les deux espèces et les deux dates de récolte, la digestibilité de la MS (- 7,0 unités de %) et de la fibre NDF (- 2,4 unités de %) de même que les teneurs en sucres (- 8,4 unités de %) et en PB (- 1,8 unité de %) étaient plus faibles alors que les teneurs en fibres ADF (+ 7,4 unités de %) et NDF (+ 13,8 unités de %) étaient plus élevées dans le sous-produit fourrager que dans le fourrage.

### **Conclusions**

Dans le cadre de cette étude, le rendement du millet perlé sucré était supérieur à celui du sorgho sucré à un des deux sites. La valeur nutritive, incluant la teneur en sucres, du fourrage et du sous-produit fourrager était supérieure pour le sorgho sucré que pour le millet perlé sucré. La récolte de ces deux espèces effectuée en août permet d'obtenir un fourrage de meilleure valeur nutritive que celle effectuée en septembre. Les concentrations en ADF et en NDF du fourrage de sorgho et de millet perlé sucrés récoltés en août-septembre pourraient être comparables à celles d'un foin de graminées pérennes récolté à maturité (ADF > 38% MS; NDF = 67 % MS; PB = 11% MS). Bien que la valeur nutritive des sous-produits fourragers (ADF = 47% MS; NDF = 76 % MS; PB = 8% MS; Sucres = 9% MS) soit moins élevée que celle des fourrages, ils pourraient toujours servir à l'alimentation animale et des essais sont en cours pour déterminer l'ensilabilité de ces sous-produits fourragers.

### **Liste des ouvrages cités**

- Andrews, D.J. et K.A. Kumar. 1992. Pearl millet for food, feed and forage. Adv. Agron. 48: 89-139.
- Bennett, A.S. et R.P. Anex. 2009. Production, transportation and milling costs of sweet sorghum as a feedstock for centralized bioethanol production in the upper Midwest. Bioresour. Technol. 100, 1595-1607.
- Andrews, D.J. et K.A. Kumar. 1992. Pearl millet for food, feed and forage. Adv. Agron. 48: 89-139.

- Goering, H.K et P.J. Van Soest. 1970. Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures and some applications). Agriculture Handbook No. 379. ARS-USDA. Washington. DC. 22p.
- Hunter, E.L. et I.C. Anderson. 1997. Sweet sorghum. *Hortic. Rev.* 21, 73-104.
- Leblanc, V., G. Bélanger, P. Seguin et A. Vanasse. 2008. Biomass yield and sugar concentration of sweet pearl millet as influenced by fertilization and harvest date. Joint meeting of the CSA, CSHS and NEBCSA. Plants and Soil: Montreal'08. July 13-16, 2008.
- Mertens, D.R. 2002. Gravimetric determination of amylase-treated neutral detergent fiber in feeds with refluxing in beakers or crucibles: collaborative stud. *J. Assoc. Off. Assoc. Chem. Int.* 85: 1217-1240.
- Pelletier, S., G.F. Tremblay, A. Bertrand, G. Bélanger, Y. Castonguay et R. Michaud. 2010. Drying procedures affect non-structural carbohydrates and other nutritive value attributes in forage samples. *Anim. Feed Sci. Technol.* 1-12.
- Suzuki, M. 1971. Semi-automatic analysis of the total available carbohydrates in alfalfa roots. *Can. J. Plant Sci.* 51: 184-185.

# **VOCATION FOURRAGÈRE DU MILLET PERLÉ SUCRÉ CULTIVÉ AU SAGUENAY-LAC-ST-JEAN**

HÉLÈNE BRASSARD , XAVIER DESMEULES

Agrinova (siège social), 640, rue Côté Ouest, Alma (Québec) G8B 7S8  
Courriel : helene.brassard@agrinova.qc.ca

---

## **INTRODUCTION**

Le millet perlé est une plante originaire d’Afrique ayant un métabolisme en C4. Il possède donc une grande efficacité photosynthétique et il est très résistant aux conditions de sécheresse. Cette culture annuelle est utilisée comme plante fourragère, étant donné son rendement très élevé, sa bonne teneur en protéines et la possibilité d’en faire plusieurs coupes par année (régie multicutée). Récemment, de nouveaux hybrides ayant une teneur élevée en sucre dans les tiges, donc très appétant pour le bétail, ont été développés en Ontario par Agriculture Environmental Renewal Canada Inc. (AERC Inc.). Au Québec, la culture du millet perlé sucré (MPS) nécessite d’être validée dans une optique de production d’éthanol et d’alimentation bovine, et ce, particulièrement dans les régions à faibles unités thermiques maïs (UTM).

La biomasse du MPS a plusieurs vocations. Elle peut être destinée à l’enfouissement en engrais vert. Une telle régie est particulièrement intéressante dans la production de pommes de terre, car l’intégration du millet perlé dans la rotation de cultures réduit les populations de nématodes des lésions, un agent pathogène important pour cette production. Elle permet également d’apporter de la matière organique au sol ainsi qu’une meilleure protection contre l’érosion. Par contre, le principal usage du MPS est pour l’affouragement, comme fourrage annuel d’appoint pour les productions laitière et bovine. Le fourrage directement récolté peut être conservé en ensilage sous forme de balles rondes ou dans un silo. Si la teneur en sucre du MPS est suffisamment élevée, la biomasse pourrait être pressée pour en extraire la sève qui serait ensuite convertie en éthanol. Le fourrage résiduel pourrait ensuite être utilisé pour alimenter les bovins de boucherie. La biomasse pressée pourrait également être retournée au sol pour l’enrichir en matière organique. La technologie visant à optimiser les procédés de pressage fait présentement l’objet de recherches au Québec.

Le MPS est performant en sol sableux et bien drainé, mais pour donner l’opportunité aux entreprises agricoles qui n’ont pas ce type de sol, la culture du sorgho sucré (SS) semble une alternative intéressante, car il peut être cultivé autant sur des sols légers que lourds. Lors de saisons où les conditions météorologiques sont mauvaises (températures froides, précipitations abondantes, etc.), le SS risque donc de mieux performer. Le SS est également une plante en C4 qui peut être utilisée comme culture fourragère d’appoint, mais contrairement au MPS, on ne peut en récolter qu’une seule coupe par année (AERC Inc.).

Divers travaux de recherche réalisés depuis le début des années 2000 ont permis d’optimiser certains paramètres de production du MPS, dont le rendement en biomasse et la qualité fourragère. En effet, le MAPAQ de l’Outaouais, en collaboration avec le Centre de recherche et

de développement technologique agricole de l'Outaouais (CREDÉTAO), a mené des essais préliminaires sur le MPS. Les résultats ont fait ressortir son excellent potentiel de rendement en biomasse (60 à 80 t humide/ha) et la possibilité de produire 3 100 l/ha de bioéthanol, si l'on considère une teneur moyenne en sucre de 16 % (Clément et coll., 2008). Des travaux de recherche ont également été menés, en 2007 et 2008, par l'Université Laval, pour préciser les espacements et les doses de semis permettant de maximiser la biomasse produite (Bouchard et coll., 2011), ainsi que pour déterminer l'effet de la fertilisation (azotée et potassique) et des dates de récolte sur le rendement en sucre et la valeur nutritive du fourrage.

Actuellement, au Saguenay–Lac-St-Jean, il existe un fort potentiel pour le secteur des bioénergies. À titre d'exemple, la filière des biocarburants fait partie des axes de développement de la Coopérative agroalimentaire Nutrinor. Avec sa division des produits pétroliers (Sonic), Nutrinor distribue plusieurs millions de litres d'essence d'éthanol annuellement et projette approvisionner ses stations Sonic grâce à une production régionale de biocarburants. Pour développer la production de biocarburants régionale et, ainsi, sécuriser une partie de son approvisionnement, Nutrinor s'intéresse au bioéthanol produit à partir de cultures à taux élevés en sucre, comme le MPS et le SS, puisque ce type de plante semble démontrer un bon potentiel de production en éthanol.

## **MÉTHODOLOGIE**

Afin de vérifier le potentiel de rendement en biomasse fourragère et la teneur en sucre du MPS dans la région du Saguenay–Lac-St-Jean, la Coopérative agroalimentaire Nutrinor a mis en branle, en 2009 et 2010, la réalisation d'un projet en champ. Ce projet, mené par Agrinova, a été réalisé grâce à la participation financière de La Coop fédérée et de la Direction régionale du MAPAQ. Pour chacune des deux années d'expérimentations, quatre sites d'essais ont été étudiés, soit deux en production laitière ou bovine et deux en production de pommes de terre. Au site d'Alma, le SS a également été expérimenté en 2010. La description des principales parcelles d'essais à l'étude est présentée au tableau 1.

Un protocole d'essais a été établi par Agrinova afin de s'assurer que les sites sélectionnés respectent les éléments de régie de cultures qui permettent d'optimiser le rendement en biomasse, la teneur en sucre et la qualité du fourrage. Les principaux aspects du protocole d'essais étaient les méthodes culturales relatives au semis du MPS et du SS, à la fertilisation, au contrôle des mauvaises herbes et à la récolte. Les travaux de recherche menés par le MAPAQ de l'Outaouais et l'Université Laval, ainsi qu'un protocole d'essais de cultures élaboré par M. Marc-F. Clément, ont servi à établir ce protocole. L'expertise de M. Pierre Bélanger (Bélanger Agro-Consultant inc.) a également été mise à profit pour mettre à jour les éléments de régie de ces cultures.

Sur chacune des parcelles d'essais, l'hybride CSSPM-7 de MPS a été semé et sur le site d'Alma, l'hybride CSSH-45 de SS a été semé. Pour ce site, la moitié de la parcelle en MPS a été régie à deux coupes de fourrages et l'autre moitié a été soumise à une régie d'une coupe en fin de saison de croissance. Les parcelles d'essais ont été suivies aux différents stades de développement de la culture, jusqu'au stade de maturité à la récolte. Chaque hybride à l'étude a été suivi sur quatre quadrats d'une dimension de 25 m<sup>2</sup> chacun, et ce, pour chaque parcelle. Des données ont été recueillies en ce qui concerne l'efficacité de la levée, la population et la hauteur des plants, le

regain suite à la première coupe, la verse, ainsi que la présence de mauvaises herbes, de maladies et d'insectes ravageurs.

**Tableau 1. Description des principaux sites à l'étude**

Site		Alma	Laterrière	Péribonka	Saint-Ambroise
<b>Superficie de la parcelle expérimentale</b>		1,22 ha (MPS) 0,9 ha (SS)	1,6 ha	2,0 ha	1,3 ha
<b>Type de sol</b>		Loam et loam argileux	Loam à loam sableux graveleux	Sable fin et terre noire sur sable	Loam sableux
<b>Fertilité</b>	pH eau	6,1	6,5	5,4	6,2
	pH tampon	6,6	6,7	5,8	6,2
	P (kg/ha)	53	36	219	59
	K (kg/ha)	432	256	287	371
	Mg (kg/ha)	333	124	223	nd
	% M.O.	7,2	9,6	11,5	7,2
	Ca (kg/ha)	4 310	5 320	2 230	nd
	Al (ppm)	1 640	1 890	2 110	nd
<b>Précédent culturel</b>		Pâturage	Canola	Pomme de terre	Pomme de terre
<b>Contrôle des mauvaises herbes vivaces</b>		Traitement au Round Up (glyphosate) à l'automne 2009 et labour par la suite	Traitement au Liberty Link (glyphosynate) en postlevée de la culture précédente	Peu de mauvaises herbes vivaces	Peu de mauvaises herbes vivaces
<b>Contrôle des mauvaises herbes l'année du semis</b>		- Faux semis - Traitement herbicide en postlevée pour réprimer les feuilles larges annuelles			
<b>Vocation de la biomasse</b>		Fourragère	Fourragère	Engrais vert	Engrais vert
<b>Date de semis</b>		28 mai	31 mai	4 juin	31 mai
<b>Taux de semis</b>		10,6 kg/ha (MPS) 16,3 kg/ha (SS)	10,7 kg/ha	10,4 kg/ha	11 kg/ha

nd : information non disponible.

### **Évaluation du rendement, de la teneur en sucre et de la valeur alimentaire des fourrages**

Avant la récolte des parcelles d'essais, c'est-à-dire au moment de la prise de rendements, la hauteur des plants, l'indice de verse de la culture (échelle des céréales à paille : 0-9) et le coefficient de tallage (talles/plant) ont été évalués. La prise de rendements de la première coupe a été effectuée lorsque la plante a atteint 70-80 cm de hauteur (vers la fin juillet). Pour la coupe en fin de saison de croissance, le rendement a été évalué lorsque la culture a atteint son plein potentiel de maturité, c'est-à-dire juste avant le risque de gel mortel qui se situe généralement dans la première semaine de septembre au Saguenay-Lac-St-Jean.

Pour les parcelles en MPS, l'évaluation du rendement a été effectuée sur chacun des quatre quadrats de suivi, en récoltant, sur une surface de 1 m<sup>2</sup> et à quatre reprises, la totalité de la biomasse aérienne de la plante (total de 4 m<sup>2</sup> par quadrat de suivi), et ce, selon la méthode de prise de rendements de La Financière agricole du Québec. Pour la régie à deux coupes, 15 cm de tige ont été conservés à la première coupe afin d'assurer la repousse. La biomasse a ensuite été pesée directement au champ afin de ne pas influencer la teneur en eau du fourrage récolté. Pour la parcelle en SS située au site d'Alma, l'évaluation du rendement a plutôt été faite lors de la récolte du fourrage sur toute la surface de la parcelle d'essais. Cette parcelle a été fortement sujette à la verse, faisant en sorte que le fauchage par le producteur agricole a été effectué avant que l'évaluation du rendement, selon la méthode de La Financière agricole du Québec, n'ait lieu.

La teneur en sucre de la culture a été estimée à l'aide d'un réfractomètre. Cet instrument de mesure utilise des principes optiques pour estimer la concentration d'une solution; l'indice de réfraction est une mesure indirecte de la teneur en sucre soluble. Le réfractomètre donne donc une approximation de la teneur en sucre soluble par l'évaluation en degré Brix, et la valeur relative obtenue peut être utilisée à titre comparatif. Les mesures ont été prises entre le troisième et le quatrième nœud des tiges de MPS et de SS, selon un échantillon représentatif de cinq plants par quadrat de suivi (total de 20 plants par parcelle expérimentale), et ce, une fois par semaine de la mi-août jusqu'à la récolte.

Des échantillons représentatifs de fourrages ont été prélevés au moment de la récolte sur chaque parcelle, afin d'y effectuer une analyse standard de valeur alimentaire. Le fourrage frais a été haché à l'aide de cisailles et un échantillon composite d'un peu plus de 100 grammes, représentant l'ensemble des quatre quadrats, a été prélevé. Dans le cas du SS, l'échantillon a été prélevé directement sur les balles rondes de fourrage fraîchement récolté à l'aide d'une sonde d'échantillonnage. Les échantillons récoltés ont été congelés et envoyés au laboratoire Agridirect.

## **RÉSULTATS ET DISCUSSION**

En 2009, de mauvaises conditions météorologiques (printemps froid et pluvieux) ainsi qu'une sécheresse lors de la période de germination ont engendré un retard de croissance, faisant en sorte qu'une seule coupe du MPS a pu être effectuée. Contrairement à l'année 2009, les conditions météorologiques de la saison de croissance 2010 ont été très favorables à la culture du MPS et du SS. Le potentiel d'accumulation de chaleur pour la région a été considérablement augmenté en 2010. En effet, les degrés-jours accumulés aux quatre sites d'essais pendant la saison 2010, ainsi que les UTM, ont été supérieurs à la moyenne de 1996-2005 (Agrométéo Québec). La moyenne des UTM pour les sites d'essais était de 2 057, alors que généralement, les UTM de la région varient de 1 700 à 2 000 et ce, 8 années sur 10. En 2010, l'établissement de la culture et le démarrage de la croissance du MPS n'ont donc pas été retardés par le manque de chaleur, comme ce qui s'est produit en 2009. Deux coupes ont pu être effectuées pour le site d'Alma. Malgré l'accumulation de chaleur élevée lors du semis, le manque d'humidité au sol a, par contre, retardé la germination, faisant en sorte que la levée a été généralement tardive et inégale. Ceci a grandement nui à l'obtention de rendement optimal.

## Bon potentiel de rendement

Au Saguenay–Lac-St-Jean, contrairement à 2009, la saison de croissance 2010 a permis de démontrer un bon potentiel de rendement en biomasse du MPS, mais ce, uniquement si l'établissement et la croissance de la culture sont efficaces (voir tableaux 2 et 3). Ce potentiel de rendement élevé est cependant relié à une accumulation de chaleur supérieure à la moyenne.

