



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

Mardi, le 19 février 2008

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

Les plantes fourragères s'avèrent plus que jamais un élément essentiel du développement économique et environnemental durable du secteur agricole. Elles sont également appelées à jouer un rôle déterminant dans le domaine émergent de la bioéconomie. Elles possèdent des avantages concurrentiels indéniables en ce qui a trait au développement des filières de productions animales et de biocarburants à faibles émissions de gaz à effet de serre.

L'édition 2008 de la demi-journée d'information scientifique illustre bien cette année encore le dynamisme et le caractère actuel de la recherche qui a cours présentement en plantes fourragères au Québec. Les textes regroupés dans le présent document résument les présentations de neuf communications qui y ont été présentées. On y traite, entre autres, de l'impact de la valeur nutritive des fourrages sur la productivité et la santé des animaux. On fait également état de résultats de travaux sur la valorisation de fumures organiques pour la production durable des plantes fourragères, de l'utilisation d'énergies renouvelables pour leur conservation, ainsi que de leur utilisation pour la production de bioénergie et de biomatériaux.

Nous tenons à remercier les conférenciers d'avoir bien voulu partager le fruit de leurs travaux de recherche les plus récents. Nous espérons que la lecture de ce compte-rendu vous permettra de découvrir de nouvelles perspectives en production fourragère et de prendre la pleine mesure de cette ressource clé pour notre l'agriculture au Québec.

Gaëtan Tremblay, président, et Yves Castonguay, vice-président,
Comité Plantes Fourragères du CRAAQ

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|----|
| 1- Composition minérale et digestibilité de la fléole récoltée à différents stades de développement. <u>Sophie Pelletier</u> | 3 |
| 2- Un foin de fléole à faible DACA améliore l'homéostasie du calcium chez la vache en période de transition. <u>Gaëtan Tremblay</u> | 7 |
| 3- Valeur nutritive et rendement de vieilles prairies de fléole des prés. <u>Gilles Bélanger</u> | 9 |
| 4- Fertilisation azotée de prairies avec des lisiers porcins déphosphatés au Mg. <u>Gaëtan Parent</u> . | 11 |
| 5- Utilisation de l'énergie solaire pour le séchage de foin en petites balles : Phase I : Conception et évaluation du système. <u>Jocelyn Marceau</u> | 13 |
| 6- Utilisation de l'énergie solaire pour le séchage du foin en petites balles : Évaluation du séchage dans deux types de grange. <u>André Amyot</u> | 21 |
| 7- Des plantes fourragères pour la production de méthane. <u>Philippe Savoie</u> | 29 |
| 8- Mesure de la teneur en eau en continu durant le séchage du foin en balles. <u>Étienne Cormier</u> | 30 |
| 9- Fractionnement de la fibre de maïs pour servir comme fourrage, bioénergie et biomatériau. <u>Luc D'Amours</u> | 38 |

Composition minérale et digestibilité de la fléole des prés récoltée à différents stades de développement

Sophie Pelletier¹, Gaëtan Tremblay¹, Gilles Bélanger¹, Philippe Seguin², Raynald Drapeau³ et Guy Allard⁴

^{1,3}Agriculture et Agroalimentaire Canada; ¹Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 boul. Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3 (pelletiers@agr.gc.ca);

³Normandin, QC, Canada G1M 4K3;

²Department of Plant Science, Macdonald Campus, McGill University, Sainte-Anne-de-Bellevue, QC, H9X 3V9;

⁴Département de phytologie, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec, QC, Canada G1K 7P4.

La valeur nutritive des fourrages servis aux ruminants est estimée, entre autres, par la concentration en fibres insolubles au détergent neutre (NDF), la digestibilité de la matière sèche (DMS) et la digestibilité de la NDF (DNDF) (Bélanger et coll., 2001). L'indice de tétanie d'herbage (TH) et la différence alimentaire cations-anions (DACA) sont aussi d'importants indicateurs de la valeur nutritive des fourrages. L'indice de TH détermine le risque d'une ration à causer la tétanie d'herbage chez les animaux qui la consomment. Cet indice se calcule avec la formule suivante :

$$\text{Indice de TH} = K^+ / (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \quad (\text{Kemp et 't Hart, 1957}) \quad [1]$$

L'incidence de la tétanie d'herbage chez les animaux augmente de manière importante lorsque l'indice de TH dépasse 2,2. La DACA représente quant à elle le risque d'une ration à causer la fièvre du lait au vêlage. Elle est calculée avec la formule suivante :

$$\text{DACA (mmol/kg de matière sèche)} = [(K^+ + Na^+) - (Cl^- + 0,6 S^{2-})] \quad (\text{Goff et coll., 2004}) \quad [2]$$

Durant les trois semaines précédant le vêlage, les vaches devraient recevoir une ration ayant une DACA d'environ -42 mmol/kg de matière sèche (MS) (Pelletier et coll., 2008). La DACA de la ration peut être diminuée par l'ajout de sels anioniques. Pour éviter que ces derniers ne réduisent la quantité de nourriture ingérée par l'animal, la DACA des fourrages devrait être inférieure à 290 mmol/kg MS. Une gestion appropriée du K et une fertilisation en Cl se sont avérées efficaces pour réduire la DACA des fourrages à des valeurs acceptables pour les vaches tarées (Pelletier et coll., 2007a, b).

Une récolte tardive de la fléole en affecte le rendement, la DACA, la digestibilité de la MS et celle de la fibre NDF, ainsi que les concentrations en minéraux et NDF (Bélanger et coll., 2001; Pelletier et coll., 2006). Cependant, la plupart des études sur le stade de développement de la fléole à la récolte se sont intéressées aux changements survenant avant le stade fin épiaison à la récolte du printemps, et seulement sur un nombre restreint de paramètres de la valeur nutritive. L'objectif de la présente étude était d'évaluer l'effet d'une récolte tardive, soit une semaine après

le stade fin épiaison, sur la concentration en minéraux et en NDF, la DMS, la DNDF, la DACA et l'indice de TH de la fléole récoltée au printemps et à l'été.

Matériel et Méthodes

Cet essai a été réalisé sur deux années avec le cultivar « Champ » de fléole des prés dans trois champs de la province de Québec présentant différentes teneurs en K du sol (Normandin, 311 kg K/ha; Sainte-Anne-de-Bellevue, 290 kg K/ha; Saint-Augustin-de-Desmaures, 199 kg K/ha). Les croissances de printemps et d'été de la fléole ont chacune été récoltées à deux stades de développement : fin épiaison et une semaine plus tard (récolte tardive). Le choix de ces stades est basé sur des résultats précédents (Pelletier et coll., 2006). À chaque récolte, les rendements, la concentration en NDF, la DMS, la DNDF, la DACA, l'indice de TH et la composition minérale de la fléole ont été déterminés.

Résultats

Rendements en MS

Un délai dans la récolte du printemps de la fléole a augmenté les rendements à Sainte-Anne-de-Bellevue et Saint-Augustin-de-Desmaures, mais n'a pas eu d'effet à Normandin (Tableau 1). À l'été, le report de la récolte a diminué les rendements à Normandin et Sainte-Anne-de-Bellevue, mais les a augmentés à Saint-Augustin-de-Desmaures.

DACA et indice de TH

La fléole récoltée à l'été à chacun des trois sites présentait une DACA acceptable pour les vaches pré-partum (inférieure à 290 mmol/kg MS) (Tableau 2). Au printemps, seule la fléole récoltée tardivement à Saint-Augustin-de-Desmaures avait une DACA acceptable pour les vaches pré-partum. Toujours au printemps, la fléole récoltée tardivement avait une DACA inférieure en moyenne de 17 % (-59 mmol/kg MS) comparativement au stade fin épiaison. Cette diminution de la DACA avec l'avancement en maturité de la fléole est attribuable à une diminution concomitante de la concentration en K des fourrages (moyenne de -11 % ou -3,0 g/kg MS), tandis que la concentration en Cl n'a que faiblement diminué (-0,75 g/kg MS) à un seul des trois sites (Tableau 2). À l'été, la concentration en K de la fléole était également inférieure lorsque récoltée tardivement comparativement au stade fin épiaison (moyenne de -4 % ou -0,9 g/kg MS). Cette diminution n'était significative qu'à deux des trois sites et cela a eu pour effet de diminuer la DACA à ces deux sites.

Un report de la récolte de la fléole n'a diminué significativement l'indice de TH qu'à la coupe du printemps à Sainte-Anne-de-Bellevue (Tableau 2). L'indice de TH était généralement acceptable (< 2,2) pour les animaux, sauf pour la coupe du printemps à Sainte-Anne-de-Bellevue et à Normandin, où il était égal ou supérieur à 2,2. Les valeurs les plus élevées d'indice de TH étaient associées à des concentrations élevées en K et faibles en Ca et Mg de la fléole.

Concentration en NDF, DMS et DNDF

Au printemps, la fléole récoltée tardivement présentait une concentration en NDF plus élevée et une digestibilité de la MS et de la fibre NDF plus faible que la récolte au stade fin épiaison (Tableau 1). À l'été, le report de la récolte n'a diminué la digestibilité de la fléole et augmenté la concentration en NDF seulement qu'à Normandin. La digestibilité de la fléole était généralement plus élevée à l'été qu'au printemps, probablement à cause des rendements plus élevés au printemps. En effet, il est bien connu que la digestibilité de la fléole diminue avec l'augmentation du rendement (Bélanger et coll., 2001).

Conclusion

Au printemps, une récolte tardive réduit significativement la DACA et tend à réduire l'indice de TH de la fléole. Le report de la récolte à l'été a un effet variable et moins prononcé. Le risque pour les animaux d'être atteints de la fièvre du lait ou de la TH s'en trouve réduit avec le report de la récolte au printemps. Ce délai dans la récolte, cependant, était associé à une diminution de la DMS et de la DNDF, ainsi qu'à une augmentation de la concentration en NDF. Un producteur qui voudrait retarder la récolte de la fléole dans le but de réduire la DACA ou l'indice de TH devra considérer le risque de diminution de la digestibilité de ces fourrages. La valeur nutritive de la croissance printanière de la fléole sera davantage affectée par un report de la récolte que celle de la croissance d'été.

Liste des ouvrages cités

- Bélanger, G., R. Michaud, P.G. Jefferson, G.F. Tremblay et A. Brégar. 2001. Improving the nutritive value of timothy through management and breeding. *Can. J. Plant. Sci.* 81:577–585.
- Goff, J.P., R. Ruiz et R.L. Horst. 2004. Relative acidifying activity of anionic salts commonly used to prevent milk fever. *J. Dairy Sci.* 87:1245–1255.
- Kemp, A. et J.L. 't Hart. 1957. Grass tetany in grazing milking cows. *Neth. J. Agric. Sci.* 4:5–17.
- Pelletier, S., G. Bélanger, G.F. Tremblay, A. Brégar et G. Allard. 2006. Dietary cation anion difference (DCAD) of timothy as affected by development stage and N and P fertilization. *Agron. J.* 98:774–780.
- Pelletier, S., G. Bélanger, G.F. Tremblay, M.H. Chantigny et G. Allard. 2008. Dietary cation-anion difference and tetany index of timothy forage fertilized with liquid swine manure. *Agron. J.* 100:213–220.
- Pelletier, S., G. Bélanger, G.F. Tremblay, P. Seguin, R. Drapeau et G. Allard. 2007a. Dietary cation-anion difference of timothy (*Phleum pratense* L.) as influenced by application of chloride and nitrogen fertilizer. *Grass Forage Sci.* 62:66–77.
- Pelletier, S., R. Simpson, P. Randall, G. Bélanger, G.F. Tremblay, P. Seguin, R. Drapeau et G. Allard. 2007b. Forage dietary cation-anion difference and cadmium concentration in grasses fertilized with chloride. *Grass Forage Sci.* 62:416–428.

Tableau 1. Rendements en matière sèche (MS), concentration en fibres solubles au détergent neutre (NDF), digestibilité de la MS (DMS) et digestibilité de la NDF (DNDF) de la fléole des prés produite à trois sites et récoltée à deux stades de développement au printemps et à l'été.

| Sites | Récolte | Stades de développement | Rendements en MS | NDF | DMS | DNDF |
|-----------------------------|-----------|-------------------------|------------------|---------|---------|----------|
| | | | t/ha | g/kg MS | g/kg MS | g/kg NDF |
| Normandin | Printemps | Fin épiaison (FÉ) | 3,76a | 600a | 849a | 748a |
| | | Sept jours après FÉ | 3,69a | 638b | 796b | 680b |
| | Été | Fin épiaison | 2,59a | 574a | 838a | 718a |
| | | Sept jours après FÉ | 1,95b | 592b | 810b | 680b |
| Sainte-Anne-de-Bellevue | Printemps | Fin épiaison | 3,70a | 604a | 851a | 755a |
| | | Sept jours après FÉ | 4,16b | 643b | 793b | 678b |
| | Été | Fin épiaison | 1,45a | 509a | 877a | 761a |
| | | Sept jours après FÉ | 1,00b | 507a | 877a | 757a |
| Saint-Augustin-de-Desmaures | Printemps | Fin épiaison | 4,22a | 651a | 778a | 661a |
| | | Sept jours après FÉ | 5,34b | 674b | 719b | 586b |
| | Été | Fin épiaison | 3,34a | 577a | 805a | 664a |
| | | Sept jours après FÉ | 3,73b | 583a | 802a | 663a |

a-b À l'intérieur d'un site et d'une récolte, les moyennes dans une colonne pour les deux stades de développement suivies d'une même lettre ne sont pas différentes.