Le MPS est cultivé dans la région de l'Outaouais depuis plusieurs années et les superficies consacrées à cette culture y sont importantes. À titre comparatif, il est donc approprié de se référer aux données météorologiques associées à la station de Maniwaki, la municipalité de la Vallée de la Gatineau au nord de laquelle les UTM se rapprochent le plus de celles du Saguenay–Lac-St-Jean. Pour les besoins de la comparaison, le calcul des degrés-jours de croissance effectué avec une valeur seuil de 10 °C (degrés-jours base 10) semble plus approprié que la valeur référence de 5 °C, puisque le MPS et le SS nécessitent plus de chaleur que les céréales et les plantes fourragères pour démarrer leur croissance et pour parvenir à maturité. L'accumulation moyenne des degrés-jours de croissance a donc été de 881 en 2010 et de 687 en 2009 pour les quatre sites du Saguenay–Lac-St-Jean, alors qu'à Maniwaki, les degrés-jours base 10 étaient de 1 050 en 2010 et de 769 en 2009. Le rendement moyen obtenu en 2010 pour les quatre sites d'essais du Saguenay–Lac-St-Jean s'élevait à 8,7 t m.s./ha, alors que selon le Réseau des plantes bio-industrielles du Québec (RPBQ), le rendement moyen obtenu dans les sites situés au nord de Maniwaki s'élevait à 7,7 t m.s./ha. Le potentiel de rendement en biomasse du MPS est donc fortement relié au potentiel d'accumulation de chaleur pour une région donnée.

**Tableau 2. Résumé des résultats obtenus aux sites en production laitière**

Paramètre	2009	2010	
Site	Alma	Alma	Laterrière
Degrés-jours (Base 10)/UTM	712/1 940	900/2 108	954/2 224
Efficacité de la levée	Levée très inégale	Levée très uniforme	Levée inégale
Hauteur des plants (feuilles étendues)	126 cm	137 cm à la 1 <sup>ère</sup> coupe	206 cm à la coupe en fin de saison
		116 cm à la 2 <sup>e</sup> coupe	
		230 cm à la coupe en fin de saison	
Indice de verse	0 à 1 (très faible)	0 à 3 (faible)	3 (faible)
Teneur en sucre	5 % Brix	9,7 % Brix	5,9 % Brix
Rendement en biomasse	2,4 t m.s./ha	3,5 t m.s./ha à la 1 <sup>ère</sup> coupe	7,7 t m.s./ha
		5,1 t m.s./ha à la 2 <sup>e</sup> coupe	
		13,8 t m.s./ha	

**Tableau 3. Résumé des résultats obtenus aux sites en production de pommes de terre**

Paramètre	2009		2010	
Site	Péribonka	Saint-Ambroise	Péribonka	Saint-Ambroise
Degrés-jours (Base 10)/UTM	643/1 696	656/1 827	823,6/1 928	846/1 967
Efficacité de la levée	Levée tardive et inégale			
Hauteur des plants (feuilles étendues)	135 cm	107 cm	164 cm	213 cm
Indice de verse	0 (nul)	0 (nul)	1 à 5 (faible à moyen)	6 à 7 (élevé)
Teneur en sucre	5,2 % Brix	4,3 % Brix	5,8 % Brix	4,3 % Brix
Rendement en biomasse	2,9 t m.s./ha	2,4 t m.s./ha	7,8 t m.s./ha	5,9 t m.s./ha

### Vocation fourragère du millet perlé sucré cultivé en régions à faibles UTM

Si on se réfère aux résultats de 2009 et 2010, la biomasse de MPS cultivée en région plus froide semble d'excellente qualité lorsque la région est dédiée à la vocation fourragère (voir tableau 4). En effet, selon le Guide des plantes fourragères (CRAAQ), la qualité du MPS provenant des échantillons frais récoltés en 2010 est classée excellente en termes de digestibilité pour la première coupe, alors que pour la deuxième coupe, la digestibilité est de classe 1. Pour la coupe en fin de saison de croissance, la digestibilité du MPS est de classe 1 pour les échantillons de 2009 et de classe 2 pour ceux de 2010. De façon générale, l'énergie nette des échantillons de fourrage frais prélevés était supérieure à celle déterminée pour un fourrage immature à prédominance de légumineuses qui est de 1,30 pour l'énergie nette de lactation (ENL) et de 0,82 pour l'énergie nette de gain de poids (ENG), ce qui permet une excellente production animale.

Il est possible d'attribuer une classe de qualité plus spécifique au fourrage étudié en fonction de la consommation de matière sèche (CMS), de la valeur alimentaire relative (VAR) et de la teneur en protéines brutes (PB). Pour le MPS de première coupe (site d'Alma), la teneur en PB est aussi élevée qu'un fourrage immature de légumineuses, tandis qu'en deuxième coupe, la teneur en PB équivaut à un fourrage immature d'un mélange de 75 % de légumineuses et 25 % de graminées. Pour les parcelles d'essais régies à une coupe, le MPS a une teneur moyenne en PB équivalente à un fourrage d'un mélange de 25 % de légumineuses et 75 % de graminées à mi-maturité. Quant au fourrage frais de SS, il a la plus faible qualité protéique équivalente à un fourrage de graminées à pleine maturité. En effet, une teneur en PB supérieure à 19 % correspond à un fourrage de très bonne qualité qui est alors classé excellent, alors qu'un fourrage de mauvaise qualité a une teneur en PB entre 8 et 10 % et est classé 4. Si la teneur en PB d'un fourrage se situe entre 17 et 19 %, il est classé 1, alors qu'un fourrage entre 11 et 13 % est classé 3.



**Tableau 4. Valeur alimentaire moyenne du fourrage frais de millet perlé et sorgho sucré**

Variable	MPS		MPS		SS
	1 <sup>ère</sup> coupe	2 <sup>e</sup> coupe	Coupe en fin de saison		
	2010		2009	2010	2010
<b>PB (%)</b>	22,5	17,4	15,6	12,6	9,9
<b>ADF (%)</b>	30,5	33,3	33,7	37,1	35,8
<b>NDF (%)</b>	52,7	56	55,6	61,8	56,1
<b>ENL (Mcal/kg)</b>	1,62	1,52	1,5	1,4	1,44
<b>ENG (Mcal/kg)</b>	1,05	0,94	0,9	0,8	0,84
<b>CMS (kg m.s./100 kg de poids vif/jour)</b>	2,28	2,14	2,2	1,9	2,14
<b>VAR</b>	115,1	104,6	103,6	90,5	101,2

Bref, en tenant compte des différentes variables de valeur alimentaire, la qualité fourragère du MPS cultivé en région plus froide peut être classée excellente pour la première coupe et de classe 1 pour la deuxième coupe. Par contre, la biomasse régie à une coupe en fin de saison de croissance possède une qualité fourragère de classe 2 pour le MPS et de classe 3 pour le SS. Ainsi, la régie mult coupe du MPS semble intéressante, particulièrement pour le fourrage de première coupe. Les bons résultats peuvent s'expliquer par le fait que la récolte a eu lieu à un stade de développement précoce de la culture et dont le contenu en fibres est moins élevé. De même, la moins bonne valeur alimentaire de la biomasse régie à une coupe peut être expliquée par les UTM élevées en 2010 qui ont contribué à ce que le fourrage soit récolté à un stade de développement avancé avec un contenu en fibres plus élevé. La valeur alimentaire du MPS et du SS reste tout de même à définir au Saguenay–Lac-St-Jean, en fonction de la régie de coupe et selon les conditions climatiques.

## CONCLUSION

Même si plusieurs projets de recherche ont permis d'optimiser certains paramètres de production, il est nécessaire de continuer la vérification du niveau d'adaptation du MPS pour les différentes conditions climatiques québécoises. Le projet a permis de valider le potentiel fourrager pour cette culture. Au Saguenay–Lac-St-Jean, le bon potentiel de rendement et la valeur alimentaire du MPS et du SS en font d'excellentes plantes fourragères. La valeur alimentaire du fourrage de MPS de première et de deuxième coupe est aussi bonne qu'un fourrage à mi-maturité à prédominance de légumineuses. Ce type de fourrage pourrait servir à l'alimentation des bovins laitiers. La qualité du fourrage régie à une coupe ressemble à celle d'un foin de graminées et serait adéquate pour l'alimentation des bovins de boucherie. Quant au SS, sa valeur alimentaire et les teneurs en sucre ont été égales voire supérieures à celles observées dans le MPS régie à une

coupe en fin de saison de croissance. Il semble donc y avoir un potentiel fourrager et énergétique pour le SS.

Dans les régions à faible UTM, ces deux cultures pourraient, en termes de volume fourrager, être une alternative à l'utilisation du maïs ensilage dont le rendement et la qualité est très variable d'une année à l'autre. En effet, les producteurs laitiers et de bovins pourraient tirer avantage de ces cultures annuelles comme fourrage d'appoint en l'intégrant à la ration des troupeaux. Le bénéfice relié à l'utilisation du MPS est d'autant plus réel que cette plante à vocations multiples pourrait être une solution au problème récurrent de rotation de cultures dans la production de pommes de terre. L'intégration d'une nouvelle culture en rotation bénéfique pour la pomme de terre met en valeur des aspects phytosanitaires et environnementaux de cette production.

En ce qui concerne la vocation énergétique de ces cultures, les coûts de production de sève au Saguenay–Lac-St-Jean, en se basant sur le rendement en biomasse et la teneur en sucre, devront être étudiés en détail si l'on veut justifier la conversion en éthanol. En attendant que les procédés de pressage soient performants au Québec, il faut avant tout valoriser le MPS pour ses nombreux avantages à l'intégrer à la rotation de cultures des entreprises agricoles.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier le Réseau des plantes bio-industrielles du Québec (RPBQ) d'avoir accepté d'intégrer le présent projet dans le cadre des activités de l'atelier sur le millet perlé et le sorgho sucré. De même, nous remercions M. Marc-F. Clément, agronome et conseiller en grandes cultures et agroenvironnement à la Direction régionale du MAPAQ de l'Outaouais-Laurentides, M. Pierre Bélanger, agronome et spécialiste en gestion de matières organiques de Bélanger Agro-Consultant inc., ainsi que M<sup>me</sup> Anne Vanasse, professeure et chercheure au Département de phytologie de l'Université Laval, pour avoir rendu disponible leur expertise relative à la régie de production du millet perlé sucré.

Nous remercions également M. Jimmy Harvey de la Ferme Rewill 90780057 Québec inc., M. Pierre Grenon de la Ferme C.P.R. Grenon inc., M. Bernard Goulet de la Ferme Jean-Noël Goulet & Fils inc. et M. Alain Rivard de Production A-Rivard & Fils inc., pour leur participation au projet et leur grande disponibilité tout au long de sa réalisation. Finalement, nous remercions M. Éric Girard, expert-conseil en production végétale chez Nutrinor, pour sa disponibilité dans la réalisation des différentes étapes du projet.

## LISTE DES OUVRAGES CITÉS

Agriculture Environmental Renewal Canada Inc. : <http://www.aerc.ca/foragesorghum.html>.

Agrométéo Québec : <http://www.agrometeo.org>.

BOUCHARD, A., A. VANASSE, G. BÉLANGER and P. SÉGUIN, 2011, *Yield and Composition of Sweet Pearl Millet as Affected by Row Spacing and Seeding Rate*, Agronomy Journal (accepté).

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), 2005, *Les plantes fourragères* :

<http://www.agrireseau.qc.ca/argeneral/documents/Les%20Plantes%20fourrag%20c3%a8res%20-%20Couverture%20et%20Table%20des%20matiere%20.pdf>.

CLÉMENT, Marc-F. et Anne VANASSE, 2008, *Produire de l'éthanol et du fourrage avec le millet perlé sucré et le sorgho sucré pour mieux développer la production bovine en Outaouais*, 71<sup>e</sup> congrès de l'Ordre des agronomes du Québec :

[http://www.oaq.qc.ca/pdf/Congres08/CV\\_Resume\\_Clement.pdf](http://www.oaq.qc.ca/pdf/Congres08/CV_Resume_Clement.pdf).

# ENSILAGE DE SORGHO SUCRÉ POUR LES VACHES LAITIÈRES

SOMAIA AMER, ARIF MUSTAFA, CAROLANE NEVEU

Département des Sciences Animales, Campus Macdonald, Université McGill, Sainte-Anne-de-Bellevue, Québec, Canada

Courriel : somaia.amer@mail.mcgill.ca

---

## Résumé

L'objectif de cette étude était de déterminer la valeur alimentaire de l'ensilage de sorgho sucré sur les vaches laitières comparativement à l'ensilage de luzerne. Deux diètes ont été formulées à partir de base azotés équivalentes comprenant un ratio 50:50, fourrage : concentré. L'ensilage de sorgho sucré et l'ensilage de luzerne constituaient 70% du fourrage de chaque diète. Douze vaches Holstein en début de lactation ont été utilisées pour une durée de 24 jours. Comparativement à l'ensilage de luzerne, l'ensilage de sorgho sucré contenait 58% plus de fibres NDF et 36,6 et 72,7% moins de lignine et protéine brute, respectivement. La consommation en matière sèche (23,3 vs. 26,1 kg/jour) et le rendement en lait (33,0 vs. 36,7 kg/j) étaient inférieurs pour les vaches nourries avec l'ensilage de sorgho sucré comparativement pour celles nourries avec l'ensilage de luzerne. Cependant, l'indice de consommation était similaire pour les deux traitements alimentaires. Le remplacement de l'ensilage de luzerne par l'ensilage de sorgho sucré a augmenté la concentration en gras du lait (4,44 vs. 3,80%) et les solides totaux (13,31 vs. 12,88%) et réduit la concentration du lactose (4,55 vs. 4,66%), les matières solides sans gras (8,88 vs. 9,08%) et de l'azote sous forme d'urée dans le lait (10,0 vs. 14,0 mg/dL). Cependant, la concentration en protéine du lait n'a pas été influencée par les ensilages. Le pH du rumen était plus élevé alors que la concentration de  $\text{NH}_3\text{-N}$  et la concentration des acides gras volatils étaient inférieurs pour les vaches nourries avec l'ensilage de sorgho sucré contrairement à celles nourries avec l'ensilage de luzerne. La digestibilité n'a pas été influencée par le type d'ensilage, excepté pour la digestibilité de la fibre NDF, laquelle était supérieure pour l'ensilage de sorgho sucré lorsque comparé à l'ensilage de luzerne. En conclusion, remplacer l'ensilage de luzerne par celui de sorgho sucré a des impacts négatifs sur la consommation alimentaire et sur les rendements en lait de vaches laitières.

**Mots clés :** Rendement en lait, composition du lait, ensilage de sorgho sucré, utilisation des nutriments.

# VALORISATION DES FOURRAGES : UN OUTIL DE DIAGNOSTIC À LA FERME

MARIE-CHRISTINE COULOMBE<sup>1</sup>, DORIS PELLERIN<sup>1</sup>, RENÉ ROY<sup>2</sup>, GUY ALLARD<sup>1</sup>, PHILIPPE SAVOIE<sup>3</sup>,  
DIANE PARENT<sup>1</sup>, ÉDITH CHARBONNEAU<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, Université Laval, 2425 rue de l'Agriculture, Québec, QC, G1V 0A6;

<sup>2</sup>Valacta, 555 boulevard des Anciens-Combattants, Sainte-Anne-de-Bellevue, QC, H9X 3R4;

<sup>3</sup>Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et grandes cultures, 2560 boulevard Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3

Courriel : marie-christine.coulombe.1@ulaval.ca

---

## Introduction

Les fourrages sont la principale production végétale sur les fermes laitières québécoises, représentant 66 % des superficies cultivées (Agritel web, 2009). De plus, les fourrages sont à la base de l'alimentation des troupeaux laitiers, constituant 63,5 % des aliments servis aux vaches laitières (Valacta, 2010). Cette situation n'existe pas sans raison. En effet, les aliments fourragers, en plus d'être essentiels à la santé des ruminants, sont parmi les constituants les plus économiques des rations des bovins laitiers.

Les fermes valorisant cette ressource démontrent des performances technico-économiques supérieures. En effet, une analyse réalisée en utilisant la base de données Agritel web a démontré que les entreprises ayant une meilleure gestion des fourrages peuvent espérer une augmentation de leur bénéfice net jusqu'à 60 000\$ chez celles dont le coût de production des fourrages est faible (Roy et al., 2008). L'importance d'optimiser l'utilisation des ressources fourragères des entreprises laitières est donc indéniable.

Toutefois, bien que les connaissances sur le sujet soient avancées, elles tardent parfois à être appliquées, ce qui soulève la question de comment faire pour les diffuser de façon efficace aux producteurs laitiers. En plus, évaluer la gestion des fourrages sur les entreprises laitières et cibler les points forts et les points à améliorer à ce niveau sont parfois difficiles. Pour l'instant, peu d'outils sont disponibles pour les producteurs et leurs conseillers afin de répondre à ce besoin.

Le projet en cours vise à pallier à ce manque. Il cible quatre grands axes de la valorisation des fourrages : soit la production de fourrages, l'efficacité des chantiers de récolte, le coût de production et l'utilisation par les animaux. Ainsi, notre équipe travaille à développer un outil pratique pour évaluer la gestion fourragère des entreprises laitières.