Tableau 2. Différence alimentaire cations-anions (DACA), indice de tétanie d'herbage (TH) et concentrations en K, Na, Ca, Mg et Cl de la fléole des prés produite à trois sites et récoltée à deux stades de développement au printemps et à l'été.

| Sites | Récoltes | Stades de développement | DACA | Indice de TH | K | Na | Ca | Mg | Cl |
|-----------------------------|-----------|-------------------------|------------|--------------|---------|--------|-------|-------|--------|
| | | | mmol/kg MS | | g/kg MS | | | | |
| Normandin | Printemps | Fin épiaison (FÉ) | 386a | 2,3a | 31,0a | 0,029a | 4,49a | 1,51a | 11,95a |
| | | Sept jours après FÉ | 298b | 2,2a | 27,2b | 0,035b | 4,19b | 1,35a | 11,83a |
| | Été | Fin épiaison | 265a | 1,9a | 25,7a | 0,017a | 4,68a | 1,49a | 11,39a |
| | | Sept jours après FÉ | 239b | 1,9a | 24,6b | 0,029a | 4,50b | 1,37a | 11,41a |
| Sainte-Anne-de-Bellevue | Printemps | Fin épiaison | 360a | 3,1a | 28,9a | 0,012a | 2,96a | 1,17a | 10,83a |
| | | Sept jours après FÉ | 318b | 2,7b | 26,8b | 0,016a | 3,34b | 1,16a | 10,59a |
| | Été | Fin épiaison | 266a | 1,5a | 22,7a | 0,029a | 5,16a | 1,70a | 8,53a |
| | | Sept jours après FÉ | 241b | 1,4a | 21,6b | 0,021a | 5,10a | 1,72a | 8,12a |
| Saint-Augustin-de-Desmaures | Printemps | Fin épiaison | 294a | 1,6a | 24,6a | 0,037a | 6,23a | 1,20a | 9,14a |
| | | Sept jours après FÉ | 246b | 1,5a | 21,6b | 0,016a | 5,79b | 1,06a | 8,39b |
| | Été | Fin épiaison | 224a | 1,1a | 22,6a | 0,083a | 8,31a | 1,44a | 9,57a |
| | | Sept jours après FÉ | 248b | 1,2a | 22,1a | 0,052a | 7,37a | 1,28a | 8,36b |

a-b À l'intérieur d'un site et d'une récolte, les moyennes dans une colonne pour les deux stades de développement suivies d'une même lettre ne sont pas différentes.

Un foin de fléole à faible DACA améliore l'homéostasie du calcium chez la vache en période de transition

Gaëtan Tremblay¹, Greg Penner², Tracy Dow³ et Masahito Oba²

¹Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec, (tremblaygf@agr.gc.ca)

²University of Alberta, Edmonton, et

³Alberta Agriculture and Food, Lethbridge.

Lors de la formulation de rations pour la vache en période de transition, soit au cours des trois semaines qui précèdent le vêlage, on utilise régulièrement des sels anioniques afin de réduire la différence alimentaire cations-anions [$\text{DACA} = (\text{Na}^+ + \text{K}^+) - (\text{Cl}^- + \text{S}^{2-})$] et ainsi prévenir l'apparition de l'hypocalcémie. La faible DACA de la ration améliore l'homéostasie du calcium (**Ca**) chez la vache en période de transition mais la présence d'une quantité importante de sels anioniques cause généralement une baisse de la prise alimentaire chez l'animal.

Nous avons montré précédemment que la fléole des prés (*Phleum pratense* L.) a une DACA plus faible que les autres graminées fourragères cultivées dans l'Est du Canada (Tremblay et al., 2006) et que lorsqu'elle est cultivée sur un sol faible en potassium et fertilisée avec du chlorure de calcium (**CaCl₂**), elle peut avoir une DACA aussi faible que 0 mmol/kg MS, ce qui est plus qu'acceptable pour les vaches en période de transition (Pelletier et al., 2007). De plus, en simulant une hypocalcémie chez un nombre restreint de vaches tarées non gestantes, nous avons montré qu'un foin de fléole des prés à faible DACA était aussi efficace que l'acide chlorhydrique (HCl) pour réduire la DACA de la ration, abaisser le pH urinaire, modifier le métabolisme du Ca et améliorer la capacité de réponse de l'animal à une demande en Ca (Charbonneau et al., 2008). La présente étude (Oba et al., 2007; Penner et al., 2008) a été entreprise afin d'évaluer les effets de la valeur de DACA d'un foin de fléole des prés sur la capacité de la vache tarée et gestante à maintenir un niveau de Ca sanguin adéquat au cours de la période du vêlage, et ce, avec un nombre élevé d'animaux et sous des conditions régulières de production. Nous avons posé l'hypothèse que le fait de servir un foin de fléole des prés à faible DACA pendant la période de transition cause une légère acidose métabolique qui rend les sites d'action plus sensibles à l'hormone qui contrôle le métabolisme du Ca (la PTH) et améliore ainsi l'homéostasie du Ca, et ce, sans affecter la prise alimentaire de l'animal.

Les foins de fléole des prés ont été produits sur un champ irrigué à Lethbridge en Alberta. Le foin à faible DACA a été produit en fertilisant 4 ha avec 224 kg CaCl₂/ha (143 kg Cl/ha), alors que celui à DACA élevée a été récolté sur une partie du même champ non fertilisé en chlore (**Cl**). La fléole a été récoltée le 8 juillet 2006 à un stade de développement relativement avancé (7,4 % PB, 42,6% ADF), et ce, parce qu'elle a été produite dans les conditions généralement utilisées pour fabriquer du foin destiné à l'exportation en Asie. La concentration en Cl du fourrage était de 1,07 et 0,15% de la matière sèche (**MS**), et la DACA était de 12 et 216 mmol/kg MS pour le foin à DACA faible et élevée, respectivement. Ceci confirme nos résultats antérieurs montrant que la fertilisation en Cl est efficace pour réduire la DACA de la fléole des prés (Pelletier et al., 2007). Les deux rations expérimentales contenaient 63% de foin (base MS); la ration à base de foin fertilisé en Cl avait une DACA de 16 mmol/kg MS, alors que celle à base

de foin non fertilisé en Cl avait une DACA de 145 mmol/kg MS. Quarante et une vaches Holstein gestantes et tarées, de deuxième parité ou plus, et du troupeau de l'Université de l'Alberta (Edmonton), ont été appariées sur la base de leur parité et assignées aléatoirement à une des deux rations dans un dispositif expérimental en blocs complets. Les rations ont été servies à volonté au cours des 30 jours qui précédaient la date prévue du vêlage.

Au début de l'étude, le pH urinaire était en moyenne de $8,22 \pm 0,06$ et la concentration en bicarbonate du sang était en moyenne de $28,5 \pm 0,3$ mM. La ration à base de fléole à faible DACA, comparée à celle à base de fléole à DACA élevée, a causé une diminution du pH urinaire au jour 21 (7,75 vs. 8,31), au jour 14 (7,69 vs. 8,22), et au jour 7 (7,50 vs. 8,19) avant le vêlage, et elle a aussi causé une baisse de 2 mM du bicarbonate du sang; ces baisses sont des indices d'une légère acidose métabolique. De plus, les vaches qui recevaient la ration à base de fléole à faible DACA avaient une concentration sanguine en Ca ionisé significativement plus élevée avant le vêlage (1,22 vs. 1,19 mM), de même qu'à 0 (1,10 vs. 1,02 mM) et 8 (1,10 vs. 1,04 mM) heures après le vêlage, et elles avaient une prise alimentaire similaire (11,0 vs. 10,2 kg MS/jour) à celles nourries avec la ration à base de fléole à DACA élevée.

Dans la présente étude, nous avons réduit la DACA d'un foin de fléole des prés en fertilisant la plante avec du CaCl_2 . Nos résultats indiquent que le fait de servir un foin de fléole des prés à faible DACA, comparé à un foin de fléole à DACA élevée, affecte l'équilibre acide-base de la vache en période de transition et améliore l'homéostasie du Ca après le vêlage, et ce, sans effet négatif sur la prise alimentaire. Un foin de fléole des prés ayant une faible DACA, qui dans le cas présent était de 12 mmol/kg MS, peut donc avantageusement remplacer les sels anioniques dans la ration des vaches en période de transition.

Liste des ouvrages cités

- Charbonneau, E., P. Y. Chouinard, G. F. Tremblay, G. Allard et D. Pellerin. 2008. Hay to Reduce Dietary Cation-Anion Difference of Dry Dairy Cows. *Journal of Dairy Science*, 91: Sous presse.
- Oba, M., G. B. Penner, G. F. Tremblay et T. Dow. 2007. Timothy hay differing in DCAD value affected Ca homeostasis in periparturient dairy cows. Communication scientifique présentée au congrès annuel conjoint de l'American Dairy Science Association (ADSA), de la Poultry Science Association (PSA), de l'Asociacion Mexicana de Produccion Animal (AMPA) et de l'American Society of Animal Science (ASAS), San Antonio, TX, 8-12 juillet. *J. Anim. Sci.* 85, Suppl. 1 / *J. Dairy Sci.* 90, Suppl. 1, p. 406.
- Penner, G. B., G. F. Tremblay, T. Dow et M. Oba. 2008. Timothy hay with a low dietary cation-anion difference improves calcium homeostasis in periparturient Holstein cows. *Journal of Dairy Science*, 91: Sous presse.
- Pelletier, S., G. Bélanger, G. F. Tremblay, P. Seguin, R. Drapeau et G. Allard. 2007. Dietary cation-anion difference of timothy (*Phleum pratense* L.) as influenced by chloride and nitrogen fertilizer. *Grass and Forage Science*, 62: 66-77.
- Tremblay, G. F., H. Brassard, G. Bélanger, P. Seguin, R. Drapeau, A. Bréard, R. Michaud et G. Allard. 2006. Dietary cation anion difference (DCAD) of five cool-season grasses. *Agronomy Journal*, 98: 339-348.

Valeur nutritive et rendement de vieilles prairies de fléole des prés

Gilles Bélanger, Gaëtan Tremblay et Danielle Mongrain.

Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560, boul. Hochelaga, QC, G1V 2J3 (courriel : belangergf@agr.gc.ca)

La baisse de productivité au cours du vieillissement des graminées fourragères est bien documentée mais cette baisse de rendement et ses conséquences sur la valeur nutritive du fourrage n'ont pas été étudiées chez la fléole des prés (*Phleum pratense* L.). Notre objectif était donc de caractériser le rendement en matière sèche (MS) et la valeur nutritive de la croissance printanière au cours du vieillissement de la fléole des prés cultivée sous des conditions non limitantes en N.

MÉTHODOLOGIE De la fléole des prés (cv. Champ), semée en 1998, a été récoltée à quatre stades de développement (montaison, début épiaison, fin épiaison et début floraison) au cours des croissances printanières de 1999 à 2005. Les conditions non limitantes en N ont été obtenues en appliquant 120 kg N/ha au début du mois de mai de chaque année. Les rendements en MS ont été mesurés. Nous avons déterminé la digestibilité *in vitro* de la MS, la concentration en fibres au détergent neutre (NDF) et la digestibilité *in vitro* du NDF du fourrage récolté.

RÉSULTATS Le rendement en MS a diminué avec l'âge de la prairie (Figure 1). Le rendement observé à la 5^{ième}, 6^{ième} et 7^{ième} année de production (2003-2005) correspondait à 43% de celui mesuré pendant les quatre premières années de production (1999-2002) lorsque la fléole était récoltée à la montaison ou au début épiaison, à 52% lorsque récoltée à la fin épiaison, et à 74% lorsque récoltée au début de la floraison (Figure 1). Le rendement potentiel de la fléole des prés au cours de la croissance printanière diminuait avec le vieillissement à un taux de 0,66 et 0,91 t MS/ha/an lorsqu'elle était récoltée aux stades début et fin épiaison, respectivement.

La valeur nutritive de la fléole récoltée à la montaison était plus élevée dans les vieilles (années de production 5, 6 et 7) que les jeunes (quatre premières années de production) prairies tel qu'indiqué par une plus grande digestibilité *in vitro* de la MS (+ 48 g kg⁻¹ MS) et digestibilité *in vitro* du NDF (+ 77 g kg⁻¹ NDF), ainsi qu'une plus faible concentration en NDF (- 62 g kg⁻¹ MS); cette amélioration de la valeur nutritive de la fléole avec l'âge de la prairie, principalement expliquée par la baisse de rendement, disparaissait lorsque la fléole était récoltée plus tard au cours de la croissance printanière (Figure 1). Les taux de changement de la valeur nutritive observés au cours du développement de la croissance printanière de la fléole étaient donc plus rapides dans les vieilles que les jeunes prairies (Tableau 1).

CONCLUSIONS Sous des conditions non limitantes en N, le potentiel de rendement de la croissance printanière de fléole des prés diminue avec l'âge de la prairie alors que la valeur nutritive du fourrage augmente; la baisse de la valeur nutritive en fonction du stade de développement de la plante est par contre plus rapide dans les vieilles que dans les jeunes prairies.