Parallèlement au développement de la grille, une évaluation portant sur l'adoption des nouvelles pratiques par les producteurs est en cours de réalisation.

## Matériel et méthodes

Avec la collaboration d'experts, une grille d'évaluation ciblant les principaux facteurs influençant la valorisation des fourrages sur les fermes laitières a été développée. Par la suite, une équipe d'intervenants du milieu agricole a validé le contenu et a proposé les correctifs nécessaires pour faciliter son utilisation sur le terrain. Au cours de l'été 2010, 21 fermes commerciales réparties dans le Bas-St-Laurent, la Beauce et le Centre-du-Québec ont testé l'outil sur leur entreprise.

Dans le but de s'assurer que cet outil soit utilisable sur toutes les entreprises québécoises, les fermes participantes ont été sélectionnées pour le tester sous différents types de gestion fourragère : petites balles rectangulaires (9), balles rondes (9), grosses balles carrées (7), silo tour (15), silo fosse (1), silo boudin (2), silo meule (2), pâturage (8); 72 % des fermes utilisant l'ensilage de maïs (15/21). Les résultats obtenus lors de l'essai en conditions commerciales permettront d'apporter les modifications appropriées pour faire de la grille un outil de premier plan.

## Résultats et discussion

L'analyse des facteurs influençant les performances technico-économiques des entreprises quant à la valorisation des fourrages a permis l'identification de quatre volets majeurs. Il s'agit de la production de fourrages, de l'efficacité des chantiers de récolte, du coût de production des fourrages et de l'utilisation des fourrages par les animaux. Chacun de ces volets a ensuite été étudié afin de cibler les différents critères pouvant les affecter (Figure 1). Dans le but de raffiner l'analyse, divers concepts ont également été développés par notre équipe. C'est le cas notamment du rendement ajusté, de l'estimation du coût de production à partir des charges de machinerie et de l'utilisation du lait fourrager potentiel en lien avec le lait fourrager observé.

Volets/critères	Unités
<b>Production des fourrages</b>	
<b>Rendement ajusté</b>	<b>Équivalent TMS/ha</b>
Rendement	TMS/ha
Indice de qualité	
<b>Coût de production des fourrages</b>	
<b>Coût de production estimé</b>	<b>\$/Équivalent TMS</b>
Charges de machinerie	\$/ha → Coût production estimé (\$/ha)
Rendement ajusté	Équivalent TMS/ha
<b>Efficacité des chantiers de récolte</b>	
<b>Indice de chantier</b>	
Capacité de récolte journalière	TMS/jour → Nombre de jours de récolte
Nombre d'occasions de récolte	jours
Point limitant	
<b>Utilisation des fourrages par le troupeau</b>	
<b>Lait fourrager observé</b>	<b>kg lait/vache/an</b>
Lait fourrager potentiel	kg lait/vache/an
Consommation volontaire	kg MS/va/jour
Complémentation	

Figure 1 : Contenu de la grille d'évaluation

## La production de fourrages

L'étape initiale d'une stratégie de valorisation des fourrages sur une entreprise laitière est sans contredit la production de fourrages de qualité en quantité suffisante. Le volet « production de fourrages » est donc évalué par le biais du rendement ajusté. Ce nouveau concept consiste à corriger le volume de matière sèche récolté (TMS/ha) selon la qualité de celle-ci. Pour ce faire, deux renseignements doivent être déterminés : le rendement (TMS/ha) et un indice de qualité globale des fourrages.

L'indice de qualité globale vise à fournir une note au fourrage selon sa composition. Inspiré de l'indice de « qualité relative des fourrages » (QRF ou RFQ), notre indice de qualité globale tient compte à la fois de l'ingestibilité de l'aliment (% NDF et digestibilité de la NDF) et de sa teneur en éléments nutritifs. Subdivisée en deux sous-indices, la qualité globale des fourrages est en fait la moyenne de la qualité relative en énergie et de la qualité relative en protéine.

Qualité relative en énergie (QRE) = Ingestibilité x UNT / 1,24 (facteur de correction)

Qualité relative en protéine (QRP) = Ingestibilité x Protéine digestible / 0,32 (facteur de correction)

Indice de qualité globale = (QRE + QRP) / 2

Le facteur de correction utilisé dans le calcul des deux sous-indices fait en sorte qu'un fourrage de référence obtienne un indice global de 100. Ainsi, un fourrage obtenant un indice supérieur à 100 est considéré comme supérieur à la moyenne et vice-versa. Le fourrage de référence utilisé lors de l'évaluation des plantes fourragères est une moyenne pondérée d'un « ensilage mélangé mi-mature » et d'un « foin mélangé mi-mature ». Pour l'évaluation d'un ensilage de maïs, il s'agit d'un « ensilage de maïs normal ». Les analyses de ces fourrages sont tirées des aliments de référence du logiciel Agri-lacta (Tableau 1).

À l'aide de l'indice de qualité globale pondéré de tous les fourrages récoltés sur l'entreprise, le rendement peut être corrigé selon la qualité du produit récolté. Ainsi, les tonnes de matières sèches par hectare (TMS/ha) sont transformées en « équivalent TMS »/ha.

Tableau 1 : Composition des fourrages de référence tirés du logiciel Agri-lacta (base MS)

		Fourrage mélangé mi-mature	Ensilage de maïs normal
PB	% MS	16,3	9,2
ÉN <sub>L</sub>	Mcal/kg MS	1,14	1,44
UNT	% MS	55,7	68,2
ADF	% MS	35,6	26,7
NDF	% MS	53,8	47,3
NDFd 48h	% NDF	44,2	58,3

## Le coût de production

La production d'un fourrage à un coût raisonnable est essentielle pour que cet aliment demeure économiquement rentable. Peu de producteurs connaissent leur coût de production, et il s'agit d'une lacune importante dans la gestion fourragère des entreprises. Le calcul exact du coût de production d'une tonne de fourrage demande une comptabilité précise et implique une connaissance précise de plusieurs charges comme les intrants, la main-d'œuvre, l'amortissement, etc. Suite à l'analyse des éléments constituant le coût des fourrages d'un groupe de fermes extrait de la banque de données Agritel web, une corrélation de 0,84 entre le coût de production (\$/ha) et les charges de machinerie (\$/ha) a été observée. En effet, les charges de machinerie, c'est-à-dire le carburant, l'entretien, les locations, le forfait et les amortissements, représentent en moyenne 42 % des charges totales à l'hectare. C'est pourquoi une méthode permettant d'estimer le coût de production des fourrages à partir des seules charges de machinerie a été développée. Il s'agit d'un procédé plus simple que celui actuellement utilisé, et qui permet tout de même aux producteurs d'obtenir une approximation satisfaisante des charges totales engendrées pour la production de leurs fourrages.

Le coût de production peut être exprimé en plusieurs unités : \$/ha, \$/TMS et, avec la venue du rendement ajusté, \$/équivalent TMS. Dans notre analyse, nous privilégions les \$/équivalents TMS afin que les sommes utilisées pour produire les fourrages soient évaluées en tenant compte à la fois du rendement et de la qualité du produit final.

## L'efficacité du chantier de récolte

Tel que mentionné précédemment, la machinerie constitue la majeure partie du coût de production des fourrages. Il importe donc d'utiliser cette ressource dispendieuse de façon optimale. De plus, un chantier efficace est synonyme de récolte rapide et de mise en entrepôt adéquate, donc précurseur d'une plus grande qualité des fourrages.

L'efficacité du chantier de récolte est évaluée lors de la première coupe. Pour ce faire, nous estimons la capacité de récolte journalière de l'entreprise (TMS/jours). Celle-ci est ensuite comparée aux besoins en fourrages pour les vaches en lactation pour déterminer le nombre de jours nécessaire pour la récolte d'un fourrage de qualité supérieure. Si ce nombre de jours est inférieur ou égal au nombre d'occasions de récolte probable durant la période optimale de 14 jours (Hayhoe et al., 1986), alors le chantier est considéré comme suffisamment efficace (Tableau 2).

Tableau 2 : Occasions de récolte probables durant la période optimale selon le nombre de jours consécutifs nécessaire

Jours consécutifs nécessaires	Occasions de récolte probables
1	7
2	4
3	3
4	2
5	1
6	1
7	0



## **L'utilisation du fourrage par le troupeau**

La dernière étape consiste à faire en sorte que le troupeau utilise le fourrage de façon optimale. Le premier diagnostic à ce niveau est fait avec le calcul du lait fourrager. Ce concept, déjà bien connu dans le milieu laitier, consiste à estimer la quantité de lait produite à partir des fourrages en soustrayant de la quantité de lait totale celle produite à partir des concentrés. Il est possible d'augmenter la précision du calcul en corrigeant les quantités de lait selon leurs composantes, en utilisant les teneurs en énergie et protéine réelles des concentrés et en appliquant une correction pour estimer les besoins de croissance des vaches en première et deuxième lactations. Cette première information nous donne un aperçu du degré de valorisation des fourrages pour la production de lait. L'analyse peut ensuite être améliorée en évaluant différents aspects pouvant jouer sur la quantité de lait fourrager par vache.

Premièrement, la condition fondamentale pour obtenir un lait fourrager élevé est d'avoir des fourrages de qualité pouvant supporter la production laitière du troupeau. C'est selon ce principe que le lait fourrager potentiel est calculé (Charbonneau et al., 2006). Comme son nom l'indique, cet indicateur sert à évaluer le potentiel des fourrages à produire du lait. Ainsi, chacun des fourrages destinés au troupeau adulte (tarées et lactation) est évalué selon son ingestibilité, sa teneur en protéine et sa teneur en énergie afin de calculer la production de lait qu'il est en mesure de supporter. En comparant le lait fourrager potentiel au lait fourrager observé, il est possible de voir dans quelle mesure l'entreprise utilise le potentiel de production laitière de ces fourrages. Si le lait fourrager potentiel est bas, cela peut également démontrer un problème de qualité des fourrages.

Ensuite, d'autres aspects vont influencer la production de lait à partir des fourrages. La consommation volontaire de matière sèche (CVMS) réelle du troupeau comparativement à la CVMS prédite par le NRC 2001 nous informe si les animaux ingèrent suffisamment d'aliments, ce qui est essentiel à leur valorisation. Finalement, les constituants du lait (gras, protéine, ratio protéine/gras et urée) servent d'indicateurs de la qualité de la complémentation offerte. Ces renseignements nous informent sur la capacité des concentrés à bien compléter les fourrages par un apport équilibré en matière de nutriments et un bon synchronisme.

Toutes les données recueillies sur les entreprises visent donc à couvrir l'ensemble des connaissances sur la production et l'utilisation des fourrages, afin d'effectuer un diagnostic efficace de la situation de la ferme.

Comment cela se traduit-il dans la réalité? Un aperçu des résultats obtenus lors de l'évaluation de l'outil au cours de l'été 2010 est présenté au tableau 3.

Tableau 3 : Résultats préliminaires pour les données moyennes des fermes participantes selon la région

		Moyenne	Bas-St-Laurent	Beauce	Centre-du-Québec
Nombre de fermes		14	6	6	4
Rendement ajusté	eqTMS/ha	7,1	5,6	8,0	8,1
Rendement	TMS/ha	6,7	5,3	7,5	7,5
Indice de qualité		131	124	135	137
Coût de production estimé	\$/eqTMS	185	186	215	138
Coût de production estimé	\$/TMS	197	194	231	148
Nbre d'occasions de récolte	jours	3,8	3,6	4,0	4,3
Lait fourrager observé	kg /va/an	2 763	2 778	2 148	3 506
Lait fourrager potentiel	kg /va/an	7 061	6 430	6 706	8 373
CVMS	kg MS/va/jour	22,7	25,1	21,2	21,1
CVMS réelle/prédite	%	92	102	89	79

De plus, afin de bien illustrer l'évaluation qu'il est possible de faire grâce à l'outil, les résultats d'une ferme ayant participé au projet sont présentés (Tableau 4). Il s'agit d'une ferme de la région de la Beauce où les fourrages sont récoltés sous forme de petites balles rectangulaires et d'ensilage haché dans un silo-tour. Le troupeau est de race Ayrshire.

Tableau 4 : Résultats de la Ferme BONFOIN

		Ferme	Résultat <sup>1</sup>
Rendement ajusté	eqTMS/ha	6,5	+
Rendement	TMS/ha	6,2	+
Indice de qualité		133	+
Coût de production estimé	\$/eqTMS	189	0
	\$/TMS	181	0
Charges de machinerie	\$/ha	530	0
Rendement ajusté	eqTMS/ha	6,5	+
Indice de chantier		155	+
Nbre de jours de récolte	jours	2	
Nbre d'occasions de récolte	jours	3	
Lait fourrager observé	kg/va/an	2 052	-
Lait fourrager potentiel	kg/va/an	5 748	- <sup>3</sup>
Différence LF <sup>2</sup>	kg/va/an	3 696	- <sup>3</sup>
CVMS	kg MS/va/jour	19,0	
CVMS réelle/prédite	%	75	-
Complémentation ratioP/G	---	0,80	+
Complémentation urée	dl/mg	12,3	+

<sup>1</sup> - : À améliorer, 0 : Satisfaisant, + : Très bon

<sup>2</sup> Différence LF = Lait fourrager potentiel – lait fourrager observé

<sup>3</sup> Évaluation basée sur les données du présent projet, sujet à changement

Par un coup d'œil rapide, il est simple de constater que cette ferme réussit bien au niveau de la production d'un fourrage de qualité et que le rendement est excellent. Son coût de production est acceptable. De plus, le chantier de récolte est suffisamment efficace. Le problème de l'entreprise se situe dans l'aspect de l'utilisation des fourrages par le troupeau. Le lait fourrager observé et potentiel sont inférieurs aux seuils minimaux. L'utilisation du potentiel des fourrages pour la production laitière, évaluée par la différence entre le lait fourrager potentiel et observé, est également sous le seuil minimal. Une des explications possibles est la faible consommation alimentaire des animaux qui se situe à 75 % de la consommation prédite.

## **Conclusion**

Au terme du projet, un outil de diagnostic simple et efficace pourra être disponible pour les producteurs et les intervenants du milieu agricole québécois. L'analyse des quatre grands axes de la valorisation des fourrages via les indicateurs proposés permet un premier diagnostic de l'efficacité de la ferme à utiliser ses ressources fourragères. Cela permet d'ouvrir la voie à des stratégies d'amélioration efficaces pour en faire des entreprises plus rentables. Finalement, l'examen préliminaire des résultats de l'étude sur l'adoption de nouvelles pratiques laisse présager un rôle primordial pour les conseillers dans la diffusion et l'utilisation à grande échelle d'un tel outil.

## **Remerciements :**

Ce projet est financé dans le cadre du Programme du réseau de fermes pilotes, grâce au soutien du Conseil québécois des races laitières; du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec; de Novalait inc.; Les producteurs laitiers du Canada ainsi que du Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ) et des conseils sectoriels de l'Ontario, du Manitoba, du Nouveau-Brunswick, de la Colombie-Britannique, de l'Île du Prince-Édouard, de Terre-Neuve et Labrador, de la Saskatchewan, et de la Nouvelle-Écosse dont le financement est issu du Programme pour l'avancement du secteur canadien de l'agriculture et de l'agroalimentaire (PASCAA) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. De plus, l'étudiante à la maîtrise a obtenu une bourse d'études supérieures de la part du Conseil de recherche en sciences humaines du Canada.

## **Liste des ouvrages cités**

Charbonneau, E., P. Y. Chouinard, G. Allard, H. Lapierre et D. Pellerin. 2006. Milk from forage as affected by carbohydrate source and degradability with alfalfa silage-based diets. *J. Dairy Sci.* 89:283-293

Hayhoe, H.N., J. Boisvert et J.-N. Couture. 1986. Contraintes climatiques durant la période de fenaison. Symposium sur les plantes fourragères, avril 1986. CPVQ. p. 85-109

NRC 2011. Nutrient Requirement of Dairy cattle. 7<sup>ième</sup> éd. Natl. Acad. Press. Washington, DC.

Roy, R., J. Brisson et D. Pellerin. 2008. Tirer parti de ses fourrages pour rester dans le « coût ». Symposium sur les bovins laitiers, novembre 2008. CRAAQ. p. 1-23

Valacta. 2010. Évolution de la production laitière 2009. Dans : Le producteur de lait québécois. Numéro spécial, mai 2010.

## VERS L'AMÉLIORATION DE LA LUZERNE POUR LA PRODUCTION DE BIOÉTHANOL

MARC-OLIVIER DUCEPPE, ANNICK BERTRAND, RÉAL MICHAUD, YVES CASTONGUAY, MARIE-PIER DUBÉ

Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 boulevard Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3  
Courriel : [marc-olivier.duceppe@agr.gc.ca](mailto:marc-olivier.duceppe@agr.gc.ca)

La consommation de pétrole est en constante augmentation. En parallèle, les réserves mondiales sont à la baisse et les années qui nous séparent d'une pénurie se comptent en terme de décennies.