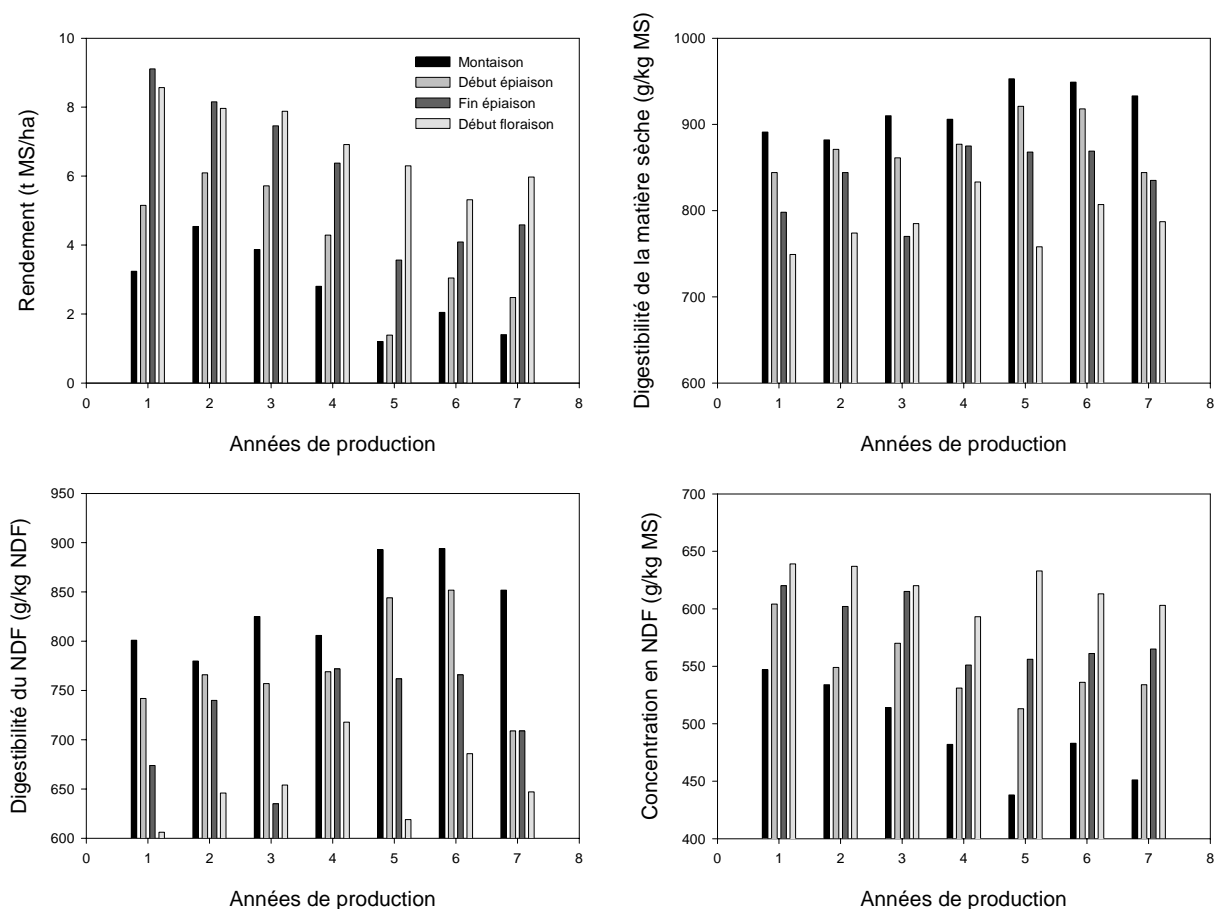


Figure 1. Rendement, digestibilité de la matière sèche, digestibilité des fibres au détergent neutre (NDF) et concentration en NDF de la fléole des prés récoltée à quatre stades de développement au cours de repousse de printemps de sept années de production.

Tableau 1. Taux de diminution de la digestibilité de la matière sèche (MS) et la digestibilité des fibres au détergent neutre (NDF), et taux d'augmentation de la concentration en NDF de la fléole des prés pour chaque degré-jour (°C-d) accumulé au cours de la repousse de printemps des quatre premières et des trois dernières années de production.

| | Années de production | |
|---|----------------------|--------|
| | 1 à 4 | 5 à 7 |
| Digestibilité de la MS [g/kg MS/(°C-d)] | - 0,33 | - 0,44 |
| Digestibilité du NDF [g/kg NDF/(°C-d)] | - 0,43 | - 0,63 |
| Concentration en NDF [g/kg MS/(°C-d)] | + 0,30 | + 0,42 |

Fertilisation azotée de prairies avec des lisiers porcins déphosphatés au Mg

Gaétan Parent¹, Gilles Bélanger¹, Noura Ziadi¹, Roger Lalande¹, Jean-Pierre Deland² et Jean Laperrière²

¹ Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2560 Boulevard Hochelaga, Québec (Qué), G1V 2J3.
parentg@agr.gc.ca

² Norsk Hydro Canada Inc. 7000, boulevard Raoul-Duchesnes, Bécancour (Qué). G0X 1B0

Introduction

L'augmentation marquée des quantités de P dans les sols agricoles, causée notamment par l'intensification de la production porcine, constitue une problématique environnementale majeure, particulièrement en zone de production intensive. Une solution potentielle à cette problématique consiste à l'ajout au lisier de magnésium soluble (sous-produit d'électrolyse et de fonderie ou SPEF, 20% Mg) permettant la formation d'une phase liquide réduite en P (de 70 à 90% de réduction en P) et d'une phase solide enrichie en P (Parent et Simard, 2003; Parent et coll., 2007). L'objectif de notre étude était de déterminer les impacts agronomiques et environnementaux de la valorisation de la phase liquide de ce lisier traité en production fourragère sur des sols riches en P (ratio $P/Al_{(M3)} > 10$).

Méthodologie

Différents sites localisés dans la région de Chaudière-Appalaches ont été utilisés en 2004 (Saint-Anselme et Saints-Anges), 2005 (Saint-Patrice-de-Beaurivage) et 2006 (Laurier-Station). La composition botanique des prairies utilisées était à prédominance de graminées fourragères. Un lisier brut homogénéisé ainsi que la phase liquide du lisier traité au SPEF ont été évalués à des apports annuels visés de 0, 80, 160 et 240 kg N total/ha. Un fertilisant minéral (27-0-0) a également été apporté comme traitement de référence à des doses annuelles de 0, 30, 60, 120 et 240 kg N total/ha. L'étude incluait deux types de lisier traité au SPEF soit un lisier traité avec 0,5 g Mg/L lisier et un autre avec 1,0 g Mg/L lisier. Les cultures de plantes fourragères ont été exploitées selon un régime de deux coupes. Une proportion de 60% des différents apports de lisier et de fertilisants minéraux a été appliquée au printemps et le reste après la première coupe (CRAAQ, 2003). Les rendements en matière sèche (MS) à chaque coupe et la teneur en azote minéral résiduel du sol après la deuxième coupe ont été mesurés à chacun des sites. Des coefficients de disponibilité du N de chacun des lisiers ont été calculés et comparés aux valeurs proposées par le CRAAQ (2003).

Résultats

En moyenne pour les quatre site-années, l'accroissement des rendements obtenus avec l'augmentation de la dose de N apportée était comparable pour les lisiers déphosphatés au Mg et le fertilisant minéral; les rendements obtenus avec le lisier brut était inférieurs à ceux obtenus avec le fertilisant minéral pour des apports de N inférieurs à 236 kg/ha. Les coefficients de disponibilité du N obtenus pour chacun des lisiers ont été de 0,69 (brut), 1,18 (déphosphaté à une dose de 0,5 g Mg/L lisier) et 1,29 (déphosphaté à une dose de 1,0 g Mg/L lisier). Ces valeurs sont

supérieures de 50% (brut), 157% (déphosphaté avec 0,5 g Mg/L lisier) et 180% (déphosphaté avec 1,0 g Mg/L lisier) à la valeur de 0,46 proposée par le CRAAQ (2003). Les différents lisiers et le fertilisant minéral azoté n'ont pas influencé les teneurs en N minéral résiduel du sol mesuré après la deuxième et dernière coupe; ces teneurs (couche 0-60 cm) ont toujours été inférieures à 70 kg N/ha.

Conclusions

Ces résultats indiquent que les lisiers déphosphatés au Mg s'avèrent une source fertilisante intéressante puisque leurs coefficients de disponibilité du N étaient supérieurs à ceux des fertilisants minéraux. Ces lisiers pourraient donc se substituer aux fertilisants minéraux de synthèses. Les coefficients de disponibilité de l'azote couramment utilisés (CRAAQ, 2003) devront toutefois être révisés autant pour les lisiers déphosphatés au Mg que pour le lisier brut. Finalement, l'expérimentation a démontré que l'utilisation de grandes quantités de N sous forme de lisier ou de fertilisant minéral azoté n'entraîne pas nécessairement d'accumulation excessive dans le sol de N minéral résiduel pouvant être perdu par lessivage.

Liste des ouvrages cités

- CRAAQ, 2003. Guide de référence en fertilisation. 1^{ère} édition. Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec. 294 pp.
- Parent, G., et R.R. Simard. 2003. Process for the treatment of pig and swine manure and use of manure so treated. Brevet en attente. Docket No.: 14654-3PCT.
- Parent, G., G. Bélanger, N. Ziadi, J.-P. Deland et J. Laperrière. 2007. Precipitation of liquid swine manure phosphates using magnesium smelting by-products. *Journal of Environmental Quality* 36:557-567.

UTILISATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE POUR LE SÉCHAGE DE FOIN EN PETITES BALLEES

PHASE I : Conception et évaluation du système

JOCELYN MARCEAU, ing^a et ANDRÉ AMYOT agr.^b

^aMAPAQ, 1685 boul. Wilfrid-Hamel Ouest, RC-22, Québec (Qc) G1N 3Y7

jocelyn.marceau@mapaq.gouv.qc.ca

^b Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, 120A Chemin du Roy, Deschambault (Québec) G0A 1S0, andre.amyot@irda.qc.ca ;

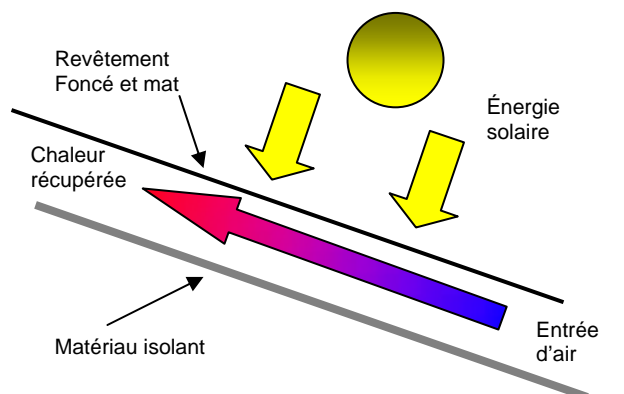
Le captage de l'énergie solaire au niveau d'une toiture de bâtiment permet d'élever la température de l'air et d'améliorer son pouvoir séchant dans le but de faciliter le séchage du foin. En s'inspirant de différents ouvrages similaires réalisés en France¹, ce document traite de l'adaptation de cette technologie afin de sécher du foin en petites balles carrées dans une entreprise agricole de la région de Québec.

Énergie solaire

La constante solaire est de 1366 W/m^2 . Sur une base annuelle, compte tenu de l'effet jour et nuit et de l'absorption dans l'atmosphère, sans nuage, la terre reçoit au sol en moyenne 342 W/m^2 et sous nébulosité normale, cette moyenne passe à 240 W/m^2 . À Québec, entre 9 h 00 et 17 h 00, la radiation est fréquemment supérieure à 500 W/m^2 et peut même atteindre 1000 W/m^2 autour de 12 h 00, ce qui constitue un potentiel très intéressant.

Principe de captage de l'énergie solaire

Il existe différentes méthodes qui permettent de capter plus ou moins efficacement l'énergie solaire. Les serres de production agricole en sont un bel exemple. La radiation traverse la pellicule et demeure en partie captive à l'intérieur de celle-ci. Il existe aussi des capteurs à simple effet tel qu'utilisé dans le cadre de ce projet. La radiation est stoppée au niveau du toit, mais une quantité appréciable d'énergie est transférée par conduction de l'extérieur vers l'intérieur et, règle générale, cette énergie est considérée comme nuisible puisqu'elle contribue à chauffer inutilement le bâtiment en période estivale. Il s'agit donc de récupérer cette chaleur.



Principe de captage de l'énergie solaire à partir d'une toiture

¹,2000. Le séchage solaire des fourrages : La Qualité au service du développement et de l'environnement. Programme régional de lutte contre l'effet de serre et de développement durable.

Ventilation sous le revêtement

Le système de ventilation est aménagé de façon à récupérer le plus possible la chaleur reçue au niveau de la toiture. Il faut viser une vitesse d'air sous le revêtement qui maximise le taux de transfert de chaleur en évitant le plus possible de diminuer la performance de ventilation. La vitesse d'air sous le revêtement se situe habituellement entre 3 et 6 m/s. Règle générale, le ventilateur extrait l'air au niveau de la toiture à une pression négative qui peut atteindre 0,7 à 1 mbar. Cette perte de pression en amont diminue d'autant la performance en aval, mais cela s'avère nécessaire pour récupérer le maximum de chaleur par une vitesse d'air accrue à la proximité du revêtement.

Revêtement

Pour une bonne efficacité, la toiture doit favoriser l'absorption d'énergie et éviter le plus possible la réflexion de la radiation. Ainsi, un revêtement foncé et mat favorise plus d'absorption que les couleurs pâles et lustrées. En Europe, on utilise avantageusement les revêtements de fibrociment et les tôles métalliques comme celles couramment utilisées au Québec. Le revêtement doit permettre une conductivité thermique afin de transférer la chaleur du côté intérieur. Le bâtiment transformé pour ce projet disposait de tôle d'acier « Galvalume » de 10 ans de couleur aluminium dont la performance de captage s'approchait d'une tôle neuve noire et de fini mat².

Gain potentiel de chaleur

En France plusieurs granges équipées pour le captage de l'énergie solaire montrent des gains allant jusqu'à 10°C par rapport à la température ambiante. Ces gains dépendent principalement du niveau de radiation solaire. Selon les matériaux utilisés, la vitesse de l'air dans le capteur et le type de capteur, le rendement moyen peut varier de 25 à 35 %. En d'autres termes, pour un niveau de radiation de 800 watts/m², les gains peuvent varier de 200 à 280 watts/m². Ce gain améliore le pouvoir séchant de l'air par l'élévation de sa température alors que son contenu de vapeur d'eau demeure constant. Le pouvoir séchant (PS) correspond à la quantité d'eau que l'air peut capter avant d'atteindre son point de saturation. Il peut aussi s'exprimer comme la différence de pression de vapeur actuelle et celle à saturation:

$$PS = P_{vap_{sat}} - P_{vap}$$

Par exemple, au lieu de propulser l'air ambiant à 21°C et 60 % HR qui a un pouvoir séchant de 7,4 g/m³ (18,4_{sat} - 11,0_{60%}), si on chauffe cet air à 27°C, l'humidité relative diminue à 43 % et le pouvoir séchant de l'air passe à 14,8 g/m³ (25,8_{sat} - 11,0). La capacité de séchage se trouve donc augmentée de 100 %.

² Marceau J. 2007. Utilisation de l'Énergie solaire pour le séchage du foin en petites balles : Partie I : Conception et évaluation du système. MAPAQ, Rapport de projet. Développement et valorisation- Volet 5 Appui à l'adaptation et au développement régional.

Tableau 1 : Capacité de capturer de l'eau jusqu'au point de saturation pour 850 m³/min et un capteur de 458 m² en considérant l'air ambiant à 21°C et HR 60 % - PS= 7,4 g/m³

| Gain thermique _(efficacité, radiation) | HR _{après} | PS _{avant} | PS _{après} | Amélioration |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|
| DT _{35 % eff, 1000w/m²} = 11 °C | 25 % | 7,4 | 22,9 | 210 % |
| DT _{25 % eff, 1000w/m²} = 8 °C | 39 % | 7,4 | 17,8 | 141 % |
| DT_{25 % eff, 800 w/m²} = 6 °C | 43 % | 7,4 | 14,8 | 100 % * |
| DT _{25 % eff, 250w/m²} = 2 °C | 54 % | 7,4 | 9,6 | 30 % |
| DT _{25 % eff, 0w/m²} = 0 °C | 60 % | 7,4 | 7,4 | 0 % |

* Ce projet vise à obtenir une efficacité minimale de 25 %. À 800 w/m², le gain thermique théorique serait de 6°C.

Réalisation du projet

Le projet a été réalisé à la Ferme Richard Matte de Neuville. Un bâtiment existant de 26 x 15 m et une annexe de 13,5 X 3,65 m qui servaient comme structure d'entreposage du fumier et de purot ont été transformés en séchoir solaire pour le foin. La surface de toiture projetée horizontalement correspondait à 458 m². L'adaptation réalisée consiste à récupérer la chaleur captée au niveau des deux sections de toiture avant de forcer l'air à travers le foin récolté. La conception et l'évaluation du système ont été réalisées en 2 étapes :

- I- Montage du système
- II- Évaluation de la performance de captage

I- Montage du système

Le projet consiste principalement à aménager un système de captage de chaleur en amont des ventilateurs. Le système de séchage en aval conserve les mêmes descriptions techniques que celles utilisées dans les fermes du Québec³. Comme point de référence le débit utilisé est de 425 m³/min à 2,5 mbar par 100 tonnes de foin en pression positive. La capacité du séchoir était de 200 tonnes de foin.

En aval des ventilateurs

Le système de séchage de l'entreprise a été adapté en fonction du système de manutention « Cardinal » (i.e. grappin de 18 balles monté sur le chargeur avant d'un tracteur). Une particularité du système utilisé chez le promoteur concerne l'usage de palettes ajourées de 200 mm de hauteur assurant une distribution uniforme sous la masse de foin à sécher. La palette la plus éloignée du plénum est pavée sur les derniers 600 mm de façon à éviter une perte d'air trop importante au bout de la rangée. Le plénum et le mur d'appui au fond sont inclinés respectivement de 40 et 80 mm par mètre de hauteur de façon à favoriser un léger chevauchement des rangées de balles afin d'éviter les fuites importantes d'air. L'empilement est de 8 rangées de balles placées sur le côté.

³ Fortier M. Bolduc J. 1984. Le séchage du foin à air propulsé. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

En amont des ventilateurs – captage de l'énergie solaire

Souvent, en France, le système de captage consiste en l'aménagement de corridors d'air d'environ 200 mm de hauteur sous la tôle de la toiture afin de garder une bonne vélocité de l'air et ainsi récupérer le maximum d'énergie. Vu la configuration de la toiture du purot qui était constituée de solive de 200 mm, ce type de corridor a pu être aménagé sur 10 % de la totalité de la surface du bâtiment. Pour le bâtiment principal, qui est muni de fermes triangulées, nous avons opté pour aménager tout l'intérieur de l'entretoit. La particularité de cet aménagement est la construction de chicanes à partir des membrures existantes de façon à provoquer de la turbulence de l'air sous la tôle et ainsi favoriser un bon transfert de chaleur.

Cet aménagement a été réalisé de façon à ce que la vitesse de l'air n'excède pas 4 m/s vis-à-vis les chicanes pour éviter une contrainte trop importante au niveau de la soufflerie et conserver une pression négative inférieure à 0,6 mbar. Cet aménagement était beaucoup plus simple de montage, mais comportait un risque quant à la performance de captage.

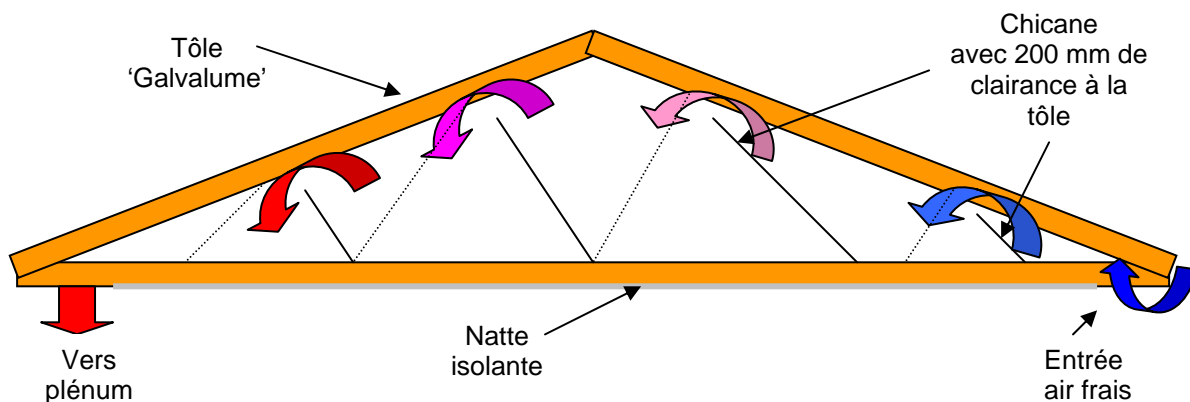


Figure 1 Schéma de fonctionnement du capteur utilisé. Tout l'entretoit est utilisé et, pour accroître le transfert de chaleur, 4 chicanes de 200 mm d'ouverture ont été aménagées à partir des membrures existantes.

À l'aide de souffleries, l'air préchauffé est aspiré via un plénum négatif puis propulsé dans le plénum positif qui assure la distribution sous les palettes.

Avant de faire les essais de performance, il a été nécessaire de balancer l'écoulement de l'air en amont et balancer le débit provenant des deux toitures. La partie du purot correspond à 10 % de toute la superficie de toiture, le débit d'air aspiré dans cette section a été calibré de façon à correspondre à 10 % de la ventilation totale. Pour ce faire, nous avons aménagé un système de guillotine (panneaux ajustables) entre chaque solive. L'ouverture moyenne de cette guillotine était de 50 mm sur toute la longueur du purot.

II- Évaluation de la performance de captage

L'évaluation de la performance de séchage a été réalisée du 19 septembre au 17 octobre. Les données de radiation solaire, de vent, de pluie, d'humidité et température ont été recueillies en temps réel à différents endroits dans le système.

Efficacité de captage

Les performances ont été évaluées lorsque les 4 ventilateurs étaient en marche, à une pression statique variant de 2 à 3 mbar (0,8 à 1,2 po d'eau) ce qui correspondait à un débit théorique variant entre de 1110 et 997 m³/min (39200 et 35200 pi³/min). La pression et le débit s'établissaient en fonction des ouvertures au niveau des palettes. La ventilation a été arrêtée durant la nuit pendant toute la durée du projet et au cours de deux journées pluvieuses. Lors du fonctionnement de la ventilation, du 18 septembre au 17 octobre, sur 252 heures de fonctionnement, l'énergie totale reçue au niveau de la toiture a été de 34166 Kwh. L'énergie qui a été captée correspond à 13269 kwh. En excluant l'apport de chaleur dû aux moteurs (3548 kwh), le bilan net dépendant exclusivement du captage solaire correspond donc à 9721 kwh.

La figure suivante montre le gain de température captée entre l'entrée d'air et le plénum positif, immédiatement avant d'être poussé à travers la masse de foin. Plus la radiation était forte plus le gain de température était élevé. Ce gain de température inclut aussi le gain dissipé par les ventilateurs. Chaque moteur consommait 16 ampères à 220 volts soit : 4 x 3548 watts ou 14,08 kw d'énergie additionnelle dissipée dans l'air. Le graphique suivant montre le gain énergétique observé en fonction de l'énergie de radiation (i.e. Surface de toit x radiation). Même sans aucune radiation, le gain de base correspond à 13,072 kw, soit près de la valeur de l'énergie électrique consommée par les moteurs.

Dès qu'il y a radiation solaire, le captage est proportionnel à l'énergie reçue. L'efficacité de captage pour toute la période a été de **30,6%**. Cette valeur d'efficacité est très semblable à celle mesurée en France chez quelques fermiers qui utilisent ce principe pour le séchage de foin. Leur efficacité varie de 25 à 35 %. Compte tenu que le projet été réalisé à partir d'une toiture existante et que la ventilation sous la tôle était faite à une faible vitesse d'air (inférieure à 4 m/s), une telle efficacité s'avère un très bon résultat. La pression négative d'extraction de l'air à travers le capteur se situait autour de 0,25 mbar alors qu'en France, les systèmes en place

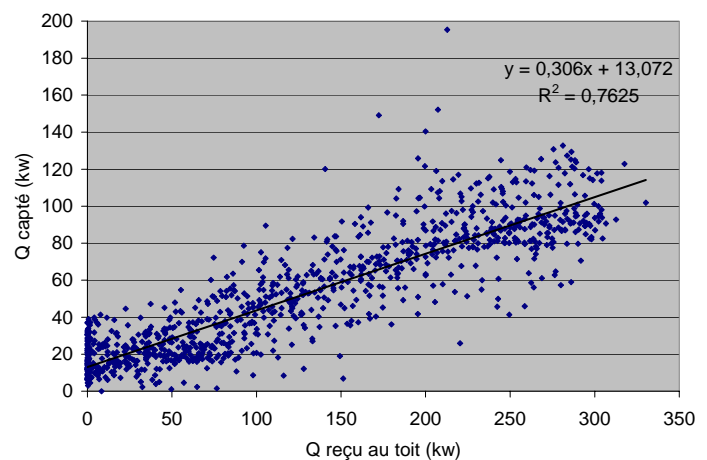


Figure 2 Énergie captée dans l'air pulsé vers le foin en fonction de l'énergie reçue au niveau du toit. Ce graphique contient toutes les données par tranche de 15 minutes entre 8h00 et 20h00 lorsque les 4 ventilateurs étaient en marche (n=1008).

fonctionnent souvent à des pressions négatives de l'ordre de 0,6 mbar.

Gain de température

Le gain moyen de température dans le système pour toute la période de fonctionnement, soit du 18 septembre au 17 octobre 2007, a été de **3,8°C**. Toutefois, pour des radiations de l'ordre de 700 w/m², le gain de température atteignait des valeurs de 7°C. Il est fort possible qu'en juin, juillet ou août, le système puisse obtenir des gains de l'ordre de 10°C puisque la radiation avoisine parfois les 1000 w/m² à cette époque de l'année. Le 3,8°C n'est pas entièrement attribuable à la radiation solaire. Les moteurs dégagent une chaleur constante dans le système. Cette énergie correspond à environ 0,8°C. Le gain net dû à l'énergie solaire correspond donc à 3,0°C.

Influence d'autres facteurs météorologiques

L'effet de l'ensemble des données météorologiques a été analysé une variable à la fois puis en combinaison en utilisant une analyse de régression. Seules les données entre 8 h 00 et 20 h 00 et lorsque les 4 ventilateurs étaient en fonction, ont été considérées. Ce qui ressort de cette analyse touche principalement les variables de la radiation et de la vitesse du vent. La figure 4 montre les observations du gain thermique en fonction de la radiation et du vent. On voit clairement que lorsque la radiation augmente, le gain thermique augmente aussi, mais ce gain est significativement réduit selon l'importance du vent.

Pour 700 w/m² de radiation solaire, le gain thermique sans vent s'approche de 8°C mais si le vent augmente à 25 km/h, le gain est réduit à 5,5°C, soit une réduction de gain de 30 %.