Les biocarburants représentent une alternative renouvelable aux combustibles fossiles. Leur introduction progressive permet d'améliorer le bilan carbone des combustibles, tout en étant bénéfique sur le plan environnemental. L'éthanol cellulosique est perçu comme une avenue des plus prometteuses pour la production d'énergie renouvelable associée à une empreinte environnementale restreinte. Néanmoins, l'avenir de ce biocarburant reste garant d'une augmentation de l'efficacité globale du processus de transformation de la biomasse en bioéthanol. La quantité de biomasse produite, d'intrants nécessaires et de sucres fermentescibles libérés par unité de surface cultivée devront être optimisés afin d'assurer la viabilité à long terme de ce système de production.

Au Canada, la luzerne représente une candidate parmi les plus intéressantes comme matière première pour la production d'éthanol cellulosique. En plus de nécessiter peu d'intrants azotés, ses tiges, riches en cellulose, permettraient d'atteindre des rendements intéressants en biocarburant, tandis que ses feuilles, riches en protéines, pourraient être utilisées pour l'alimentation des ruminants.

Le Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures de Québec (Agriculture et Agroalimentaire Canada) travaille à l'amélioration de la luzerne depuis plusieurs années. Son expertise a donc été mise à profit afin de développer de nouveaux germoplasmes de luzerne à haut potentiel pour la production d'éthanol cellulosique, dans le cadre du Réseau sur les biocarburants cellulosiques.

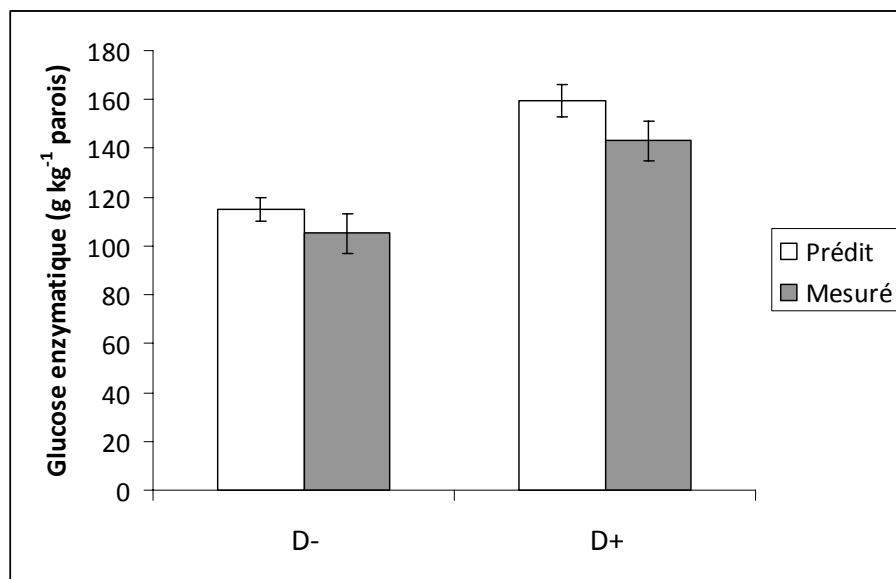
Notre approche est basée sur l'hypothèse qu'il existe une grande variabilité génétique pour la dégradabilité des tiges au sein des populations naturelles de luzerne. Nos objectifs principaux visaient donc à (1) mettre au point une méthode analytique robuste et rapide permettant d'évaluer la dégradabilité des tiges de luzernes, (2) évaluer l'étendue de la variabilité génétique pour la dégradabilité et (3) établir un programme d'amélioration pour ce caractère à l'aide de croisements spécifiques entre les géotypes supérieurs.

Nous avons travaillé à la caractérisation/amélioration parallèle de deux types de cultivars de luzerne. Le premier type, le *type rustique*, comprend trois cultivars d'origine nord-américaine (Amerigraze, Perfect et 54V54) et est caractérisé par une bonne survie à l'hiver et un rendement moyen. Le second type, le *type biomasse*, comprend un seul cultivars d'origine européenne

(Orca), qui démontre un bon rendement en biomasse, mais dont le manque de rusticité réduit la performance sous les conditions climatiques hivernales de l'est du Canada.

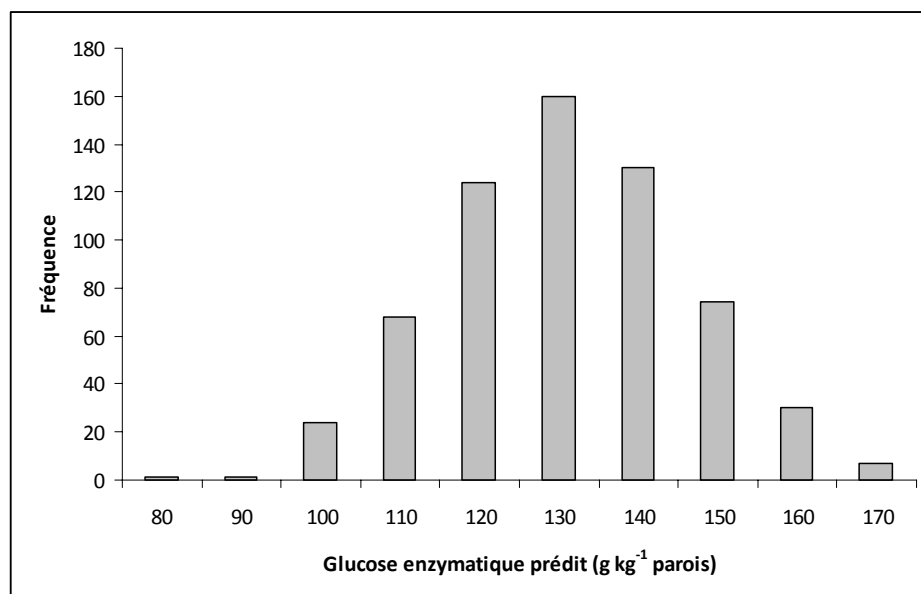
Afin d'évaluer la dégradabilité des tiges de luzerne, nous avons mis au point un test enzymatique permettant de discriminer avec robustesse des génotypes plus ou moins dégradables. Ce test consiste à digérer la fibre des tiges à l'aide d'un cocktail enzymatique. Les sucres libérés de la fibre, en particulier le glucose, sont ensuite dosés avec précision par HPLC. Malgré sa robustesse, le test enzymatique développé est difficilement applicable à un nombre élevé d'échantillons, puisque l'hydrolyse dure 48 heures.

Nous avons donc développé une méthode à haut débit utilisant la spectroscopie proche infrarouge (NIRS, *near infrared reflectance spectroscopy*), qui permet de prédire la dégradabilité des génotypes à partir de l'analyse biochimique (test enzymatique) d'individus sélectionnés. Ce sous-échantillon représentatif de la population sert à établir la calibration entre le spectre NIRS et l'analyse biochimique, ce qui permet de prédire la composition biochimique de toute la population. La robustesse de l'équation permettant de prédire la quantité de glucose libéré par l'hydrolyse enzymatique est clairement illustrée à la Figure 1, qui compare les valeurs de glucose prédites à celles mesurées chimiquement.



**Figure 1** Validation par HPLC de la prédiction de la dégradabilité des tiges de luzerne par NIRS. La dégradabilité est mesurée par la quantité de glucose libéré suite au traitement enzymatique. Les tiges de 20 génotypes D+ de deux cultivars de luzerne (Orca et 54V54) ont été combinées, de même que les tiges de 20 génotypes D-. Les valeurs représentent la moyenne de six répétitions  $\pm$  SD.

Au total, nous avons caractérisé la dégradabilité de plus de 600 génotypes de luzerne par NIRS. Nos résultats ont mis en évidence la présence d'une grande variabilité génétique naturelle pour ce caractère (Figure 2). La quantité de glucose libérée par l'hydrolyse enzymatique variait entre environ 170 g kg<sup>-1</sup> pour les individus les plus dégradables (D+) et 80 g kg<sup>-1</sup> pour les individus les moins dégradables (D-), tous cultivars confondus (Figure 2). En moyenne, les 25 génotypes montrant la meilleure dégradabilité (D+) étaient de 26% plus dégradable que les 25 génotypes montrant la plus faible dégradabilité (D-) (Tableau 1). Cette grande variabilité génétique naturelle représente un large potentiel inexploité d'amélioration de la luzerne pour la production de bioéthanol.



**Figure 2** Étendu de la variabilité génétique naturelle de la dégradabilité des tiges chez la luzerne. Les résultats obtenus de l'analyse de 619 individus provenant de quatre cultivars sont présentés.

**Tableau 1** Dégradabilité des tiges des 25 génotypes les plus dégradables (D+) et les moins dégradables (D-) de quatre cultivars de luzerne. Les valeurs représentent la moyenne par cultivar ± SD. La dégradabilité est exprimée en gramme de glucose libéré par kilogramme de parois.

Type	Cultivar	Dégradabilité	
		D-	D+
Rustique	Amerigraze	122±6	160±7
	Perfect	118±6	163±6
	54V54	116±6	158±6
Biomasse	Orca	116±4	153±7

Afin d'enrichir la fréquence génotypique des gènes associés à une haute dégradabilité dans nos populations de luzerne et de tester l'héritabilité de ce caractère, les génotypes D+ ont été croisés entre eux, de même que les génotypes D-. L'analyse des plantes issues du premier cycle de croisements est présentement en cours. Un deuxième cycle de croisements sera également effectué cet hiver entre les progénitures. D'autre part, les génotypes à haute et faible dégradabilité sont présentement utilisés pour développer des marqueurs moléculaires associés à ce caractère, une approche qui permettra d'accélérer le processus d'amélioration.

En augmentant la dégradabilité des tiges de luzerne, nos travaux auront un impact positif non seulement sur le potentiel de production de bioéthanol, mais également sur la nutrition des ruminants. En effet, un fourrage de luzerne plus dégradable, donc plus digestible, passe rapidement à travers le rumen, ce qui permet à l'animal une meilleure prise alimentaire et une augmentation de la productivité.



## EXPLOITER LA VARIABILITÉ GÉNÉTIQUE DE LA LUZERNE POUR LA PRODUCTION DE BIOÉTHANOL

MARIE-PIER DUBÉ, MARC-OLIVIER DUCEPPE, YVES CASTONGUAY, RÉAL MICHAUD, ANNICK BERTRAND

Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 boulevard Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3  
Courriel : marie-pier.dube@agr.gc.ca

La luzerne possède plusieurs attributs qui la rendent particulièrement attrayante pour la production durable de bioéthanol. Sa capacité à fixer l'azote atmosphérique réduit le recours aux intrants de synthèse et son système racinaire permet de prélever l'eau et les minéraux en profondeur. Par ailleurs, ses feuilles et ses tiges peuvent être séparées à la récolte et être valorisées respectivement dans la nutrition des animaux et dans la production de bioéthanol cellulosique.

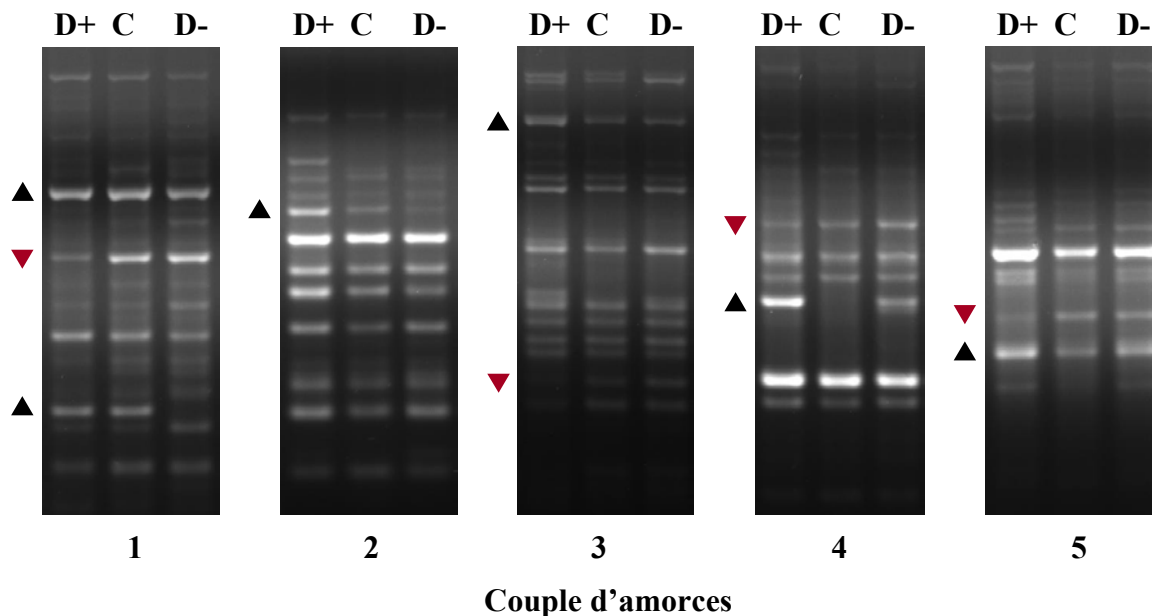
La résistance des parois cellulaires à l'hydrolyse enzymatique demeure une contrainte majeure à la réalisation du plein potentiel de la luzerne pour la production de bioéthanol cellulosique. La très grande variabilité génétique qui existe naturellement chez la luzerne pourrait être mise à profit pour améliorer la dégradabilité des parois. Dans le cadre d'un réseau pan-canadien de recherche sur les biocarburants (CBioN), notre équipe de recherche travaille à accélérer le développement de populations de luzerne possédant des parois cellulaires plus facilement hydrolisables par les cocktails enzymatiques. Les progrès issus de la sélection basée uniquement sur le phénotype risquent toutefois d'être lents en raison du grand nombre de gènes impliqués. Dans cette perspective, notre objectif principal vise à identifier des marqueurs moléculaires associés à la dégradabilité de la paroi cellulaire. Ces marqueurs permettront d'identifier rapidement des plantes qui ont un potentiel supérieur et d'accélérer le développement de populations adaptées aux besoins de l'industrie des biocarburants.

Des génotypes possédant une dégradabilité supérieure (D+) et inférieure (D-) ont été identifiés à l'intérieur de quatre cultivars de luzerne (ORCA, Amerigraze, Perfect et 54V54). Le choix de ces génotypes s'est fait sur la base de la quantité de glucose libéré par hydrolyse enzymatique des parois, tel que prédit par une analyse de spectroscopie dans le proche infrarouge (*near infrared reflectance spectroscopy*) (voir Duceppe *et al.*, ce cahier).

Pour les quatre populations, l'ADN de chacun des 20 génotypes présentant la dégradabilité la plus élevée (D+), et des 20 génotypes présentant la dégradabilité la plus faible (D-) a été purifié et combiné selon la technique des ségrégants regroupés. Les polymorphismes d'ADN entre les pools D+ et D- ont été mis en évidence à l'aide de la technique PCR de polymorphisme d'amplification lié à la séquence (SRAP, *Sequence-Related Amplified Polymorphism*).

À l'aide de 42 différents couples d'amorces SRAP, nous avons mis en évidence plusieurs polymorphismes qui augmentent (positifs) ou diminuent (négatifs) en intensité chez les pools D+ comparativement aux pools D- (Fig 1). Certains de ces polymorphismes étaient communs à toutes les populations, alors que d'autres variaient selon les populations, présentant même parfois

une réponse inverse. Ces résultats soulignent l'importance d'inclure plusieurs populations dans les analyses de ce genre, permettant du même coup d'avoir une couverture plus exhaustive des gènes impliqués. En étudiant les génotypes individuels pour certains des polymorphismes, nous avons observé que la fréquence des bandes, soit le nombre de génotypes présentant les bandes d'intérêt, reflétait l'intensité des bandes dans les pools. La technique des ségrégants regroupés nous a donc permis d'identifier de façon efficace des polymorphismes d'intérêt.



**Figure 1 : Profils d'amplification obtenus avec cinq couples d'amorces. Les flèches indiquent des polymorphismes positifs (en noir) ou négatifs (en rouge) entre les pools de génotypes D+, D-, et un pool aléatoire (C).**

Le clonage des bandes polymorphiques a permis de comparer leurs séquences à celles de séquences répertoriées dans les banques d'ADN génomique. Cette analyse a révélé des homologies avec des séquences retrouvées chez *Medicago truncatula*, une espèce apparentée à la luzerne (*M. sativa*). Cependant, les séquences de *M. truncatula* ne possédaient pas de fonctions connues.

Nos résultats démontrent qu'il est possible d'identifier des régions du génome associées à la variation de la dégradabilité de la paroi cellulaire, grâce à la technique des ségrégants regroupés utilisée sur des génotypes présentant une dégradabilité contrastée.

Des analyses semblables seront effectuées sur la progéniture issue de croisements de plants D+ et D- entre eux afin de vérifier la co-hérabilité du phénotype et des polymorphismes. Des analyses plus poussées, notamment avec des gènes candidats, pourraient nous permettre d'identifier des variants alléliques impliqués dans la dégradabilité de la paroi cellulaire. Ces variants pourront éventuellement être utilisés pour la sélection assistée par marqueurs.