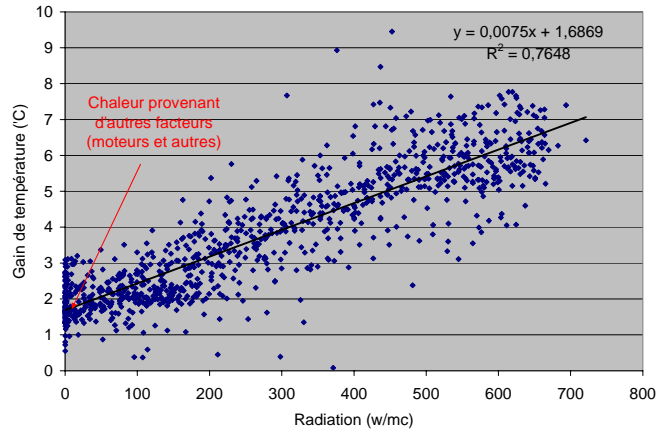


Figure 3 Différence de température observée entre le plénum positif et l'entrée d'air. En absence de soleil, il y avait une élévation de 1,7°C de l'air qui peut être expliquée en partie par la chaleur provoquée par les moteurs, soit 0,8°C. L'autre 0,9°C peut être attribuable à l'inertie thermique (n=1008).

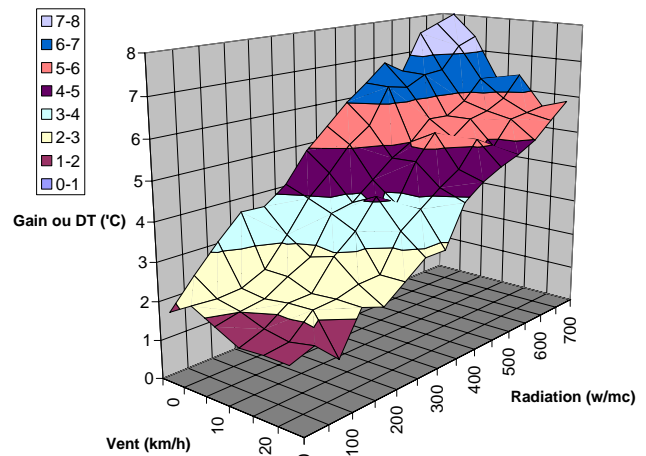


Figure 4 Observations moyennes de gain thermique en fonction de la radiation solaire et du vent

Amélioration du pouvoir séchant

Sans captage solaire le pouvoir séchant aurait été en moyenne de **5,3 g/m³**. Toutefois, le système de captage solaire utilisé a permis d'accroître le pouvoir séchant à **9,2 g/m³**. L'amélioration moyenne a été de **74 %**. Pour un gain de température de 7°C, le pouvoir séchant de l'air double (7,5 à 15,2 g/m³). Si le projet avait été réalisé en juin, juillet ou août, l'amélioration pourrait dépasser 100 %, puisque les radiations sont plus fortes à cette période de l'année, sans considérer le fait que la durée du jour est supérieure.

Conclusion

Le système de récupération de la chaleur qui a été testé s'est avéré aussi performant en termes d'efficacité (30,6 %) que ceux étudiés en France. Le montage de chicanes à travers les fermes triangulées d'une toiture de tôle s'avère un moyen simple pour aménager un capteur à simple effet.

Dans ce projet, la pression d'opération en amont s'est maintenue faible (- 0,25 mbar), ce qui a permis de conserver une bonne pression positive lors de la propulsion de l'air à travers la masse de foin. Le système de chicanes utilisant les membrures actuelles crée une turbulence qui favorise une bonne récupération de la chaleur au niveau de la tôle. Il est possible que l'aménagement d'autres chicanes intercalaires puisse encore améliorer le rendement de captage, mais cela n'a pas été vérifié dans ce projet.

Au cours de la période d'essais, les gains énergétiques du système se sont traduits par des augmentations de température de l'air allant jusqu'à 7°C et le pouvoir séchant de l'air a été amélioré de 74 %. L'analyse des facteurs météorologiques montre que le gain dépend principalement de l'intensité solaire, mais le vent peut réduire considérablement l'efficacité de captage. Un bâtiment protégé des vents serait avantageux.

Ce projet a été réalisé en période automnale, alors que la radiation solaire moyenne est environ 50 % de celle obtenue au cours des mois d'été. On peut donc prédire que sous des conditions estivales, les gains de température et le pouvoir séchant de l'air pourraient être supérieurs aux valeurs observées.

Autres références :

- Baumgartner J. La ventilation du foin de A à Z, Rapports FAT. Station fédérale de recherches d'économie d'entreprises et de génie rural (FAT). Août 1992.
- CRAAQ, Énergie, Coûts des sources d'énergie. Juillet 2007.
- Keller J., Kyburz V. 1988. Bases pour la planification de capteurs d'air pour le séchage du foin. Station fédérale de recherches d'économie d'entreprise et de génie rural (FAT).
- Morissette R. Résumé technique des visites d'exploitations agricoles avec séchoir solaire en Bretagne. Université Laval. 23 février 2006.

Remerciements

Ce projet a été réalisé grâce à l'excellente collaboration de M. Richard Matte, producteur agricole de Neuville, qui su contribuer par ses qualités de menuisier, son apport d'idées fort

pratiques et par ses multiples observations. M. Michel Atkins, technologiste à l'IRDA⁴, a contribué par son expertise à la méthodologie. M. Émile Houle, du CRSAD⁵, et Jacques Labonté de l'IRDA ont prêté leur collaboration par le prêt et l'ajustement d'équipements électroniques. Finalement, M. Yvan Montambault, technologiste au Centre de services agricoles de Deschambault, a participé tout au long du projet.

⁴ IRDA : Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement

⁵ CRSAD : Centre de Recherche en Sciences Animales de Deschambault

Utilisation de l'énergie solaire pour le séchage du foin en petites balles : évaluation du séchage dans deux types de grange

André Amyot¹ et Jocelyn Marceau²

¹Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, 120A Chemin du Roy, Deschambault (Québec) G0A 1S0, andre.amyot@irda.qc.ca ;

²Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, 1685 Wilfrid-Hamel ouest, RC.22, Québec (Québec) G1N 3Y7.

Introduction

Au Québec, le séchage en grange du foin en petites balles est généralement réalisé en le ventilant avec l'air ambiant de façon continue pendant environ 1 mois. Une telle façon de procéder est jugée efficace pour sécher du foin récolté à une teneur en matière sèche d'environ 75% et pressé à une densité relativement faible (125 kg MS/m³). Cependant, lorsqu'on confectionne des balles relativement denses (160 kg MS/m³), cette méthode permet difficilement de conserver du foin dont la teneur en matière sèche est inférieure à 78-80%.

Le captage d'énergie solaire et sa récupération pour le séchage du foin est une pratique fréquente en Europe. Elle permet d'augmenter l'efficacité du système de séchage du foin haché en vrac (Morissette et Savoie, 2007). Par contre, cette pratique est peu courante au Québec et on ne sait pas jusqu'à quel point elle pourrait être intéressante pour les producteurs de foin de commerce qui confectionnent des balles relativement denses.

Afin d'apporter des éléments de réponse à cette question, on a évalué le séchage du foin dans une grange aménagée de façon à utiliser l'énergie solaire captée au niveau de sa toiture métallique pour réchauffer l'air de séchage et dans une grange aménagée pour sécher le foin en le ventilant avec l'air ambiant. Cet essai a été réalisé dans le but de vérifier l'hypothèse suivante : dans le foin récolté relativement humide (75% de matière sèche) et pressé en petites balles relativement denses (160 kg MS/m³), le séchage en grange est plus rapide et plus poussé, et la qualité du produit final est meilleure, lorsqu'on utilise l'énergie solaire captée par la toiture de la grange pour réchauffer l'air de séchage plutôt que d'avoir recours à la ventilation à l'air ambiant pour sécher le foin.

Méthodologie

Une 2^{ième} pousse de graminées de la ferme de M. Richard Matte (Neuville, Québec), a été récoltée à la mi-septembre à une teneur en matière sèche d'environ 75% en petites balles relativement denses (160 kg MS/m³). Les quelques 300 balles confectionnées ont été utilisées pour évaluer le séchage du foin dans deux granges équipées d'un système de séchage différent. L'une avait une structure de bois et était pourvue d'une toiture à fermes triangulées recouverte de tôle. Elle avait été aménagée de façon à capter l'énergie solaire pour réchauffer l'air de séchage du foin (Marceau, 2007). L'autre avait une structure métallique en forme de dôme et une couverture de toile de PVC. Elle avait été aménagée pour sécher le foin en le ventilant avec l'air ambiant. Dans chaque grange, le système de séchage était constitué de ventilateurs centrifuges actionnés par des moteurs de 5 HP, d'un conduit principal de 1,2 m x 1,2 m et d'un plancher latté de 20 cm de hauteur. La dernière section était entièrement pavée sur les 60 derniers cm.

Dans chaque grange, 144 balles (8 rangées de haut x 18 balles par rangée) ont été placées sur un plancher latté ventilé (bloc expérimental) et 6 balles sur un plancher latté non ventilé (bloc témoin). Les blocs expérimentaux ont été confectionnés à la fin du remplissage de la grange, sur la partie du plancher latté la plus éloignée du conduit principal. Dans chacun des blocs expérimentaux, seulement les balles des rangées 1, 4 et 7 (au-dessus du plancher latté) ont fait l'objet d'un suivi. Des tuyaux d'environ 0,5 cm de diamètre interne ont été insérés dans le conduit principal et sous les rangs 1, 4 et 7 de chaque bloc expérimental, et la pression statique a été mesurée à plusieurs reprises pendant le séchage à chacun de ces niveaux, à l'aide d'un manomètre mobile. Des fils thermocouples ont aussi été insérés dans 4 balles des rangs 1, 4 et 7 de chacun des blocs expérimentaux et dans 4 balles de chacun des blocs témoins, et leur température a été enregistrée en continu pendant toute la durée du test (figure 1).

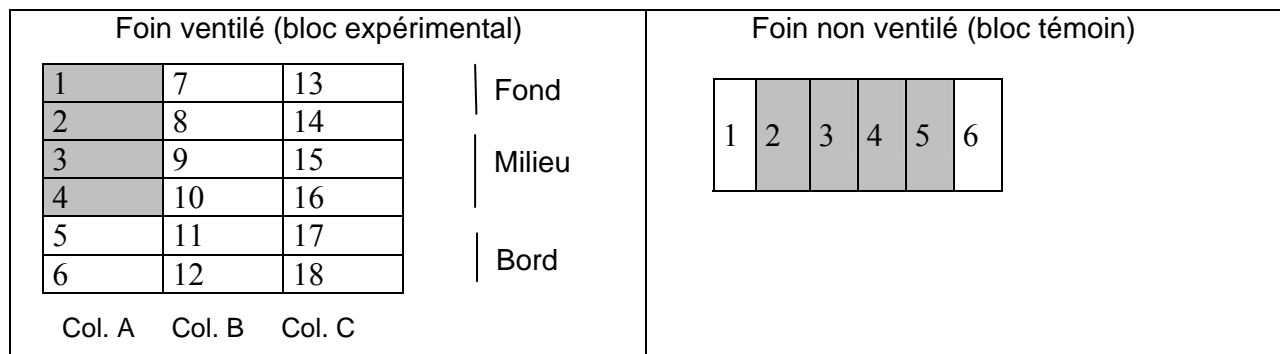


Figure 1. Détails d'une rangée de foin ventilé et d'un témoin non ventilé¹

¹ Les balles en gris ont fait l'objet d'un suivi élaboré : enregistrement de température pendant toute la période de séchage, détermination de la teneur en matière sèche au début et à la fin du test, analyse de la valeur nutritive finale et évaluation sensorielle.

Les 18 balles des rangs 1, 4 et 7 de chaque bloc expérimental et les 6 balles de chaque bloc témoin, soit 120 balles au total, ont fait l'objet d'un suivi sommaire : pesée lors de la mise en grange (jour 0) de même qu'après 6, 13 et 29 jours de conservation. De plus, 32 balles, soit les balles numéros 1 à 4 des rangs 1, 4 et 7 de chaque bloc expérimental et les balles nos 2 à 5 de chaque bloc témoin, ont fait l'objet d'un suivi élaboré. Des échantillons ont été prélevés dans ces balles lors de la mise en grange (jour 0) de même qu'après 29 jours de conservation, pour déterminer la teneur en matière sèche du foin. Des analyses (PB, ADF, NDF et N-ADF) ont également été faites sur 8 échantillons composites dans le but de déterminer la valeur nutritive du foin après 29 jours de conservation.

Les systèmes ont été ajustés de façon à avoir une pression statique le plus comparable possible dans le foin des deux granges. Le foin a été séché pendant 29 jours, c'est à dire du 18 septembre (261^{ème} jour julien) au 17 octobre (290^{ème} jour julien). Les ventilateurs ont été en opération pendant le jour (de 9 à 15 heures/jour; en moyenne 11,8 heures/jour) et arrêtés pendant la nuit. Ce mode de fonctionnement a été choisi afin d'éviter de refroidir trop le foin pendant la nuit. Cependant, on a opté pour un fonctionnement continu, du jour 276 au jour 280, après avoir noté des signes de chauffage, et plus tard (du jour 283 au jour 286), pour un arrêt pendant plus de 24 h à quelques reprises, parce que les conditions n'étaient pas propices au séchage. Après 29 jours de conservation, on a réalisé l'évaluation sensorielle des 32 balles qui avaient fait l'objet d'un suivi élaboré, ce après avoir coupé les cordes de ces balles pour permettre de bien examiner le foin. Pour réaliser cette évaluation, on a utilisé la grille de Cinq-Mars (2005) présentée au tableau 1.