# **LE SECHAGE ARTIFICIEL DU FOIN AVEC L'ENERGIE SOLAIRE ET LA BIOMASSE**

RENÉ MORISSETTE, PHILIPPE SAVOIE

Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 boul. Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3  
Courriel : [rene.morissette@agr.gc.ca](mailto:rene.morissette@agr.gc.ca)

---

## **Résumé**

Deux énergies renouvelables ont été combinées pour préchauffer l'air de séchage du foin. Des capteurs solaires passifs étaient installés depuis 2007 sur le toit d'un séchoir à foin en petites balles à Neuville (Québec, Canada). En raison de l'irrégularité de cette source d'énergie, un système d'échangeurs de chaleur utilisant de l'eau chaude fournie par une chaudière à la biomasse (bûches de bois) a été ajouté en 2009. Durant l'été 2010, le gain de température de l'air préchauffé par l'énergie solaire variait en moyenne entre 0 et 7°C selon le niveau de radiation. Le gain supplémentaire obtenu avec les échangeurs de chaleur variait entre 6 et 8°C, avec une consommation moyenne de bois dans la chaudière de 10,6 kg/h. Au total, 5970 balles de foin ont été récoltées en huit lots entre le 19 août et le 20 septembre, puis séchées jusqu'au 13 octobre (en moyenne 20 jours de séchage par lot, excepté deux lots d'automne qui ont séché pendant 43 jours). Les teneurs en eau initiales et finales moyennes du foin étaient de 18,3 % et 11,1 %, respectivement. La quantité d'énergie mesurée pendant 55 jours d'opération du séchoir était comme suit : électrique (ventilateurs) de 281 MJ/t ; solaire (radiation sur le toit) de 2489 MJ/t ; et combustion (valeur calorifique du bois) de 1731 MJ/t. Cependant les quantités d'énergies utiles, c'est-à-dire transférées à l'air de chauffage, étaient de 281, 525 et 1034 MJ/t, respectivement (efficacité énergétique globale de 40 %). Les charges variables d'énergie et de main-d'œuvre étaient de 34 \$/t et 13 \$/t, respectivement; les charges fixes de la chaudière étaient de 10 \$/t pour un total de 57 \$/t (1,19 \$/balle ou 0,65 \$/kg d'eau évaporée). Une économie substantielle de bois est envisagée à l'avenir en concentrant l'usage de l'eau chaude et des échangeurs la nuit et durant les périodes de faible radiation.

## **Introduction**

Le séchage du foin en balles par ventilation forcée avec préchauffage de l'air permet de récolter du fourrage légèrement humide. L'assèchement rapide en grange diminue le risque de pertes par la pluie au champ de même qu'il réduit les chances de voir apparaître des moisissures associées à une humidité élevée et prolongée. Le séchage artificiel est utilisé par plusieurs producteurs de foin de commerce pour assurer un bon volume de qualité. Une contrainte importante est l'apport d'énergie pour chauffer l'air, traditionnellement l'électricité ou la combustion du propane dont les prix ne cessent d'augmenter.

La Ferme du Viaduc située à Neuville, propriété de M. Richard Matte, produit annuellement plus de 20 000 petites balles de foin pour le marché équestre local et d'exportation (États-Unis). En 2007, un bâtiment d'entreposage à fumier a été converti en séchoir utilisant de l'énergie solaire

passive pour préchauffer l'air. Lors de l'été 2007, Marceau et Amyot (2008) ont démontré que le système pour capter l'énergie solaire était performant et permettait d'augmenter le pouvoir asséchant de l'air significativement. La qualité du foin était meilleure comparativement à un séchoir du même type à air forcé non chauffé. Toutefois, la ventilation devait être arrêtée la nuit afin de ne pas faire entrer d'air froid et humide dans le foin. Ces interruptions de ventilation occasionnaient une augmentation de la température des balles humides et potentiellement l'apparition de moisissures. En 2008, Marceau (2008) ajouta au séchoir un système de recirculation qui récupérait une partie de l'air expulsé du foin. Cet ajout permettait de ventiler plus longtemps après le coucher du soleil en récupérant une partie de la chaleur accumulée dans les balles durant le jour. Toutefois lors des nuits froides, le capteur solaire retirait la chaleur, l'air recirculé se refroidissait, son humidité relative augmentait et on pouvait avoir un phénomène de réhumidification des balles. La chaleur de combustion de la biomasse est apparue comme une alternative intéressante pour fournir une énergie plus régulière que l'énergie solaire. Puisque le bois est un combustible renouvelable, disponible localement ou couramment utilisé en chauffage, un système de combustion avec transfert de chaleur par l'eau chaude a été installé en 2009. Le présent article présente des résultats de mesure obtenus durant le séchage de petites balles de foin d'août à octobre 2010 en utilisant une combinaison d'énergie solaire et de biomasse.

## Méthodologie

### Description du séchoir et du système de chauffage à la biomasse

Le séchoir solaire est situé à la Ferme du Viaduc (Neuville, QC, 46N 41' 2,86'', 71W 39' 58,09'') et a été construit en 2007 à partir d'un bâtiment existant servant d'entrepôt à fumier. Le bâtiment a des dimensions de 26 m x 15 m avec une annexe de 13,5 m x 3,65 m du côté sud au centre de la longueur de 26 m. Le faîte est orienté est-ouest. L'adaptation a consisté à créer un passage cloisonné pour forcer l'air à circuler à travers les fermes de toit, juste en dessous de la toiture de tôle Galvalume (grise) installée en 2000. La toiture a une superficie combinée de 458 m<sup>2</sup>, soit 408 m<sup>2</sup> de toiture principale et 50 m<sup>2</sup> de toiture de l'annexe. La Figure 1 montre un schéma du séchoir solaire (sans l'annexe) et du système de chauffage à la biomasse. L'air entre du côté nord du séchoir, sous le larmier et est aspiré par les quatre ventilateurs situés dans un grand plénum du côté sud (pression négative). Chaque ventilateur centrifuge (3,2 kW, 220 volts) a une capacité nominale de 3,54 m<sup>3</sup>/s (7500 pi<sup>3</sup>/min) à une pression de 44 mm d'eau (1,75 po). En pratique, les ventilateurs fournissent chacun un débit moyen de 4,76 m<sup>3</sup>/s (10085 pi<sup>3</sup>/min) à une pression de 18 mm d'eau (0,7 po). La vitesse de l'air aux chicanes (entre les fermes de toit et la toiture) est de 4 m/s (Marceau, 2007). L'air préchauffé est ensuite poussé dans un seul plénum (pression positive) communiquant aux sections de plancher ajouré soutenant la masse de foin. L'air circule dans le foin du bas vers le haut et ressort par la porte du séchoir. Le séchoir comporte 11 sections de plancher ajouré pouvant accueillir chacune jusqu'à 720 petites balles de moyenne densité (environ 20 kg chacune, 0,35 m x 0,45 m x 0,81 m; 155 kg/m<sup>3</sup> à 12 % de teneur en eau) empilées sur un maximum de 8 rangs à 0,45 m d'épaisseur. Chaque section a une largeur de 2,13 m et une longueur de 12,2 m. Le séchoir peut contenir jusqu'à 7920 balles. Les murs sud et ouest (côté avec ventilateurs et fond respectivement) dans le séchoir sont inclinés à raison de 6 cm par hauteur de balle (45 cm). Ainsi, l'air circule dans les balles plutôt qu'entre celles-ci.

En 2009, un système de chauffage d'appoint à la biomasse a été installé sur le même site. Située à 25 m du séchoir, une chaudière au bois (Central Boiler, modèle E-Classic 2300) d'une puissance

nominale de 146 kW (500 000 BTU/h) fournit de l'eau chaude (sans glycol) à un réseau d'échangeurs de chaleur montés sur les ventilateurs. La chaudière a une capacité de réserve de 1700 litres d'eau non pressurisée à 80°C. Le format et le type de combustible idéaux sont des bûches de bois franc sec (entre 15 et 25 % de teneur en eau), d'une longueur de 70 cm et un diamètre maximal de 10 cm. La fournaise possède deux chambres de combustion : une première qui accueille les bûches pour une combustion primaire à une température modérée (600 à 800°C) et une secondaire, sous la première chambre, qui recueille le charbon ardent et le brûle à une température plus élevée (jusqu'à 1200°C). Cette température élevée permet de brûler la majorité des gaz de combustion. La combustion est contrôlée automatiquement par l'injection d'air dans les deux chambres selon la demande en chaleur (température de l'eau). Les cendres sont vidées manuellement environ une fois par semaine lorsque la fournaise opère en continu.

Chacun des quatre échangeurs de chaleur a une capacité nominale de 64 kW (220 000 BTU/h) et chauffe une partie de l'air provenant du capteur solaire. L'eau circule dans chaque échangeur à un débit de 0,38 L/s (pompe Grundfos, modèle SuperBrute UPS15-58F, 0,80 W). Chaque échangeur ayant une surface restreinte de 0,37 m<sup>2</sup> (4 pi<sup>2</sup>) et une vitesse d'air maximale à respecter, un arrangement de conduites d'air fut installé en amont des ventilateurs afin de faire passer seulement 15% du débit total d'air dans l'échangeur. L'autre partie de l'air provenant de l'entretoit (85 %) est déviée et ensuite mélangée à l'air chaud sortant de l'échangeur avant d'entrer dans le ventilateur. Chaque échangeur fonctionne indépendamment des autres; il est aussi possible d'utiliser les ventilateurs sans apport de chaleur des échangeurs. La réserve d'eau ne contenant pas de glycol, elle doit être vidée à la fin de la saison de séchage car la chaudière n'opère pas l'hiver. De plus, afin de prévenir les bris, les pompes et les échangeurs doivent être aussi purgés et entreposés à l'abri du gel.

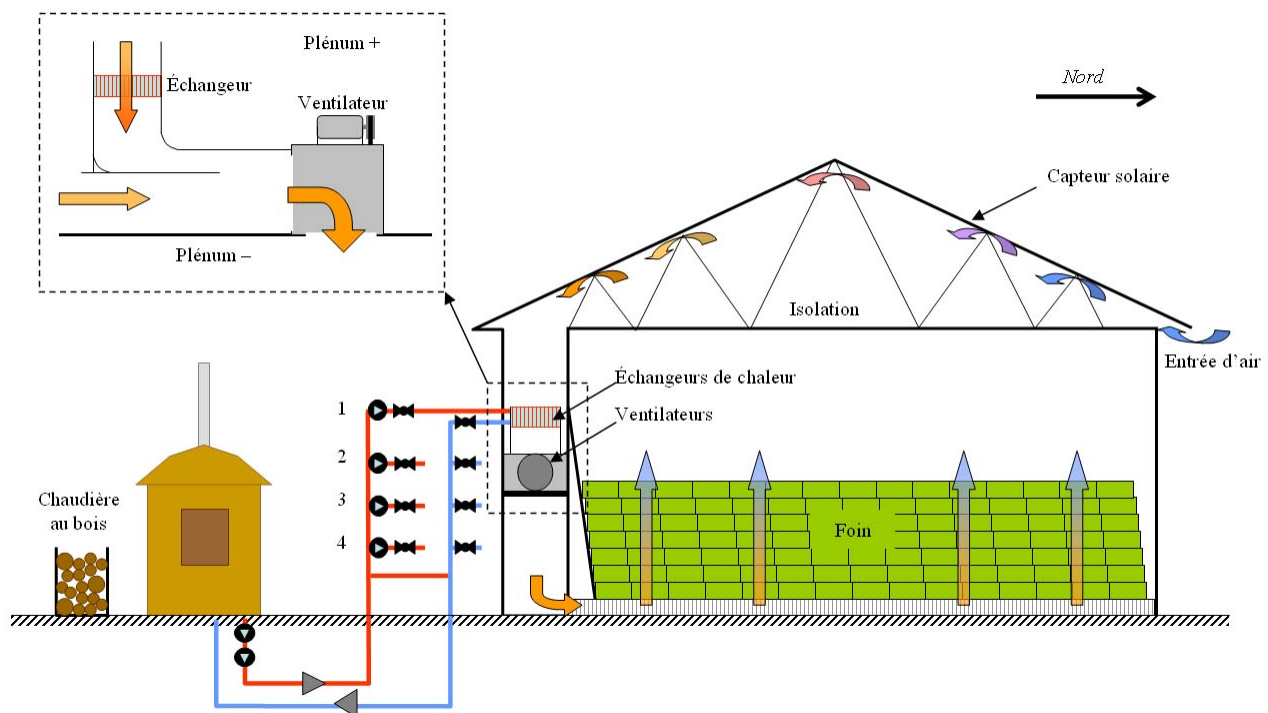


Figure 1. Schéma du séchoir solaire et du système de chauffage à la biomasse.

### **Opération du séchoir et de la chaudière à la biomasse**

Normalement, le séchoir est rempli graduellement et vidé une fois entre la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>e</sup> coupe. Après le séchage, le foin de la 1<sup>ère</sup> coupe est entreposé dans un bâtiment adjacent tandis que celui de la 2<sup>e</sup> coupe reste dans le séchoir jusqu'à sa vente (entre décembre et mai de l'année suivante). Le nombre de balles entrant dans le séchoir à chaque lot récolté varie approximativement de 400 à 1200. Le tracteur, muni d'une pince à groupe de balles (grappin du Syst-M Cardinal), entre par la porte qui fait la largeur du mur est (15 m) et place les grappins de 18 balles à la fois (six en profondeur et trois le long du rang, ou 2,13 m x 2,44 m en surface). Les balles sont placées à partir du fond en allant vers l'avant du séchoir. En 2010, le foin a été empilé sur 7 rangs en hauteur (0,45 m) à raison de 90 balles par rang. Généralement, 2 ou 3 ventilateurs fonctionnent simultanément, selon la surface de foin à sécher. Les ventilateurs sont actionnés manuellement et aucune minuterie n'est installée.

La chaudière peut contenir environ 160 kg de bois franc. Le chargement se fait manuellement et une pleine charge permet une autonomie entre 6 et 12 h selon les conditions. Chaque chargement est pesé et noté. Un premier chargement complet est fait en début de matinée (8 h), un second partiel en milieu d'après-midi (15 h) et un dernier complet en soirée (20 h). Les échangeurs de chaleur sont activés en séquence lorsque la température dans la chaudière est stable à 80°C. Pendant le jour, lorsque l'opérateur de la chaudière est disponible, deux échangeurs peuvent fonctionner simultanément sans que la réserve d'eau de la chaudière ne baisse en température. La nuit, l'autonomie de la chaudière doit être augmentée car il n'y a pas de chargement prévu entre 20h et 8h le lendemain (période de 12 h). Ainsi, un seul échangeur fonctionne conjointement avec un ou deux ventilateurs pour assurer un chauffage minimal de l'air.

### **Mesure des paramètres des procédés**

La température de l'air de séchage est mesurée à plusieurs endroits dans le séchoir : à l'entrée et à la sortie du capteur solaire, à la sortie des échangeurs de chaleur, dans le plénum positif (sortie des ventilateurs), dans le foin (rang 1 et 7 sur 4 sections) et au dessus de la masse de foin (sortie de l'air de séchage). L'humidité relative est relevée dans le plénum positif (avant le foin) et à la sortie de la masse de foin. Les débits d'air sont mesurés manuellement à l'aide d'un anémomètre à fil chaud en amont de chaque ventilateur en opération. Le système de chauffage à la biomasse est suivi au niveau des températures de l'eau : à la sortie de la chaudière, à l'entrée principale des quatre échangeurs et à la sortie de chaque échangeur. L'ensemble de ces paramètres est géré par un système d'acquisition FieldPoint et d'une interface logiciel LabVIEW (National Instruments, [www.ni.com](http://www.ni.com)). Les données sont reçues à chaque minute et la moyenne sur 10 minutes est enregistrée. De plus, l'opérateur note à chaque chargement de bois le type de combustible (bois tendre ou franc), la masse du chargement par type de combustible, l'état des ventilateurs et des échangeurs (arrêté ou en marche), les sections de foin ventilées, la quantité de balles placées dans le séchoir, la masse de cendre extraite, les entretiens et commentaires.

### **Caractérisation du foin**

Lors de chaque récolte, 6 balles réparties également dans 2 groupes de 18 balles (grappin) ont été échantillonnées à l'aide d'une sonde de prélèvement. Pour chaque balle, 2 échantillons d'au moins 50 g chacun ont été prélevés. Le premier échantillon servait à déterminer la teneur en eau initiale selon la méthode normalisée à l'étuve à 103 °C pendant 24 h tandis que le second, dédié aux analyses chimiques, était séché à l'étuve à 60 °C pendant 72 h (ASABE, 2010b). Le premier groupe de balles était placé au rang 1 tandis que le second était placé au rang 7. À la fin du

séchage, seulement les balles situées au rang 7 ont été échantillonnées pour déterminer la teneur en eau finale. Les balles du rang 1 et 7 seront échantillonnées à nouveau lorsque le foin sortira du séchoir (normalement au printemps 2011).

## Résultats

Lors de la 2<sup>e</sup> coupe en 2010, il y a eu 8 lots de foin récoltés entre les jours juliens 231 et 263 (19 août et 20 septembre). Sur 6700 balles récoltées, 5970 ont été placées dans diverses sections du séchoir (Tableau 1); les autres balles étaient assez sèches à la récolte et remises directement dans un entrepôt ventilé non chauffé. Pour chaque section ou groupe de sections remplies en même temps, la période de séchage a varié de 18 à 43 jours (moyenne de 25,8 jours). En excluant les récoltes des journées 243 et 244 qui ont été ventilées plus longtemps que la normale, la période moyenne de séchage était de 20 jours. La fin du séchage était déterminée de deux façons : lorsque la température du foin de la rangée 7 (sans ventilation) était similaire à la température ambiante et selon les résultats des années précédentes. En 2007, 29 jours furent nécessaires pour sécher le foin adéquatement en ne ventilant que le jour puisque le séchoir avait alors une seule source de chaleur, le capteur solaire (Marceau, 2008).

Tableau 1. Balles de foin récoltées et séchées en 2<sup>e</sup> coupe (août et septembre 2010).

Nombre de balles récoltées et placées au séchoir	Sections du séchoir ouvertes	Début du séchage (jour julien)	Fin du séchage (jour julien)	Durée du séchage (jour)
908	1 et 2	231	251	20
728	3	233	251	18
720	4	237	255	18
630	5	241	262	21
1010	6 et 7	242	263	21
810	8	243	286	43
584	9	244	286	42
580	10	263	286	23
Total : 5970		Moyenne:		25,75

### Effet de la radiation solaire sur la température de l'air de séchage

Durant la période entre le 19 août et le 13 octobre 2010 à Neuville, la radiation solaire instantanée a varié entre 0 et 1100 W/m<sup>2</sup>. La Figure 2 montre le gain de température de l'air à la sortie du capteur solaire par rapport à la température extérieure en fonction de la radiation solaire instantanée (moyenne à toutes les 10 minutes). La vitesse du vent expliquerait une partie de la variation. Selon l'équation de régression, la température de l'air augmentait de 1°C lorsque la radiation solaire augmentait de 127 W/m<sup>2</sup>. Dans la plage courante de radiation (0 à 1000 W/m<sup>2</sup>), le gain de température variait entre -0,4 et 7,5°C. Le gain de température du capteur solaire ( $\Delta T_{\text{capteur}}$ ) en fonction de la radiation solaire est exprimé par l'équation 1 ( $R^2 = 0,70$ ) :

$$\Delta T_{\text{capteur}} = 0,0079 \cdot \text{radiation} - 0,398 \quad \text{Équation 1}$$

### Effet du chauffage à la biomasse sur l'air de séchage

La chaudière à biomasse apportait de l'eau chaude à l'entrée des échangeurs à une température entre 72 à 78°C en régime permanent. Le gain de température à la sortie d'un échangeur variait

selon la température de l'air en amont. Plus l'air était chaud au départ, moins le transfert thermique était important. Par exemple, un air frais en amont à 5°C se réchauffait jusqu'à 41°C (gain de 36°C) tandis qu'un air chaud à l'entrée à 30°C se réchauffait seulement jusqu'à 52°C (gain de 22°C) lors de conditions normales d'opération soit un débit d'air à l'échangeur de 0,70 m³/s et un débit d'eau de 0,38 L/s.

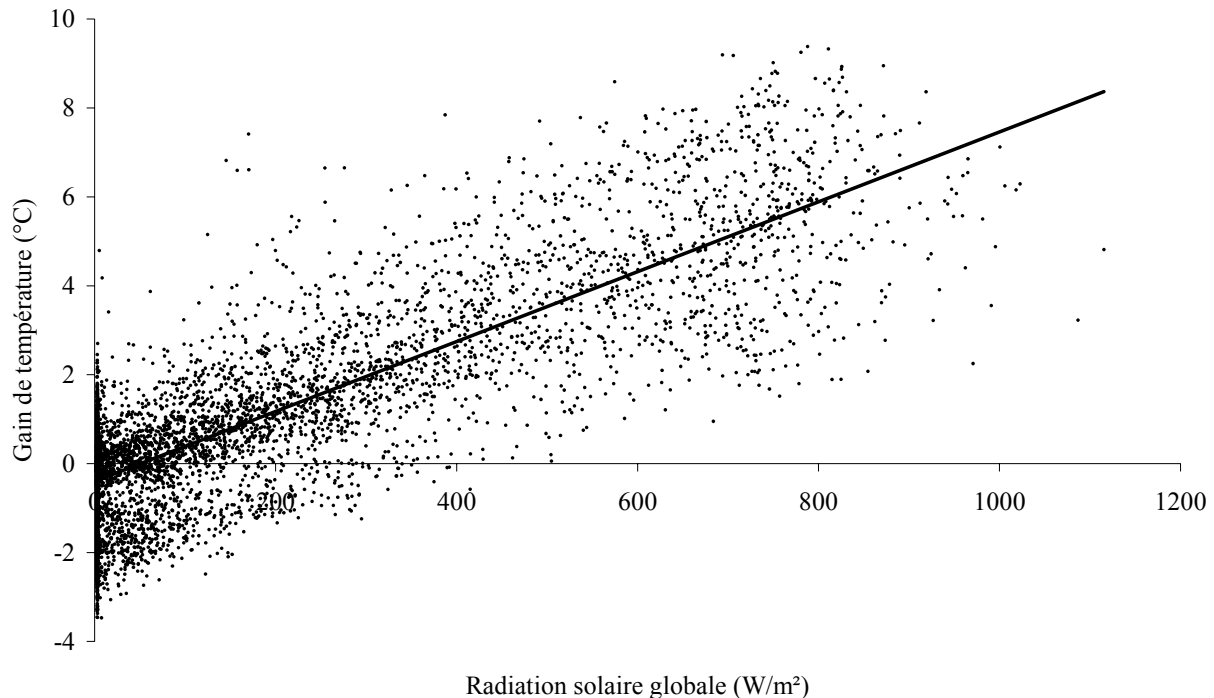


Figure 2. Gains de température de l'air dû au capteur solaire versus la radiation instantanée (moyenne aux 10 minutes) durant l'utilisation du séchoir du 19 août au 13 octobre 2010.

Puisque seulement 15 % du débit d'air passe par l'échangeur et 85 % du débit est dévié, le gain global de température dû à l'eau chaude est estimé dans le mélange d'air juste avant l'entrée au ventilateur. L'équation 2 estime ce gain en fonction de la température de l'air d'entrée ( $T_{a1}$ ) après le préchauffage solaire ( $R^2 = 0,50$ ). Par exemple, le gain thermique dû à la biomasse était estimé à 8,6 ou 6,1°C selon que la température de l'air à l'entrée était de 10 ou 30°C.

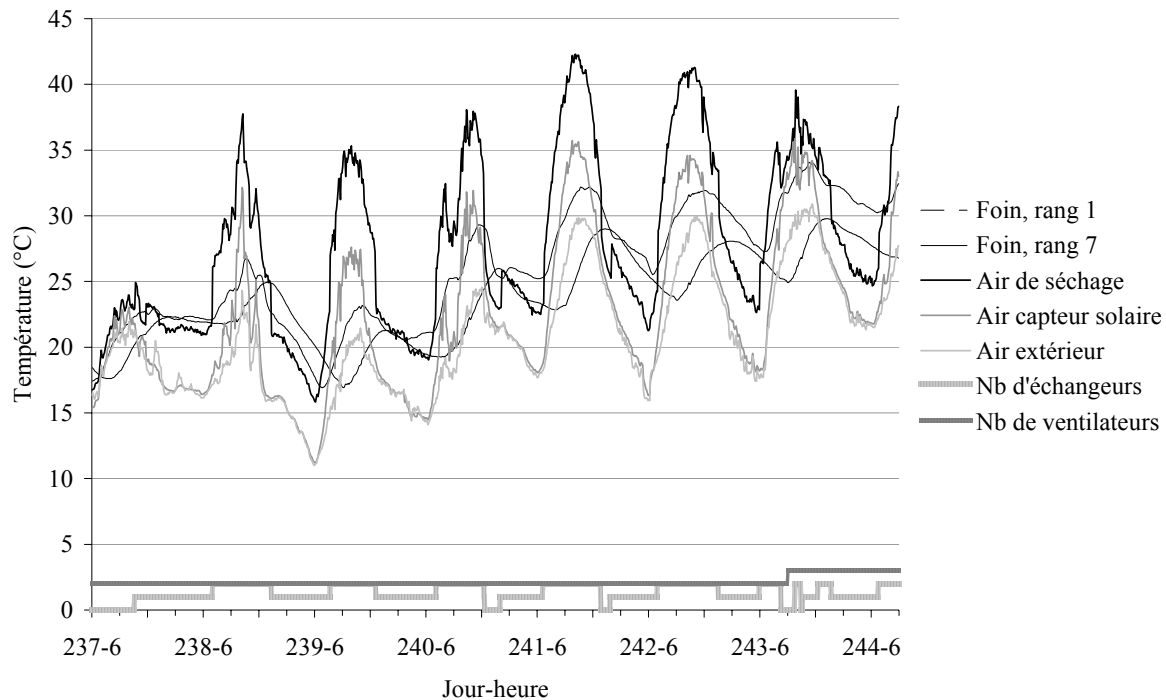
$$\Delta T_{air\ chauffage} = -0,126T_{a1} + 9,84 \quad \text{Équation 2}$$

### Conditions de l'air de séchage combinant le solaire et la biomasse

En combinant l'énergie du capteur solaire et celle des échangeurs de chaleur, le gain de température est important, surtout lors des périodes plus froides (la nuit et en fin de saison). La Figure 3 montre le comportement du séchoir sur plusieurs jours où le gain solaire est considérable. En général, deux ventilateurs opèrent 24 h par jour tandis que deux échangeurs opèrent le jour et un seul échangeur est en marche la nuit. Lors d'une journée chaude (jour 241 à la Fig. 3) au moment où la température extérieure a atteint 30°C à 15h, la température après le capteur solaire était de 35,5°C. Avec la contribution de deux échangeurs, la température de séchage était alors de 42°C. Le tableau 2 illustre comment la radiation solaire et la biomasse



améliorent le pouvoir asséchant de l'air. Par exemple sous un ciel ensoleillé ( $653 \text{ W/m}^2$ ), le pouvoir asséchant de l'air augmente de 64% et jusqu'à 139% avec l'ajout de l'énergie des échangeurs.



**Figure 3. Températures de l'air et états des échangeurs et ventilateurs pour les jours 237 à 244 (25 août au 1<sup>er</sup> septembre).**

**Tableau 2. Gain du pouvoir asséchant de l'air jusqu'au point de saturation pour différents niveaux de radiations solaires et de températures extérieures.**

Point de mesure	Jour- Heure	Radiation  (W/m²)	Température  (°C)	Humidité relative  (%)	Vapeur	Vapeur	Séchage potentiel	Gain
					(g de vapeur/kg d'air)			
Air extérieur	241-15	653	30	56	15,0	17,8	2,8	0%
Après le capteur solaire			35,5	41	15,0	19,6	4,6	64%
À l'entrée du foin			42	29	15,0	21,7	6,7	139%
Air extérieur	274-13	78	15	92	9,9	10,3	0,4	0%
Après le capteur solaire			15	92	9,9	10,3	0,4	0%
À l'entrée du foin			23,5	55	9,9	12,6	2,7	575%
Air extérieur	240-3	3	15	84	9,0	9,6	0,6	0%
Après le capteur solaire			14,9	85	9,0	9,5	0,5	-17%
À l'entrée du foin			19,8	62	9,0	11,0	2,0	233%
Air extérieur	282-3	2	5	59	3,2	4,4	1,2	0%
Après le capteur solaire			4,7	60	3,2	4,3	1,1	-8%
À l'entrée du foin			10,4	40	3,2	5,3	2,1	75%

Le tableau 2 montre aussi que lors d'une journée nuageuse à faible radiation ( $78 \text{ W/m}^2$ ), le gain solaire est pratiquement nul. Toutefois, les échangeurs augmentent la température de 15 à  $23,5^{\circ}\text{C}$  et le pouvoir asséchant de l'air par un facteur de cinq. De même la nuit (jours 240 et 282), un seul

échangeur permettait d'améliorer le pouvoir asséchant de l'air parfois du double de ce qu'il aurait été juste avec l'air ambiant ou le solaire qui causait des pertes thermiques.

### Bilans énergétique et massique

Les intrants énergétiques (solaire, bois et électricité) ont été analysés selon leur contribution au préchauffage de l'air (Tableau 3). L'énergie solaire disponible durant toute la période de séchage était de 307,1 GJ mais seulement 64,8 GJ ont été transférées à l'air de procédé. L'efficacité de conversion du capteur solaire est de 21,1 %. Pour le bois, 13982 kg ont été consommés sur une période d'utilisation de 1319 h (consommation moyenne de 10,6 kg/h). En estimant la valeur calorifique du bois à 15,3 MJ/kg (Van Loo et Koppejan, 2007), cette quantité de bois contient théoriquement 213,7 GJ d'énergie brute. La combustion du bois a transféré 193 GJ dans l'eau de la chaudière (efficacité de 90,3 %). Des pertes thermiques et un retour partiel de l'eau vers la chaudière a fait en sorte que seulement 171,8 GJ (efficacité de 89 %) étaient disponibles pour les échangeurs de chaleur. Finalement, 127,6 GJ ont été transférés à l'air de séchage par les échangeurs (efficacité de 74,3 %). L'efficacité cumulative du système de combustion à la biomasse pour générer de l'air chaud est donc de 59,7 %. L'électricité compte pour environ 7 % des intrants énergétiques bruts avec une consommation nette de 31,2 GJ. Au total, 555,5 GJ ont été nécessaires pour générer 223,7 GJ utiles au procédé (efficacité globale de 40,3 %).

**Tableau 3. Bilan énergétique global pendant 55 jours d'opération du séchoir solaire-biomasse.**

Source	Énergie transférée à		Énergie brute (GJ)	Énergie nette (GJ)	Efficacité (%)	Eff. cumulative (%)
<b>Solaire</b>	<b>Air de séchage</b>		<b>307,1</b>	<b>64,8</b>	21,1	21,1
<b>Bois</b>	Eau chaudière	13982 kg	<b>213,7</b>	193,0	90,3	
Eau chaudière	Eau échangeur		193,0	171,8	89,0	
Eau échangeur	<b>Air de séchage</b>		171,8	<b>127,6</b>	74,3	59,7
<b>Électricité</b>	<b>Moteurs</b>	9643 kWh	<b>34,7</b>	<b>31,2</b>	90,0	90,0
<b>TOTAL</b>			<b>555,5</b>	<b>223,7</b>	<b>40,3</b>	

Le taux de cendre moyen pour la consommation totale de bois (13982 kg) était de 0,5 % de cendres fines et 0,85 % de cendres contenant des résidus de charbon de bois. Au total, 1,35 % de cendre et résidus ont été extraits. Ce taux pourrait être plus faible si les résidus de charbon de bois étaient séparés lors de l'entretien et remis dans la chambre de combustion primaire.

La teneur en eau initiale moyenne mesurée était de  $18,3 \pm 3,6$  %. Avec une masse initiale estimée de 22,5 kg par balle, la masse totale du lot de foin est de 134325 kg. La teneur en eau finale mesurée est de  $11,1 \pm 1,7$  %. Par calcul, la masse finale du lot de foin est de 123390 kg. L'eau totale évaporée est de 10935 kg ou 1,83 kg par balle. Avec un bilan d'énergie nette de 223,7 GJ, l'énergie d'évaporation spécifique est de 20,45 MJ/kg d'eau. Sur la base d'énergie brute (555,5 GJ), il faut fournir 50,8 MJ au procédé pour évaporer 1 kg d'eau.

### Analyse économique du système de chauffage à la biomasse

Le Tableau 4 détaille les charges variables, fixes et totales. Pour les charges variables, les bases des calculs sont: coût du bois franc de 230 \$ la corde de 2 pi x 4 pi x 8 pi, soit environ 0,25 \$/kg, électricité à 0,07 \$/kWh et tarif horaire de 25 \$/h par homme et 65 \$/h par tracteur (inclut le carburant, l'opérateur, un tracteur de 30 kW avec chargeur). Selon la méthode normée de

l'ASABE (2010a), les hypothèses suivantes sont utilisées pour calculer les charges fixes de la chaudière et des équipements périphériques (pompes, tuyaux d'amenée d'eau chaude, échangeurs, tuyaux de retour et installation) : amortissement sur 20 ans, utilisation annuelle normale de 110 jours, investissement de 29387 \$, valeur résiduelle de 10%, taux d'intérêt de 5% et coût des assurances de 2%. L'analyse n'inclut pas les coûts de récolte, de manutention du foin et d'amortissement du bâtiment de séchage, des ventilateurs et du système de capteurs solaires. Les charges énergétiques totales sont de 34,08 \$/t à 11% de teneur en eau. Le bois représente la plus grande charge (toutes charges confondues) avec un coût de 28,61 \$/t. La main d'œuvre, entièrement reliée à l'opération de la chaudière, coûte 13,31 \$/t. La chaudière et les équipements périphériques de chauffage coûtent 10,41 \$/t. Au total, la charge d'opération du séchoir avec la chaudière est de 57,80 \$/t ou 1,19 \$/balle.