Tableau 1. Grille d'évaluation sensorielle du foin destiné aux chevaux

| Item | Note ¹ | | | | | | | | | | |
|-----------|-------------------|---|---------|-----------|-----|-----------|---------|------------|--------------|----------|---|
| | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Couleur | Vert foncé | | Vert | Vert pâle | | Brun pâle | | Brun foncé | | Blanchi | |
| Odeur | Fraîche | | Moyenne | | | Faible | | | Moisi pourri | | |
| Texture | Souple | | Moyenne | | | Rigide | | | | | |
| Poussière | Aucune | | | | Peu | | Moyenne | | | Beaucoup | |

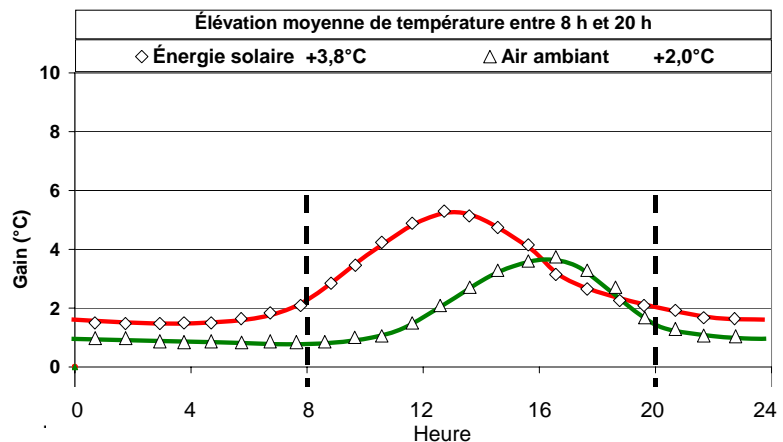
¹Note totale sur 40 points. Pour être acceptable un foin doit obtenir une note d'au moins 20 points. En bas de cette note de passage, on n'achète ni ne sert ce foin aux chevaux. Source : Cinq-Mars (2005).

Résultats

1. Conditions de séchage

Pendant le séchage, la température de l'air soufflé dans le foin a été en moyenne 3,8°C plus élevée que celle de l'air extérieur dans la grange solaire, alors qu'elle a été 2,0°C plus élevée que cette dernière dans la grange conventionnelle, ce entre 8 h et 20 h. Cependant, une partie de l'élévation de température (1,7°C dans la grange solaire) serait due à la chaleur dégagée par les moteurs des ventilateurs (0,8°C dans la grange solaire) et à l'inertie thermique (0,9°C dans la grange solaire) (Marceau, 2007). De plus, la température maximale de l'air a été atteinte plus tôt en moyenne, dans la grange solaire (en début d'après-midi) que dans la grange conventionnelle (en fin d'après-midi) (figure 2). L'élévation inattendue de la température de l'air de séchage dans la grange conventionnelle serait due au fait que le ventilateur récupérait de l'air qui s'était réchauffé dans la grange. Quant à la pression statique, elle a également été un peu plus élevée dans la grange solaire que dans la grange conventionnelle (en moyenne 0,78 po vs 0,71 po dans le plénum, 0,69 po vs 0,51 po sous le rang 1, 0,30 po vs 0,22 po sous le rang 4 et 0,14 po vs 0,08 po sous le rang 7), mais ce ne fut pas le cas à chaque niveau pendant toute la durée du test. Finalement, des signes de chauffage ont été observés dans le rang 4 de la grange solaire (temp. > 25°C) et surtout dans le rang 7 de la grange conventionnelle (temp. > 30°C).

Figure 2. Gain de température en fonction de l'heure du jour dans la grange solaire et la grange conventionnelle. On remarque que la grange conventionnelle a aussi bénéficié du réchauffement solaire.



2. Perte de poids en fonction de la durée de séchage

Effet de bordure

Au moment de la mise en grange, les balles avaient une teneur en MS de 75%, pesaient 26 kg et avaient une densité de 160 kg MS/m³ en moyenne. Les balles placées à l'extrémité du plancher latté, c'est-à-dire sur la partie de ce dernier qui est pavée pour prévenir les fuites d'air (colonne C), ont perdu moins de poids que celles des colonnes A et B dans le rang 1 (3,6 vs 4,0 kg/balle après 29 jours), comme on pouvait s'y attendre. Par contre, elles ont perdu autant de poids dans le rang 4 (3,7 vs 3,6 kg/balle après 29 jours) et plus dans le rang 7 (3,8 vs 3,2 kg/balle après 29 jours), ce qui est difficile à expliquer. De plus, dans le rang 1, les balles du bord ont perdu plus de poids après 6 jours que celles plus en profondeur (3,4 vs 2,8 kg/balle) mais la différence a disparu après 29 jours (3,9 kg/balle au bord comme en profondeur). Par contre, dans les rangs 4 et 7 les balles du bord ont perdu moins de poids que celles plus en profondeur quelle que soit la durée de séchage (après 29 jours : 3,1 vs 3,9 kg/balle dans le rang 4 et 2,8 vs 3,7 kg/balle dans le rang 7) (non illustré).

Effet du système de séchage et du rang

En moyenne, les balles séchées dans la grange solaire ont perdu plus de poids que celles séchées à l'air ambiant quelle que soit la durée de séchage. L'écart a été de 0,4 kg après 6 jours (2,0 vs 1,6 kg/balle), 0,7 kg après 13 jours (2,9 kg vs 2,2 kg/balle) et 1,1 kg après 29 jours (4,1 vs 3,0 kg/balle). La perte de poids a également été beaucoup plus rapide et plus poussée dans le rang 1 que dans le rang 4 et le rang 7. En fait, ce fut le cas dans le foin séché à l'air ambiant (3,6 vs 2,9 et 2,7 kg/balle après 29 jours) tout comme dans celui séché dans la grange solaire (4,7 vs 3,9 et 3,8 kg/balle après 29 jours). De plus, la perte de poids a évolué de la même façon dans le rang 4 et le rang 7 quel que soit le système de séchage. Cependant, elle a été aussi rapide dans le rang 7 que dans le rang 4 dans le foin séché dans la grange solaire (1,5 kg/balle après 6 jours) alors qu'elle a été un peu moins rapide dans le rang 7 que dans le rang 4 dans le foin séché à l'air ambiant (0,9 vs 1,2 kg/balle après 6 jours). De plus, quel que soit le rang, la perte de poids a été plus grande dans le foin séché dans la grange solaire que dans celui séché à l'air ambiant après 29 jours (4,7 vs 3,6 kg/balle dans le rang 1, 3,9 vs 2,9 kg/balle dans le rang 4 et 3,8 vs 2,7 kg/balle dans le rang 7) et l'écart a été à peu près le même (environ 1 kg/balle) dans chaque rang. Elle a également été plus rapide dans le foin séché dans la grange solaire que dans celui séché à l'air ambiant quel que soit le rang, tel qu'indiqué par les valeurs observées après 6 jours (2,9 vs 2,7 kg/balle dans le rang 1, 1,5 vs 1,2 kg/balle dans le rang 4 et 0,9 vs 1,5 kg/balle dans le rang 7). De plus, l'écart a été 2 à 3 fois plus prononcé dans le rang 7 que dans le rang 1 et le rang 4 (0,6 vs 0,2 et 0,3 kg/balle, respectivement) (figure 3).

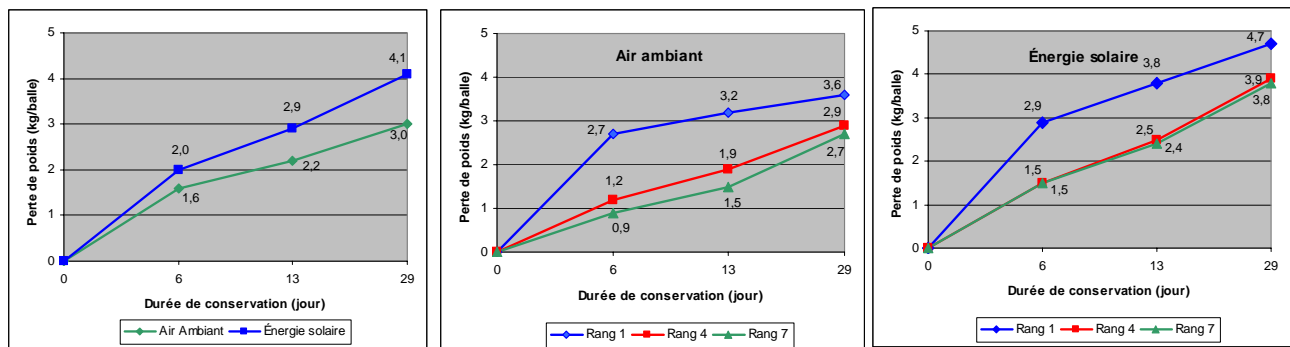


Figure 3. Perte de poids des balles de foin en fonction du système de séchage, du rang et de la durée de conservation

3. Modification du foin après 29 jours de conservation

Le foin séché à l'air ambiant a vu sa teneur en matière sèche augmenter de 8,4% en moyenne, passant de 75,2% lors de la mise en grange à 83,6% après un mois de conservation. Pendant ce temps, le poids des balles a diminué de 3,0 kg, passant de 25,2 kg à 22,2 kg. Elles ont perdu 2,6 kg d'eau et 0,4 kg de matière sèche. Dans ce foin, la perte de matière sèche représente 2,1% de la matière sèche initiale. Pendant la même période, le foin séché dans la grange solaire a vu sa teneur en matière sèche augmenter de 11,5% en moyenne, passant de 74,2% à 85,7% et le poids des balles a diminué de 4,1 kg, passant de 26,5 kg à 22,4 kg. Elles ont perdu 3,7 kg d'eau et 0,4 kg de matière sèche. Dans ce foin, la perte de matière sèche représente 2,0% de la matière sèche initiale (figure 4). Quant au foin témoin, sa teneur en matière sèche a augmenté de 10,1% en moyenne, passant de 74,3% à 84,4%. Le poids des balles a diminué de 4,3 kg, passant de 25,4 kg à 21,1 kg. Elles ont perdu 3,2 kg d'eau et 1,1 kg de matière sèche. La perte de matière sèche représente 5,8% de la matière sèche initiale (non illustré). Après 29 jours de conservation, la teneur en matière sèche était 2,1% plus élevée, en moyenne, dans le foin séché dans la grange solaire que dans celui séché à l'air ambiant (85,7% vs 83,6%). En fait, l'écart était de 1,9% dans le rang 1 (88,0% vs 86,1%), 1,7% dans le rang 4 (83,7% vs 82,0%) et 2,8% dans le rang 7 (85,5% vs 82,7%). Ainsi, la teneur en matière sèche qui permet une conservation sécuritaire à une telle densité (82%) a été atteinte dans le foin séché à l'air ambiant, tout comme dans celui séché dans la grange solaire, peu importe sa position au-dessus du plancher latté (figure 4). En fait, les résultats révèlent que toutes les balles échantillonnées avaient une teneur en matière sèche supérieure à 80% (non illustré).

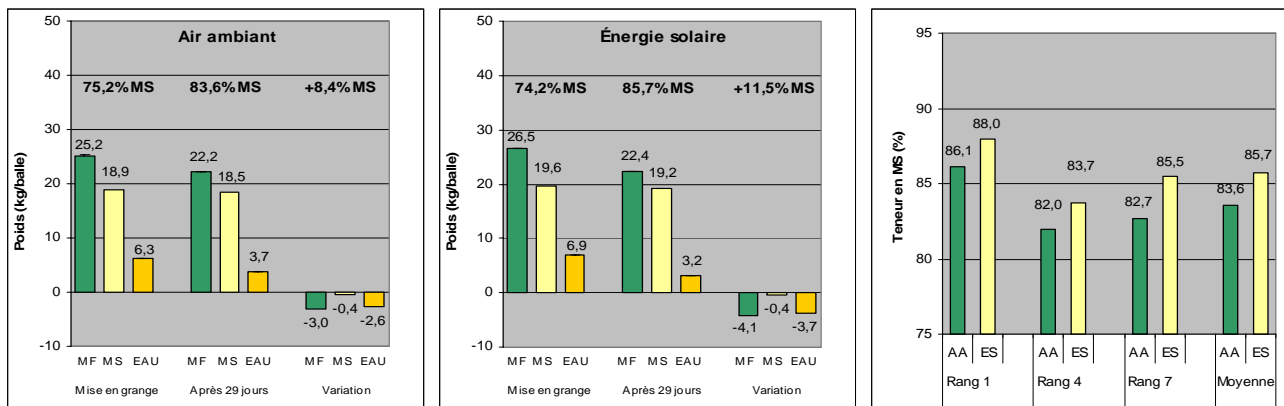


Figure 4. Variation de la quantité de matière fraîche, de matière sèche et d'eau pour chaque système de séchage et teneur en matière sèche finale en fonction du système de séchage et du rang

4. Évaluation sensorielle

Les résultats présentés au tableau 3 montrent que le foin séché dans la grange solaire et celui séché à l'air ambiant ont accumulé beaucoup plus de points que le témoin (34,1 points et 31,1 points vs 20,6 points sur 40, respectivement). Ce résultat indique que le foin témoin était mal conservé alors que celui séché à l'air ambiant et celui séché dans la grange solaire était moyennement bien conservé. De plus, le foin séché dans la grange solaire a présenté une plus belle couleur (note de 8,5 vs 7,8), une meilleure odeur (note de 8,3 vs 7,3) et moins de poussière (note de 8,3 vs 7,0) que celui séché à l'air ambiant.

L'analyse des notes attribuées en fonction du rang pour chacun des critères considérés montre que la qualité du foin a diminué du rang 1 au rang 7, qu'il soit séché à l'air ambiant (note totale de 35,8, 30,3 et 27,2 dans les rangs 1, 4 et 7, respectivement) ou dans la grange solaire (note totale de 35,2, 34,0 et 32,9 dans les rangs 1, 4 et 7, respectivement). Dans les deux cas, le foin du rang 7 avait une moins bonne odeur et était plus poussiéreux que celui du rang 4, et il en était de même pour le rang 4 par rapport au rang 1. Cependant, l'effet a été moins prononcé dans le foin séché dans la grange solaire que dans celui séché à l'air ambiant. En effet, dans le rang 1 (près du plancher latté) le foin était pratiquement exempt de poussière, qu'il soit séché dans la grange solaire ou à l'air ambiant (note de 8,8 vs 9,2), alors que dans le rang 4 (note de 8,3 vs 6,7) et le rang 7 (note de 7,8 vs 5,1) le foin séché dans la grange solaire était moins poussiéreux que celui séché à l'air ambiant (tableau 3). En ce qui concerne la présence de poussière, les résultats présentés au tableau 4 montrent que seulement 40% du foin séché dans la grange solaire et de celui séché à l'air ambiant (5 balles sur 12) était d'excellente qualité (très peu poussiéreux). Par contre, 65% du foin séché à l'air ambiant (8 balles sur 12) était de bonne qualité (très peu ou peu poussiéreux) alors que c'était le cas pour 85% du foin séché dans la grange solaire (10 balles sur 12).

Tableau 3. Effet du système de séchage et du rang sur la note attribuée lors de l'évaluation sensorielle du foin¹

| Traitement | Couleur | Odeur | Texture | Poussière | Total |
|------------------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|
| | Note | | | | |
| Témoin | 5,0 | 4,6 | 9,0 | 2,0 | 20,6 |
| Air ambiant | 7,8 | 7,3 | 9,0 | 7,0 | 31,1 |
| Rang 1 | 8,7 | 8,9 | 9,0 | 9,2 | 35,8 |
| Rang 4 | 7,6 | 7,0 | 9,0 | 6,7 | 30,3 |
| Rang 7 | 7,1 | 6,1 | 9,0 | 5,1 | 27,2 |
| Énergie solaire | 8,5 | 8,3 | 9,0 | 8,3 | 34,1 |
| Rang 1 | 8,7 | 8,7 | 9,0 | 8,8 | 35,2 |
| Rang 4 | 8,5 | 8,3 | 9,0 | 8,3 | 34,0 |
| Rang 7 | 8,4 | 7,8 | 9,0 | 7,8 | 32,9 |

¹Une note de 0 à 10 est attribuée pour chaque critère et la note finale est sur 40.

Tableau 4. Effet du système de séchage et du rang sur la présence de poussière dans le foin : classement des balles évaluées selon quatre catégories

| Traitement | Note ≥ 9 Très peu poussiéreux | 9 > note ≥ 6 Peu poussiéreux | 6 > note ≥ 3 Moyennement poussiéreux | Note < 3 Très poussiéreux | Total |
|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|---------------------------------|-----------|
| | Nombre de balles | | | | |
| Témoin | 0 | 0 | 1 | 6 | 7 |
| Air ambiant | 5 | 3 | 2 | 2 | 12 |
| Rang 1 | 3 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| Rang 4 | 2 | 1 | 0 | 1 | 4 |
| Rang 7 | 0 | 1 | 2 | 1 | 4 |
| Énergie solaire | 5 | 5 | 2 | 0 | 12 |
| Rang 1 | 3 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| Rang 4 | 2 | 1 | 1 | 0 | 4 |
| Rang 7 | 0 | 3 | 1 | 0 | 4 |

5. Valeur nutritive

Les analyses effectuées sur les échantillons prélevés après 29 jours de conservation sont caractéristiques d'un foin de graminées récoltées jeunes (15,8% PB, 33,2% ADF et 50,7% NDF, en moyenne). En moyenne, les teneurs en protéine brute (15,6 à 16,1%) et en protéine liée (2,2 à 2,3%) ont été comparables quel que soit le traitement. Par contre, la teneur en ligno-cellulose (fibre par détergent acide) a été à son plus bas niveau dans le foin séché dans la grange solaire (32,1%), a un niveau intermédiaire dans le foin séché à l'air ambiant (33,2%) et à son niveau le plus élevé dans le foin témoin (34,2%). Il en fut de même, mais avec des écarts plus prononcés, pour la teneur en parois cellulaires (fibre par détergent neutre) qui a présenté des valeurs de 47,9% dans le foin séché dans la grange solaire, 51,2% dans le foin séché à l'air ambiant et 52,9% dans le foin témoin. De plus, l'analyse des résultats en fonction du rang montre que le foin séché dans la grange solaire a présenté une teneur en ligno-cellulose (ADF) plus faible que celui séché à l'air ambiant principalement dans le rang 1 (31,5% vs 33,6%) et une teneur en parois cellulaires (NDF) plus faible que ce dernier principalement dans le rang 1 (47,5% vs 51,6%) et le rang 4 (47,6% vs 51,4%). Sa teneur en protéine brute a par contre été un peu plus faible que celle du foin séché à l'air ambiant dans le rang 7 (15,8% vs 16,5%) (tableau 5).

Tableau 5. Effet du système de séchage et du rang sur la valeur nutritive du foin après 29 jours de conservation

| | Protéine brute (PB) (%) | Ligno-cellulose (ADF) (%) | Parois cellulaires (NDF) (%) | Protéine liée à la fibre (PB-ADF) (%) |
|------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|--|
| Témoin | 16,1 | 34,2 | 52,9 | 2,2 |
| Air ambiant | 15,8 | 33,2 | 51,2 | 2,3 |
| Rang 1 | 15,4 | 33,6 | 51,6 | 2,4 |
| Rang 4 | 15,4 | 32,7 | 51,4 | 2,3 |
| Rang 7 | 16,5 | 33,4 | 50,8 | 2,3 |
| Énergie solaire | 15,6 | 32,1 | 47,9 | 2,3 |
| Rang 1 | 15,4 | 31,5 | 47,5 | 2,3 |
| Rang 4 | 15,5 | 32,5 | 47,6 | 2,0 |
| Rang 7 | 15,8 | 32,4 | 48,7 | 2,7 |

Conclusion

Dans les conditions de cette expérience, le séchage du foin a été plus rapide et plus poussé, après 29 jours de conservation, dans la grange solaire que dans la grange conventionnelle. La perte de matière sèche a été comparable dans les deux systèmes de séchage (environ 2%) et, dans un cas comme dans l'autre, la teneur en matière sèche finale a atteint 82% dans chaque rang. Le foin situé près du plancher latté (rang 1) a été presque exempt de poussière qu'il soit séché dans la grange solaire ou à l'air ambiant, alors que celui du rang 4 et du rang 7 a été moins poussiéreux lorsqu'il était séché dans la grange solaire plutôt qu'à l'air ambiant. Il a aussi présenté une meilleure couleur et une meilleure odeur. De plus, la valeur nutritive du foin séché dans la grange solaire a été meilleure que celle du foin séché à l'air ambiant, tel qu'indiqué par une moindre teneur en parois cellulaires (NDF) après 29 jours de conservation.

Les résultats semblent indiquer un avantage à utiliser l'énergie solaire même en fin de saison, puisque 85% du foin séché dans la grange solaire était de bonne qualité (très peu ou peu poussiéreux) alors que c'était le cas pour seulement 65% du foin séché à l'air ambiant. Cependant, pour du foin récolté en fin de saison (mi-septembre) et pressé à une densité relativement élevée (160 kg MS/m³) on devrait viser une teneur en matière sèche moyenne supérieure à 75%, même si on utilise l'énergie solaire pour réchauffer l'air de séchage, puisque aucun système de séchage n'a permis d'assurer une parfaite conservation d'un foin, c'est-à-dire où toutes les balles auraient été pratiquement exemptes de poussière.

Des études plus exhaustives devront être faites afin de démontrer plus clairement les avantages du captage de l'énergie solaire pour réchauffer l'air de séchage du foin, compte tenu que les améliorations observées dans cette étude semblent dues non seulement à l'élévation de la température de l'air de séchage, mais aussi au maintien d'une pression statique un peu plus élevée, du moins pendant une partie du test, dans la grange solaire comparativement à la grange conventionnelle. De plus, ce système devra être évalué dans des conditions où l'apport d'énergie solaire est plus important qu'il l'a été dans ce test réalisé en fin de saison et avec des balles pressées à une densité plus faible que celle réalisée dans cette expérience.

Finalement, ce projet ne permet pas de conclure sur l'avantage de la régie de fonctionnement des ventilateurs en discontinu en terme de rapidité de séchage du foin. Toutefois, nous avons été en mesure de constater qu'il est absolument nécessaire de suivre de très près l'évolution de la température du foin si on opte pour un fonctionnement en discontinu et que de longues périodes d'arrêt peuvent induire des montées de température dans le foin qui pourraient affecter négativement sa qualité. Des périodes d'arrêt de 15 heures s'avèrent trop longues même en fin de saison. Il y aurait avantage à les raccourcir.

Remerciements

Nous voulons remercier les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce test et les organismes qu'ils représentent. D'abord, M. Richard Matte pour sa collaboration soutenue. Son intérêt et son empressement à nous assister ont été fortement appréciés. Ensuite, M. Michel Atkins, technologiste agricole à l'IRDA, qui a assuré le suivi technique de l'essai de séchage. Aussi, M. Yvan Montambault, technologiste agricole au MAPAQ, pour sa collaboration à différentes étapes du projet. Des remerciements également à M. Émile Houle du CRSAD et M. Jacques Labonté de l'IRDA pour le prêt d'équipements électroniques et pour l'assistance accordée.

Références bibliographiques

Cinq-Mars, D. 2005. Critères d'évaluation du foin permettant d'établir son acceptabilité et sa valeur marchande relative pour les chevaux. Info-Fourrage, 2005 no 3, p. 8-10.

Marceau, J. 2007. Utilisation de l'énergie solaire pour le séchage du foin en petites balles. Phase 1 : Conception et évaluation du système. Développement et valorisation-Volet 5. Appui à l'adaptation et au développement régional. MAPAQ Québec. 18 p.

Morissette, R. et P. Savoie. 2007. Le séchage du fourrage haché en vrac avec un apport d'énergie solaire. Demi-journée scientifique sur les fourrages. CRAAQ et CQPF, Victoriaville. 20 février, p. 19-26.

Des plantes fourragères pour la production de méthane

Philippe Savoie¹, Daniel Babineau², Gaétan Parent¹, Gilles Bélanger¹ et Daniel Massé³

¹Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 boulevard Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3 savoiep@agr.gc.ca

²Dépôt Rive-Nord inc. (EBI), Berthierville, QC, J0K 1A0

³AAC, Centre de R&D sur le bovin laitier et le porc, Sherbrooke, QC, J1M 1Z3

Résumé

Le gaz naturel, combustible fossile parmi les moins polluants, est composé principalement de méthane dans une proportion de 70 à 90%. Il représente 25% de la consommation énergétique du Canada et des États-Unis. L'augmentation constante des besoins en énergie combinée à la flambée du prix du pétrole depuis le début du 21^e siècle a entraîné l'augmentation marquée du prix du gaz naturel. En dépit du fait que le Canada soit actuellement le troisième producteur mondial de gaz naturel, cette source énergétique s'avère être non renouvelable. Il est donc nécessaire de trouver de nouvelles alternatives énergétiques au gaz naturel.

Puisque le gaz naturel est principalement composé de méthane, la production de ce gaz à partir de ressources renouvelables pourrait être une alternative intéressante. Les déchets végétaux, les lisiers à la ferme et les plantes cultivées peuvent être utilisés pour la production de méthane. Un biogaz est produit durant la décomposition de la matière organique en absence d'oxygène. Durant ce procédé, appelé digestion anaérobie ou méthanisation, les principaux gaz produits sont le méthane (CH₄) et le gaz carbonique (CO₂). Le méthane est un combustible intéressant (37 MJ/m³). Ainsi, le méthane produit dans les biogaz peut remplacer le gaz naturel comme combustible pour le chauffage ou la production d'électricité.

Dans certains pays européens, les législateurs ont inclus la production de méthane par digestion anaérobie comme une nouvelle source d'énergie renouvelable importante grâce à divers programmes de subvention. Certaines cultures dédiées sont maintenant envisagées pour accroître la production de biogaz. Les législateurs nord-américains ont plutôt favorisé le développement de biocarburants liquides, en particulier l'éthanol, au détriment des bioénergies gazeuses ou solides. Toutefois, au cours des prochaines années, ils devront considérer l'ensemble des différents types de bioénergies (solides, liquides, gazeuses) en plus des bénéfices pouvant en découler (traitement de déchets, production de nouvelles énergies utiles, remplacement des énergies de source fossile et réduction des gaz à effet de serre). Dans ce contexte élargi, on a mis sur pied un projet de recherche pour examiner le potentiel des plantes fourragères pérennes destinées à la production de méthane. Commencé en 2007, le projet examine présentement les caractéristiques agronomiques de deux plantes (le panic érigé et l'alpiste roseau) pour déterminer leur potentiel à produire du méthane. La présentation puisera dans la littérature scientifique récente les principaux résultats de production de méthane à partir de plantes fourragères et mettra en relief différents aspects actuellement peu connus devant être approfondis dans les contextes québécois et canadien de la production bioénergétique.