Sur une base énergétique, le coût du bois revient à 16,50 \$ par GJ (énergie brute). Toutefois, en considérant les différents niveaux d'efficacités du système de chauffage associés aux modes de transferts de chaleur, le coût à la sortie de la chaudière (eau chaude disponible) est de 18,30 \$/GJ et le coût aux échangeurs est de 27,70 \$/GJ (énergie transmise à l'air de séchage).

**Tableau 4. Charges variables, fixes et totales pour l'opération du séchoir solaire avec une chaudière à la biomasse de 146 kW<sub>nom</sub>.**

	Coûts				
	(\$/h)	(\$/balle)	(\$/t à 11%)	(\$/t MS)	(\$/kg d'eau évap.)
<b>CHARGES VARIABLES</b>					
<b>Énergie (total)</b>	<b>3,19</b>	<b>0,70</b>	<b>34,08</b>	<b>38,32</b>	<b>0,38</b>
Solaire	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bois	2,68	0,59	28,61	32,17	0,32
Électricité	0,51	0,11	5,47	6,15	0,06
<b>Main d'œuvre (total)</b>	<b>1,25</b>	<b>0,28</b>	<b>13,31</b>	<b>14,96</b>	<b>0,15</b>
Chargement du bois	0,70	0,15	7,50	8,43	0,08
Tracteur	0,46	0,10	4,87	5,48	0,05
Vidange cendre	0,05	0,01	0,53	0,60	0,01
Entretien général	0,04	0,01	0,41	0,46	0,00
<b>CHARGES FIXES</b>					
<b>Chaudière (total)</b>	<b>0,97</b>	<b>0,22</b>	<b>10,41</b>	<b>11,70</b>	<b>0,12</b>
Matériaux et installation					
<b>CHARGES TOTALES</b>	<b>5,41</b>	<b>1,19</b>	<b>57,80</b>	<b>64,99</b>	<b>0,65</b>

## Conclusion

Le séchage du foin en grange à l'aide de l'énergie solaire et d'une chaudière à biomasse est un procédé durable qui utilise des sources renouvelables d'énergies, y compris l'électricité pour les ventilateurs et les pompes (hydro-électricité). En général, le système opérait avec 2 ou 3 ventilateurs en continu et deux échangeurs en journée contre un seul la nuit. Lors des journées ensoleillées avec 2 échangeurs en fonction, il était possible de doubler le pouvoir asséchant de l'air ambiant. Lors des journées nuageuses et durant la nuit où seulement le chauffage à la biomasse était mis à contribution, le pouvoir asséchant de l'air pouvait s'améliorer par un facteur de cinq. La ventilation à l'air chaud la nuit a permis de contrôler la température du foin et ainsi

éviter le chauffage occasionné par les bactéries. Durant la période de 55 jours de séchage, 5970 petites balles de 22,5 kg (134 t au total) à une teneur en eau initiale moyenne de 18,3% ont été séchées jusqu'à 11,1%, évaporant ainsi 10935 kg d'eau. L'énergie solaire totale utilisée pour préchauffer l'air de séchage était de 64,8 GJ et l'énergie électrique nécessaire aux ventilateurs et pompes était de 31,2 GJ. Au total, 13982 kg de bois franc et tendre ont été consommés pour une valeur théorique brute de 213 GJ. L'énergie provenant de la combustion de la biomasse transmise à l'air était de 127,6 GJ pour une efficacité du système de chauffage d'environ 60%. Le rapport d'énergie utile totale (223,7 GJ) sur l'énergie brute (555,5 GJ) donne une efficacité globale du procédé de 40% pour le chauffage de l'air. Le coût d'opération du procédé de séchage avec apport de chaleur de source biomasse est de 57,80 \$/t de foin à 11% de teneur en eau. Ce coût comprends 34,08 \$/t d'énergie (bois et électricité), 13,31 \$/t de main d'œuvre (chargement du bois) et 10,41 \$/t de frais d'amortissement de la chaudière. Le bois représente le coût le plus important avec 28,61 \$/t.

### **Perspectives**

Le séchoir tel que conçu permet de sécher plusieurs lots de foin récoltés durant plusieurs jours consécutifs. Toutefois, l'évolution de la teneur en eau est différente d'un lot à l'autre. Le séchage de certains lots durent parfois plus longtemps que nécessaire et les dépenses énergétiques sont plus grandes de ce qui serait strictement requis. Afin d'améliorer l'efficacité énergétique, un hydro-accumulateur permettrait d'envoyer plus d'eau chaude la nuit et moins d'eau chaude durant les périodes de radiation élevée. La chaudière pourrait aussi être équipée d'une valve thermostatique qui retourne l'eau directement dans la chaudière si celle-ci vient à s'épuiser. Cette modification permettra donc une utilisation continue et plus stable de la chaudière, réduisant ainsi les arrêts-départs qui causent d'importantes émissions de gaz de combustion dans l'atmosphère.

### **Liste des ouvrages cités**

ASABE. 2010a. ASABE Standards, 57<sup>e</sup> éd. EP496.2: Agricultural Machinery Management. St. Joseph, Mich.: ASABE.

ASABE. 2010b. ASABE Standards, 57<sup>e</sup> éd. S358.2: Moisture Measurement - Forages. St. Joseph, Mich.: ASABE.

Marceau J. et A. Amyot. 2007. Utilisation de l'énergie solaire pour le séchage de foin en petites balles- Phase 1 : Conception et évaluation du système - Rapport de projet. MAPAQ.

Marceau J. et A. Amyot. 2008. Utilisation de l'énergie solaire pour le séchage de foin en petites balles- Phase 2 : Évaluation du séchage dans deux types de grange - Rapport de projet. MAPAQ.

Marceau J. 2008. Performance de séchage de foin – Séchoir solaire Ferme du viaduc - Neuville- Rapport de projet. MAPAQ.

Van Loo, S. et J. Koppejan. 2007. The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing. ISBN 9781844072491. 464 pages.

# UTILISATION D'UNE REMORQUE AUTOCHARGEUSE POUR LA RÉCOLTE DE FIBRES DE MAÏS

PIERRE-LUC LIZOTTE<sup>1</sup>, PHILIPPE SAVOIE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département des sols et de génie agroalimentaire, 2425, rue de l'Agriculture, Université Laval, Québec (QC), G1V 0A6;

<sup>2</sup>Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560, boul. Hochelaga, Québec (QC), G1V 2J3  
Courriel : pierre-luc.lizotte@mail.mcgill.ca

## Résumé

La fibre de maïs peut servir de fourrage mais son utilisation comme litière est parfois plus rentable, notamment sur les fermes où les fourrages de qualité sont abondants. Dans ce contexte, une remorque autochargeuse et une presse à balles rondes ont été utilisées au printemps 2010 pour récolter plus de 30 ha de fibre de maïs. La fibre disponible au printemps avant la récolte a été estimée sur une base de matière sèche (MS) à 3,89 t MS/ha, soit environ la moitié de la fibre normalement observée à l'automne au moment de la récolte du grain. La fibre printanière était très sèche avec une teneur en eau (TEE) moyenne de 7,4%. L'autochargeuse a récupéré 57% du rendement disponible tandis que la presse à balles rondes en a récupéré 36%. Le ramasseur d'andains de l'autochargeuse, muni de six barres de dents et d'un auvent métallique, soulevait plus efficacement l'andain que la presse à balles rondes avec seulement quatre barres à dents sans auvent. L'autochargeuse avançait à grande vitesse au champ (~16 km/h) et avait un très grand débit massique de fibre (16,7 t MS/h) comparativement à la presse à balles rondes (5,0 km/h; 5,5 t MS/h). Les résultats ont permis de faire des simulations mathématiques de récolte et de transport de fibre en fonction de la superficie récoltée, de la distance entre le champ et la ferme et le rendement pré-récolte de fibre. Les résultats de simulation ont démontré qu'une remorque autochargeuse récoltait la fibre plus rapidement que la presse, excepté quand les distances de transport étaient supérieures à 6,6 km. Ces résultats pourront servir à estimer plus précisément le coût de récolte de fibre de maïs.

## Introduction

La fibre de maïs peut servir de fourrage, de litière, de matériau de base pour des panneaux agglomérés ou de substrat pour des conversions chimiques comme l'éthanol cellulosique (D'Amours et Savoie, 2008). La rareté et le prix croissants des litières traditionnelles (pailles de céréales, copeaux de bois) ont fait de la fibre de maïs une nouvelle option intéressante. En 2007, la Fédération des producteurs de bovins du Québec lançait d'ailleurs un cri d'alarme en commanditant une « Revue de littérature sur les litières en production bovine » (FPBQ, 2007). L'étude avait pour but d'identifier de nouvelles sources de litière à prix abordable.

Chaque année, le maïs-grain est cultivé sur près de 400 000 ha au Québec. Avec des quantités de résidus de l'ordre de 8,6 à 9,0 t MS/ha laissées au champ suite au battage du grain (D'Amours et Savoie, 2008; Lizotte et Savoie, 2009), la fibre de maïs peut représenter une litière alternative abondante. Selon Kains et al. (1998), les résidus de maïs ont un pouvoir d'absorption élevé, c'est-à-dire le rapport entre la masse maximum d'eau absorbée et la masse initiale de résidus. Ce pouvoir d'absorption est de 2,5 pour les fibres de maïs alors que celui des sciures, de la ripe de

bois et de la paille de céréale est de 2,0, 1,75 et 2,2, respectivement. Le coût de récolte des résidus de maïs serait également 82 % inférieur au prix d'achat de sciure et de ripe (FPBQ, 2007). Rares sont les rapports détaillant les quantités de résidus ou le nombre d'agriculteurs utilisant la fibre de maïs sous forme de litière. Selon les données présentement publiées, 5% de la superficie totale cultivée en maïs-grain au Canada serait récoltée après le grain pour les résidus à des fins de litière (AAFC-AAC, 2010).

La fibre de maïs peut être récoltée de différentes façons. Bien que la séquence d'opérations traditionnelle consiste à faucher, râtelier et presser les résidus, certains utilisent des séquences différentes en omettant, par exemple, de faucher ou de râtelier les fibres avant le pressage (Sokhansanj et al., 2002; Behling, 2006; Shinnors, 2007). D'autres ne récolteront pas les fibres à l'aide d'une presse, mais avec une fourragère ou une moissonneuse-batteuse modifiée pour séparer la fibre du grain. Aucun article scientifique n'a été répertorié traitant de la récolte de la fibre de maïs à l'aide d'une remorque autochargeuse. Cet équipement est généralement utilisé pour la récolte d'herbe sèche ou humide. Une autochargeuse est constituée d'une remorque fermée munie d'un ramasseur d'andain. Une porte arrière et un pont à chaîne permettent d'évacuer rapidement le fourrage accumulé. Peu utilisé au Québec, cet équipement est répandu en Europe pour la récolte de l'herbe et la mise en silo couloir.

Au printemps 2010, des résidus de maïs ont été récoltés sur 30,6 ha. Deux séquences d'opérations ont été testées au champ. Les objectifs de cette étude étaient de : 1) mesurer les paramètres de récolte de fibre de maïs pour les deux séquences d'opérations, 2) comparer l'utilisation d'une autochargeuse à celle d'une presse à balles rondes.

## **MÉTHODOLOGIE**

### **Méthodes et matériel**

Les expériences de récolte de fibre de maïs se sont déroulées chez un producteur de bovins situé à Sainte-Hélène-de-Bagot, au Québec. Ce producteur fait l'engraissement de près de 3200 bouvillons par année sur deux sites d'élevage. Il cultive plus de 1000 ha en fourrages et en céréales afin de nourrir ses bêtes. La récolte de fibre s'est déroulée sur deux jours au printemps 2010, soit le 12 et 13 mai, dans des champs où le maïs-grain avait été récolté six mois auparavant, en octobre ou novembre 2009. La première journée a été consacrée à la fauche et à l'andainage alors que la deuxième journée a été dédiée à la récolte et au transport de la fibre au site d'entreposage. La fibre provenait des hybrides Pride 6012 G3 et Pioneer 37R71, 38B85 et 38N86.

Dans tous les cas, la fibre a été fauchée et andainée en un seul passage à l'aide d'un broyeur-andaineur de 4,57 m (15') de largeur de marque Hiniker (modèle 5610); la force motrice était un tracteur Case IH (modèle MX135 de 86 kW, 115 hp). Les andains étaient regroupés en paire (9,1 m de largeur de fauche; 1,2 m de largeur d'andain regroupé) pour le ramassage subséquent. Sur une partie des champs, la fibre était ensuite pressée en balles rondes de 1,2 m de largeur par 1,5 m de diamètre avec une presse de marque New Holland (modèle 648) et un tracteur Case IH (modèle MX135 de 86 kW, 115 hp). Les balles ont été chargées, transportées et déchargées avec un tracteur Case IH (modèle MX120 de 78 kW, 105 hp) et une remorque d'une capacité de 17 balles. Sur l'autre partie des champs, la fibre de maïs a été récoltée et transportée à un silo couloir à l'aide d'une remorque autochargeuse de marque Pöttinger (modèle Jumbo Combiline 6600) et d'un tracteur New Holland (modèle T7070 de 168 kW, 225 hp). L'autochargeuse a été utilisée pour récolter une parcelle de 7,7 ha située à 2,5 km du site d'entreposage. L'autochargeuse avait

une capacité volumique de 66 m<sup>3</sup>. Durant les tests, 23 des 45 couteaux étaient actionnés pour maintenir une longueur de hachage adéquate et une bonne capacité de ramassage.

Les rendements totaux de fibre de maïs ont été évalués en échantillonnant la fibre se trouvant dans les andains et entre les andains à trois endroits différents par champ. Les andains étaient échantillonnés sur une surface correspondant à 1 m de longueur par la largeur de l'andain, soit 1,2 m en moyenne. La fibre laissée entre les andains était prélevée sur 1 m de longueur et deux interrangs de maïs de 0,76 m (30"). Les rendements étaient établis en considérant la position des andains et les quantités prélevées. Bien qu'ils aient été mesurés suite à la fauche, ces rendements correspondent aux rendements avant récolte. Ils représentent la quantité totale de fibre se trouvant sur le champ avant la récolte. Tous les voyages de remorque à balles et d'autochargeuse ont été pesés à la ferme à l'aide d'une balance Moducam de 80 t (précision +/- 10 kg). Les rendements récoltés ont été déterminés à partir de ces quantités pesées.

Toutes les opérations de fauche/andainage, de récolte et de transport ont été chronométrées. Les superficies récoltées ont été délimitées à l'aide d'un GPS Garmin 76. Ce même instrument a permis de mesurer la vitesse des machines au champ. Vingt balles rondes provenant de différents champs ont été pesées, mesurées pour estimer le volume et échantillonnées pour la TEE. Deux prélèvements ont été pris sur chaque balle afin d'évaluer la TEE. Les échantillons de rendement et de TEE ont été séchés à l'étuve durant 72 h et pesés à une précision de 0,1 g à l'aide d'une balance Denver Instrument (modèle MXX-5001).

## **Modèles**

Pour extrapoler les résultats expérimentaux, on a développé des modèles de récolte et de transport de fibre de maïs pour deux systèmes. La capacité d'une presse à balles rondes prend en considération le pressage de la fibre et également le temps nécessaire à l'attachement et à l'éjection des balles. Elle est toutefois indépendante de l'opération de transport des balles rondes qui se fait séparément. Dans les simulations, on considère une ou deux remorques de transport de balles rondes qui impliquent autant de tracteurs et d'opérateurs supplémentaires. Lors de l'utilisation d'une remorque autochargeuse, la même machine fait la récolte et le transport successivement. L'utilisation d'une autochargeuse n'implique qu'un seul opérateur.

Pour chacun des modèles, la simulation débute lorsque l'opérateur commence à récolter et se termine lors que toute la fibre est entreposée. Les suppositions suivantes sont considérées durant la modélisation :

1. Toutes les balles sont immédiatement transportées au site d'entreposage après le pressage.
2. La vitesse de transport hors route à vide a été définie à 30 km/h; elle est supposée être la même pour l'autochargeuse vide, chaque remorque vide et la presse.
3. La dernière balle de fibre à être pressée est attachée et éjectée au champ et ce, peu importe sa grosseur.
4. On suppose 15 min pour détacher la presse et attacher la ou les remorques à la ferme.
5. Peu importe la quantité de fibre se trouvant dans la remorque autochargeuse, le temps de déchargement est toujours le même. Le pont à chaîne permettant d'évacuer la fibre doit faire un cycle complet pour décharger tout le contenu de la chambre et ce, même si une petite quantité de fibre est entassée à la sortie du système de couteaux.

## Résultats et discussion

### Résultats de récolte

Les rendements de fibre estimés avant la récolte au printemps 2010 étaient en moyenne de 3,89 t MS/ha (Tableau 1). Les rendements minimums et maximums étaient de 2,76 et 5,04 t MS/ha. Un rendement aussi bas que 2,76 t MS/ha peut s'expliquer du fait que pour certains champs, le producteur a fait la récolte des grains, des rafles et des spathes à l'automne 2009 à l'aide d'un système de récupération des résidus Redekop. D'autres facteurs diminuent les rendements de fibre en référence à ceux observés à l'automne tels que la sénescence de la fibre, le vent, la pluie, la neige et l'oxydation naturelle. La séquence d'opérations incluant l'autochargeuse a permis de récupérer 57% de la fibre se trouvant au champ avant la récolte (Tableau 1). Or, les résultats d'efficacité de récolte démontrent que, pour la séquence d'opérations avec presse à balles rondes, seulement 36 % de la fibre a été collectée.

Tableau 1. Rendement de fibre de maïs avant et après la récolte au printemps 2010 sur une base de matière sèche (MS) ou matière humide (MH).

	Zone presse à balles rondes	Zone autochargeuse	Moyenne ou total*
Échantillonnage pré-récolte			
Rendement (t MS/ha)	4,05	3,23	3,89
Écart-type de rendement (t MS/ha)	0,85	0,60	0,84
Après broyeur-andaineur			
Rendement (t MS/ha)	2,42	1,85	2,33
Fibre récoltée, transportée et pesée			
Récolte totale (t MH)	35,9	15,3	51,2*
Superficie totale (ha)	22,9	7,7	30,6*
Teneur en eau (%)	8,0	6,8	7,4
Rend. récolté (t MS/ha)	1,44	1,85	1,55
Biomasse récupérée (%)	36%	57%	40%

Le Tableau 2 présente les vitesses de récolte au champ de la presse et de l'autochargeuse. Les vitesses de l'autochargeuse sont basées sur l'ordinateur de bord du tracteur qui indiquait une moyenne de 16 km/h. L'efficacité de récolte et la vitesse au champ sont plus élevées pour l'autochargeuse que pour la presse à balles rondes, en partie à cause de la configuration du ramasseur. Le ramasseur de l'autochargeuse était constitué de six barres de dents, alors que celui de la presse en n'avait que quatre. Un plus grand nombre de barres génère un contact plus fréquent des dents avec la fibre permettant un meilleur convoyage de la fibre. Également, l'autochargeuse était munie d'un auvent métallique surplombant le ramasseur limitant considérablement le reflux de fibre vers l'avant du ramasseur. Un reflux de la fibre vers l'avant du ramasseur a été répertorié dans la littérature sur différentes machines de récolte (Vermeer, 2005; Shinnars et al. 2007). Un tel reflux a pour effet de disperser une partie de la fibre sur les côtés, de générer des pertes et de ralentir la vitesse de récolte. L'effet combiné d'un plus grand nombre de barres de dents et de l'auvent du ramasseur de l'autochargeuse ont permis une meilleure préhension de la fibre vers l'intérieur de la chambre de compression résultant en un débit massique, une efficacité et une vitesse de récolte plus élevés que ceux de la presse à balles rondes.



Tableau 2. Vitesse, capacité, débit massique et efficacité au champ (incluant le transport à 2,5 km dans le cas de l'autochargeuse).

	Broyeur- andaineur	Presse à balles rondes	Autochargeuse
Vitesse au champ (km/h)	12,3	5,0	16,0
Débit massique (t MS/h)	17,4	5,5	16,7
Largeur de travail (m)	4,57	9,14	9,14
Capacité			
Réelle au champ (ha/h)	5,1	3,8	
Théorique (ha/h)	5,6	4,6	14,6
Efficacité au champ (%)	90%	84%	

Le tableau 3 présente certains paramètres mesurés durant les essais au champ. La TEE moyenne de la fibre pour toutes les superficies récoltées était de 7,4%. Les TEE minimum et maximum étaient de 5,3 et 10,6%, respectivement. La masse de fibre pouvant être refoulée à l'intérieur de l'autochargeuse était en moyenne de 2854 kg MS (43 kg MS/m<sup>3</sup>). Durant les tests, jusqu'à 3878 kg MS de fibre ont été accumulés dans l'autochargeuse. Cependant, une telle quantité engendrait un débordement par le dessus de la chambre et des pertes durant le transport. Les vitesses de transport présentées au tableau 3 ont été mesurées hors route; c'est-à-dire sur des chemins de terre longeant les champs. La vitesse de transport de l'autochargeuse était 5% inférieure à celle du transport des balles rondes. Aucune vitesse de transport sur route asphaltée n'a été mesurée pour l'autochargeuse. Pour le transport des balles rondes sur route asphaltée, la vitesse moyenne était de 33,6 km/h, soit 45% supérieur à la vitesse hors route. La masse moyenne des balles pressées était de 191 kg MS pour une densité de 86,9 kg MS/m<sup>3</sup>.

Tableau 3. Paramètres mesurés durant les essais au champ et servant à la modélisation des séquences d'opérations.

Autochargeuse	
Masse moy. de fibre par voyage (kg MS)	2854
Temps de déchargement (s)	90
Vitesse de transport lorsque chargée (km/h)	20,6
Presse à balles rondes	
Masse moy. des balles (kg MS)	191
Balles par remorque (balles)	17
Temps moy. de chargement (s/balle)	56
Temps moy. de déchargement (s/balle)	25
Vitesse de transport des balles (km/h)	23,2
Champ type	
Superficie (ha)	7,7
Distance du champ au site d'entreposage (km)	2,5
Rendements de fibre (t MS/ha)	3,89
TEE de la fibre (% b. h.)	7,4

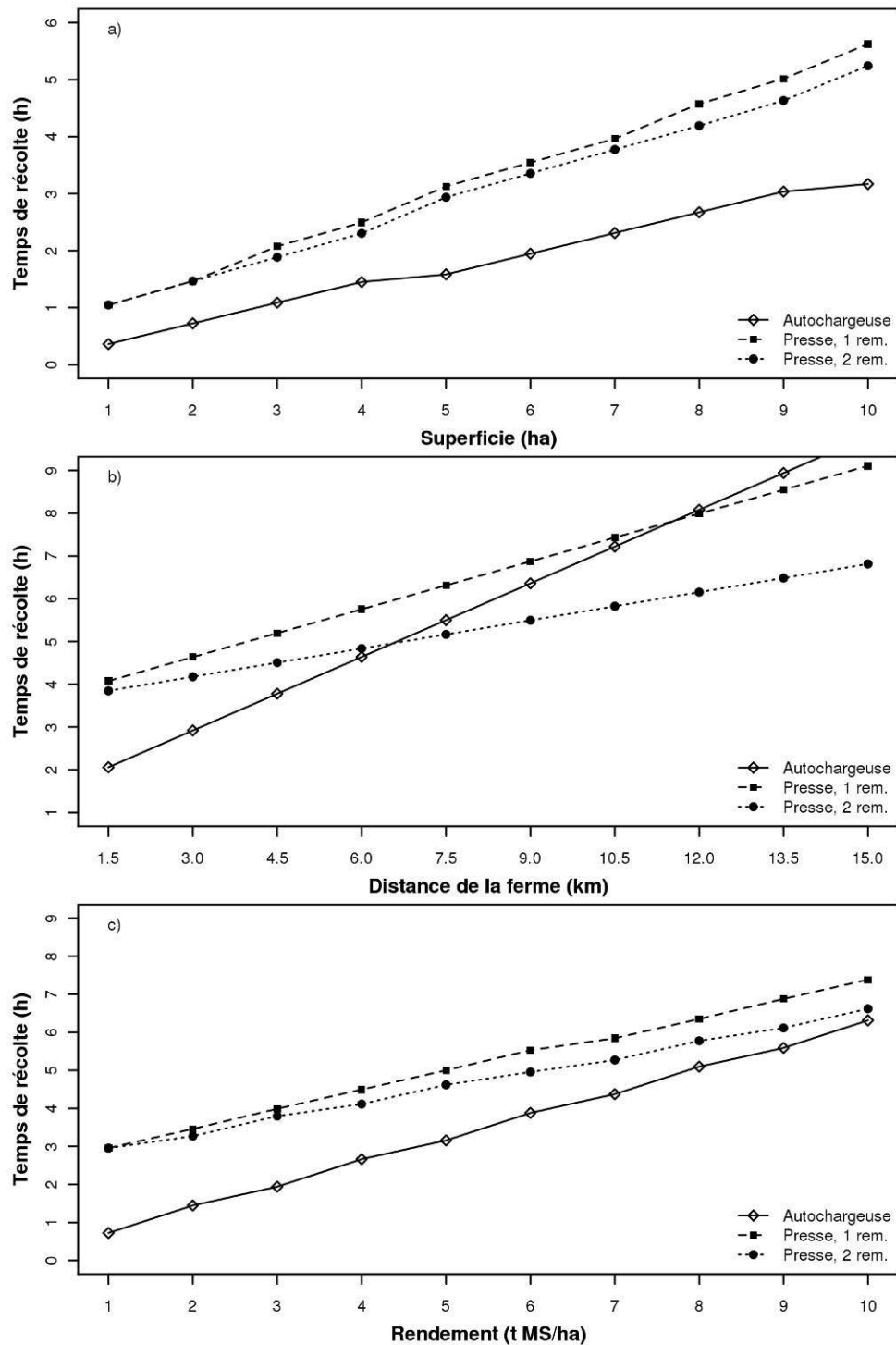


FIGURE 1. TEMPS DE RÉCOLTE, INCLUANT LE TRANSPORT, POUR TROIS CHANTIERS À DEUX CONDITIONS FIXES SUR TROIS (SUPERFICIE DE 7,7 ha; DISTANCE DE 2,5 km ENTRE LE CHAMP ET LA FERME; RENDEMENT PRÉ-RÉCOLTE DE 3,89 t MS/ha). LA CONDITION VARIABLE EST : A) LA SUPERFICIE À RÉCOLTER, B) LA DISTANCE DU CHAMP À LA FERME; C) LE RENDEMENT DE FIBRE PRÉ-RÉCOLTE.

### **Modélisation des temps de récolte**

La figure 1 illustre les résultats obtenus avec les modèles développés. Trois simulations ont été complétées. Une première traitait des temps de récolte en fonction de la superficie récoltée (figure 1a), une deuxième traitait des temps de récolte en fonction de la distance séparant le champ du site d'entreposage (figure 1b) et une troisième traitait des temps de récolte en fonction des rendements de fibre de maïs avant la récolte (figure 1c). Les paramètres du champ type présentés dans le tableau 3 ont été utilisés pour les trois simulations. De ces paramètres, uniquement la variable indépendante de chaque simulation a été altérée. Les résultats de la première simulation (figure 1a) montrent que le temps nécessaire pour compléter les opérations de récolte et de transport d'une remorque autochargeuse est inférieur aux mêmes opérations d'une presse à balles rondes avec une ou deux remorques. En 3 h de travail, l'autochargeuse récolterait environ 8,9 ha alors qu'une presse avec une ou deux remorques récolteraient 4,8 ha ou 5,2 ha. Toujours pour 3 h de travail, les quantités de fibre entreposées seraient de 19,8, 6,6 et 7,1 t MS pour une autochargeuse, une presse avec une remorque et avec deux remorques. L'efficacité en termes de temps et de quantité entreposée de la remorque autochargeuse résulterait de sa capacité à prélever davantage de résidus au passage (57%) et des courtes distances de transport à parcourir pour un champ situé à 2,5 km. La figure 1b montre que pour une parcelle de 7,7 ha située au-delà de 6,6 km du site d'entreposage, une séquence d'opérations incluant une presse et deux remorques résulterait en un temps de récolte moins élevé. Si une seule remorque à balles est disponible, l'autochargeuse serait l'équipement plus rapide en termes de temps de récolte et de transport pour une parcelle de 7,7 ha située à moins de 11,6 km.

Ces distances ne sont pas représentatives d'une situation réelle, car elles sont basées sur des vitesses de transport hors routes. Au Québec, il est peu probable qu'un champ situé à 6,6 km de la ferme ne requière aucun transport sur route asphaltée. Néanmoins, les résultats démontrent que l'utilisation remorque autochargeuse peut s'avérer très efficace en termes de temps de récolte pour des parcelles éloignées du site d'entreposage. Le rendement maximum moyen de fibre de maïs mesuré au Québec pendant la période des battages était de 9,0 t MS/ha (D'Amours et Savoie, 2008). Selon les résultats de modélisation, les temps de récolte seraient de 5,6, 6,9 et 6,1 h pour compléter une superficie de 7,7 ha à un rendement de 9,0 t MS/ha pour les séquences d'opérations incluant une autochargeuse, une remorque et deux remorques à balles. Les quantités entreposées seraient de 39,5 et 24,9 t MS de fibre en vrac et en balles, respectivement. Pour les trois simulations, le transport de balles rondes à l'aide de deux remorques de 17 balles permettrait d'obtenir des temps de récolte inférieurs à une séquence avec une seule remorque.

### **Conclusion**

Au printemps 2010, des résidus de maïs ont été fauchés-andainés en une opération suivie par le ramassage soit avec une remorque autochargeuse ou avec une presse à balles rondes. La récolte printanière a permis de collecter une fibre de maïs très sèche avec une teneur en eau moyenne de 7,4%. Ces conditions facilitent la conservation sèche de la fibre et en font un matériau de choix comme litière grâce à une grande capacité d'absorption. Selon les mesures prises au champ, l'autochargeuse permettrait de collecter davantage de fibre au passage (57% du rendement disponible) que la presse à balles rondes utilisée (36% du rendement disponible). Ceci serait dû à la qualité supérieure du ramasseur d'andains de l'autochargeuse muni de plusieurs barres de dents et d'un auvent. Ces composantes minimiseraient le reflux et les pertes de fibre; elles maximiseraient la préhension de la fibre à l'intérieur de la chambre de compression. Les résultats de modélisation ont démontré que l'utilisation d'une remorque autochargeuse peut s'avérer très

efficace en termes de temps de récolte et de transport de fibre au site d'entreposage. Ces résultats de modélisation devraient être jumelés à une étude économique pour déterminer la viabilité d'utilisation d'une remorque autochargeuse à la ferme.

## Remerciements

Les auteurs remercient La Coop fédérée et Agriculture et Agroalimentaire Canada pour leur soutien accordé dans le cadre d'un projet du Programme de partage des frais à l'investissement (PPFI) en recherche et développement. Une partie des travaux de recherche est également possible grâce au soutien d'une Bourse en milieu pratique (programme BMP) du Fonds québécois pour la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) et du Conseil de recherche en sciences naturelles et génie du Canada (CRSNG). Les auteurs remercient François-Simon Robert et Héloïse Bastien pour leur assistance technique, et les propriétaires de la Ferme M.B.M. Daigle pour l'accès aux champs et aux données de récolte.

## Bibliographie

- AAFC-AAC. 2010. Corn stover. Disponible sur le site: <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1226595533096&lang=eng>
- Behling, A. 2006. Extending The Season. Hay & Forage Grower. May.
- D'Amours, L. et P. Savoie. 2008. Fractionnement de la fibre de maïs pour servir comme fourrage, bioénergie et biomatériau. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages, Victoriaville, le 19 février. Pages 38-47. CQPF-CRAAQ, Québec. Disponible sur le site: <http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/documents/Compte%20rendu%20%20DJISF%202008.pdf>
- FPBQ. 2007. Revue de littérature sur les litières en production bovine. 66 pages Préparée par BPR pour le compte de la Fédération des producteurs de bovins du Québec, Longueuil, QC.
- Kains, F., B. Lowell, M. Payne, R. Tremblay. 1998. Livestock Bedding Alternatives. Guelph, Ontario: Ontario Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs.
- Lizotte, P.-L. et P. Savoie. 2009. Récolte fractionnée de la fibre de maïs. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages, Victoriaville, le 17 février. Pages 57 à 66. CQPF-CRAAQ. Sur le site: <http://www.agrireseau.qc.ca/bovinsboucherie/documents/Demi-Journee%202009d.pdf>
- Shinners, K. J. 2007. Options for Harvesting Corn Stover for Supplemental Feed. Madison, Wisconsin: University of Wisconsin-Extension.
- Shinners, K. J., B. N. Binversie, R. E. Muck, P. J. Weimer. 2007. Comparison of wet and dry corn stover harvest and storage. Biomass and Bioenergy. 31(4): 211-221.
- Sokhansanj, S., A. Turhollow, J. Cushman, J. Cundiff. 2002. Engineering aspects of collecting corn stover for bioenergy. Biomass and Bioenergy. 23(5): 347-355.
- Vermeer. 2005. Cornstalk Baling Solutions - Baling Tips and Feeding Cornstalks. Pella, Iowa: Vermeer Manufacturing Company.