Mesure de la teneur en eau en continu durant le séchage du foin en balles

Étienne Cormier¹, Philippe Savoie² et René Morissette²

¹Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Québec, QC, G1K 7P4
etienne.cormier.1@ulaval.ca

²Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche sur les sols et les grandes cultures,
2560 boulevard Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3 savoiep@agr.gc.ca

Résumé

Un capteur électronique relié à 16 sondes a été utilisé pour estimer la teneur en eau (TEE) durant le séchage du foin. Deux sondes et un thermocouple étaient insérés dans huit couches de foin superposées, de 130 mm d'épaisseur chacune. Les TEE estimées par les sondes ont été comparées à des TEE exactes obtenues par séchage à l'étuve et un bilan de masse pour chaque couche. Trois niveaux de TEE initiales (20, 30 et 40%) et deux températures de séchage (40 et 50°C) ont été répétés pendant trois semaines. Des régressions linéaires entre les lectures des sondes et les TEE exactes ont résulté en des coefficients R^2 compris entre 0,601 et 0,919. Les corrélations étaient moins bonnes pour les TEE initiales de 40%. L'ajout de la température dans les régressions a permis d'améliorer les corrélations et de réduire l'erreur standard d'estimation moyenne sous le niveau de +/- 2% pour des TEE initiales de 20 et 30%.

Introduction

La production de foin de commerce est une activité importante pour approvisionner le marché équestre et un marché grandissant en production laitière (Savoie, 2006). La plupart des éleveurs de chevaux achètent leur foin. De même, de plus en plus de producteurs laitiers préfèrent se spécialiser dans la gestion de leur troupeau et acheter le foin nécessaire dans les rations plutôt que de le produire à la ferme.

Le climat humide au Québec et dans plusieurs autres régions du monde favorise la croissance rapide des herbages mais il pose des difficultés au niveau de la conservation sèche sous forme de foin. De nouveaux systèmes de séchage du foin en balles ont été proposés récemment (Inventagri, 2005; Descôteaux et Savoie, 2006). Pour contrôler l'opération des séchoirs à foin, la mesure exacte de la teneur en eau est essentielle. En effet, la teneur en eau finale moyenne doit généralement être inférieure à 12% pour le commerce. De plus, il est souhaitable qu'aucun point dans l'ensemble d'un lot de foin ne soit plus humide que 15% sinon on peut observer le développement de moisissures durant l'entreposage (Couture et al. 2002). Enfin, il est important d'éviter le surséchage qui réduit la valeur du foin et représente un gaspillage d'énergie (Morissette et Savoie, 2006).

Cormier et al. (2007) ont étudié plusieurs sondes électroniques avec des mesures très rapides de la teneur en eau; ils ont observé des déviations moyennes entre 0,6 et 6,4% par rapport à la mesure exacte de teneur en eau à l'étuve. Leurs mesures étaient faites sur des balles stabilisées et

entreposées. Le défi est encore plus grand pour mesurer la teneur en eau en continu durant le séchage car il existe alors un courant d'air à travers les balles. Ce courant d'air peut être chaud et humide, ce qui pourrait altérer les mesures des sondes électroniques. Une nouvelle expérience a été planifiée pour mesurer la teneur en eau du foin en continu avec des sondes électroniques. Le but de l'expérience était d'évaluer la précision des mesures électroniques par rapport à la teneur en eau exacte pendant le séchage du foin. Ultimement, on souhaite développer un système de mesure rapide, automatique et précis pour contrôler l'opération des séchoirs à foin.

Méthodologie

Un séchoir expérimental en forme de colonne a été utilisé pour sécher du foin (figure 1). Le fourrage conditionné à une TEE cible était placé dans une boîte en treillis et compacté à une densité contrôlée, sur une épaisseur constante de 130 mm (figure 2). Les boîtes étaient en plastique perforé et avaient des dimensions intérieures de 310 x 310 x 130 mm. L'air circulait verticalement à travers le fourrage. Généralement, huit couches de foin étaient superposées dans la colonne. À l'intérieur de chaque couche étaient placées deux sondes de TEE, modèle F-2000 de la compagnie Delmhorst. Les sondes étaient au centre de la couche de fourrage en paire avec un espacement de 105 mm. Un multiplexeur (figure 3) a été fabriqué afin d'aiguiller chacune des sondes vers un seul capteur. Un thermocouple était inséré dans chaque boîte sur un côté adjacent aux sondes; la température du foin était enregistrée en continu pendant le séchage.

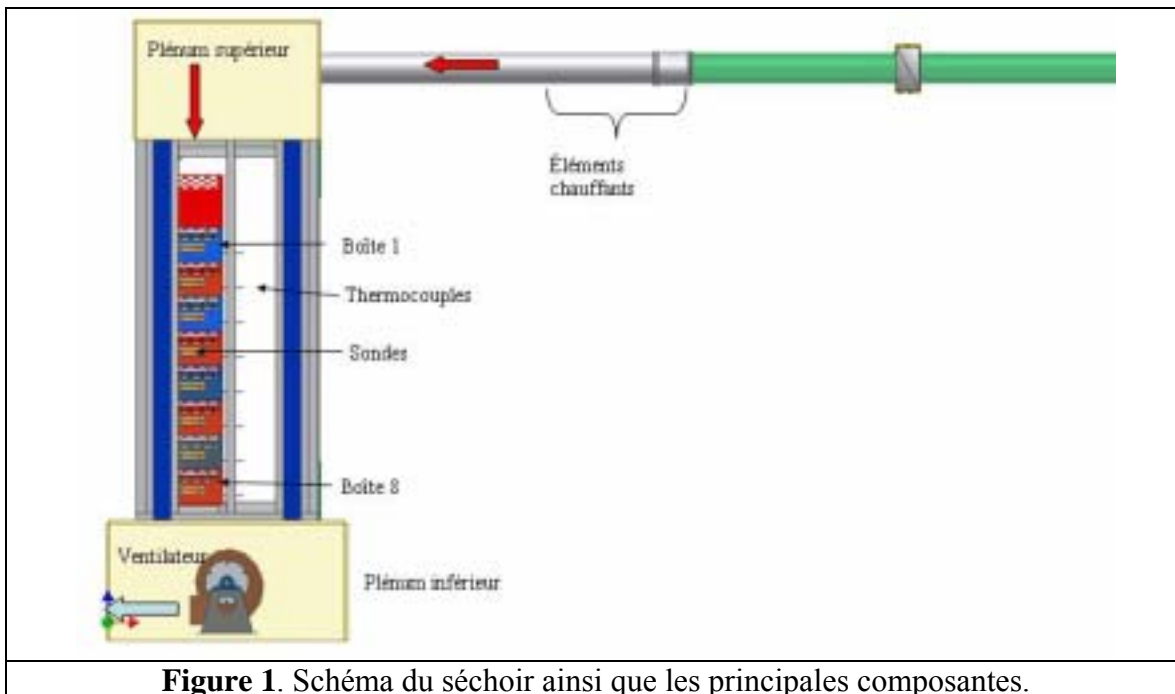


Figure 1. Schéma du séchoir ainsi que les principales composantes.

Un fourrage composé principalement de fléole des prés a été récolté au Centre de recherche de Deschambault à trois reprises durant le premier cycle végétatif (6, 21 et 27 juin 2007). Les TEE du fourrage fraîchement coupé variaient entre 60 et 80% sur une base humide. Le fourrage a ensuite été conditionné au laboratoire afin d'atteindre trois niveaux de TEE : 20, 30 et 40%. A

chaque semaine, six expériences étaient réalisées aux trois niveaux de TEE initiales et deux températures d'air de séchage (40 et 50°C).

Pour les 18 expériences (trois TEE initiales x deux températures d'air x trois semaines), le fourrage conditionné était compacté uniformément dans les boîtes à une densité de 100 kg MS/m³. Les quantités de foin nécessaires pour atteindre cette densité étaient de 1,62, 1,85 et 2,16 kg par boîte sur une base humide pour les TEE initiales de 20, 30 et 40%, respectivement.

Les boîtes étaient pesées aux 5 minutes pour les 10 premières minutes de séchage, aux 10 minutes pour les cinq intervalles suivants, aux 15 minutes pour les deux heures suivantes et aux 20 minutes par la suite. L'expérience se terminait lorsque les lectures de TEE dans l'ensemble des boîtes avaient atteint la limite inférieure de lecture du capteur de 8% ou l'équilibre avec l'air de séchage. Pour prendre les lectures électroniques, chaque sonde était manuellement sélectionnée par un interrupteur sur le multiplexeur.

À la fin de chaque expérience de séchage, quatre échantillons d'environ 200 g étaient prélevés de chacune des boîtes selon un gradient vertical. Ces échantillons étaient séchés à l'étuve pendant 24 heures à 103°C conformément à la norme S358.2 de l'ASABE (2006). La moyenne des quatre échantillons représentait la TEE de référence finale dans chaque boîte. À partir de celle-ci, les TEE intermédiaires et la TEE initiale étaient calculées pour chaque boîte par différence de masse. Ces TEE, basées sur le séchage à l'étuve et le bilan de masse, étaient considérées exactes. Elles étaient comparées avec la moyenne de mesure de chaque paire de sondes pour chaque intervalle de temps de mesure.

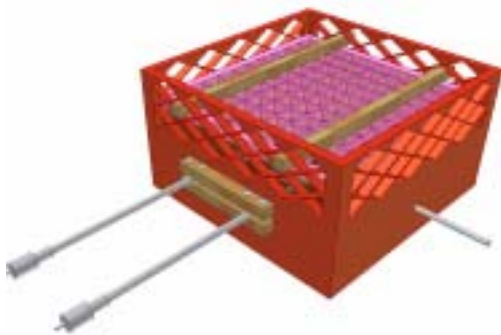


Figure 2. Schéma d'une boîte contenant une couche de 130 mm de foin avec deux sondes de TEE et un thermocouple.



Figure 3. Multiplexeur et capteur Delmhorst utilisés pour mesurer la TEE par les sondes.

Résultats

Les figures 4 et 5 montrent un exemple de courbes de séchage obtenues par la mesure exacte de TEE et la mesure des sondes électroniques. Les TEE exactes (figure 4) illustrent comment les premières couches en contact avec l'air chaud sèchent plus rapidement initialement tandis que les couches suivantes sèchent plus graduellement dans le temps. Les courbes de TEE estimées par les sondes (figure 5) suivent la même tendance générale décroissante dans le temps. Par contre, les valeurs absolues de TEE mesurées par les sondes sont plus dispersées que les TEE exactes. De plus, certains bacs, notamment 4, 5, 6 et 7 dans cet exemple, montrent une légère augmentation de la TEE mesurée par les sondes durant les deux ou trois premiers intervalles de

temps (10 à 20 min après le début de séchage). Cela suggérerait une humidification de certaines couches de foin initialement avant le séchage. Toutefois, cela n'est pas confirmé par les TEE exactes. Donc, la mesure des sondes serait influencée par la température et l'humidité du flux d'air en plus de la TEE contenue dans le foin. En effet, l'air chaud se remplit d'humidité lors de son passage dans les premiers bacs et entraînerait une hausse des lectures de TEE des sondes dans les bacs inférieurs. Ce phénomène d'augmentation de la TEE des sondes dans les bacs intermédiaires en début de séchage a été observé dans plusieurs des 17 autres expériences. Le phénomène était plus apparent avec des TEE initiales de 20 et 30% qu'avec des TEE initiales de 40% où les mesures des sondes n'augmentaient pratiquement jamais.

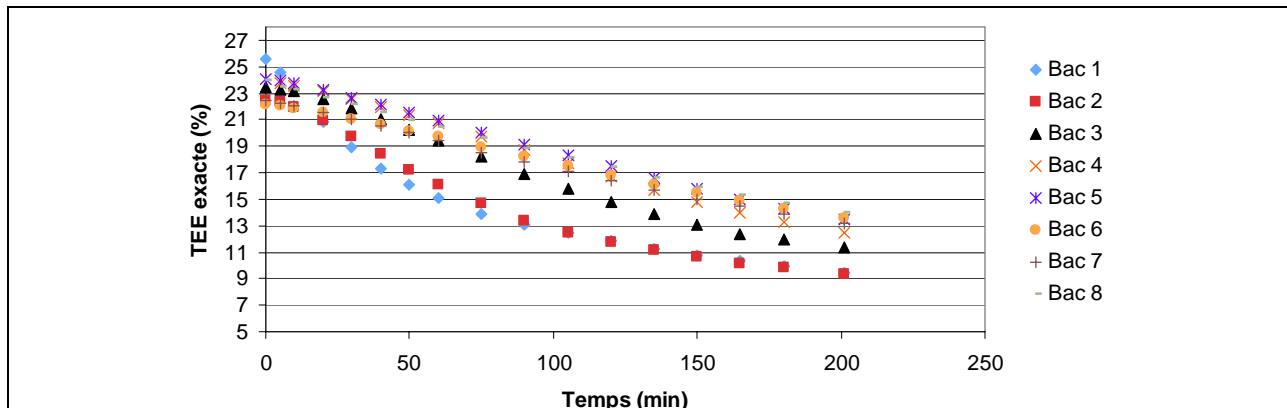


Figure 4. Teneur en eau exacte en fonction du temps (expérience semaine 1, TEE initiale = 20%, T = 40°C).

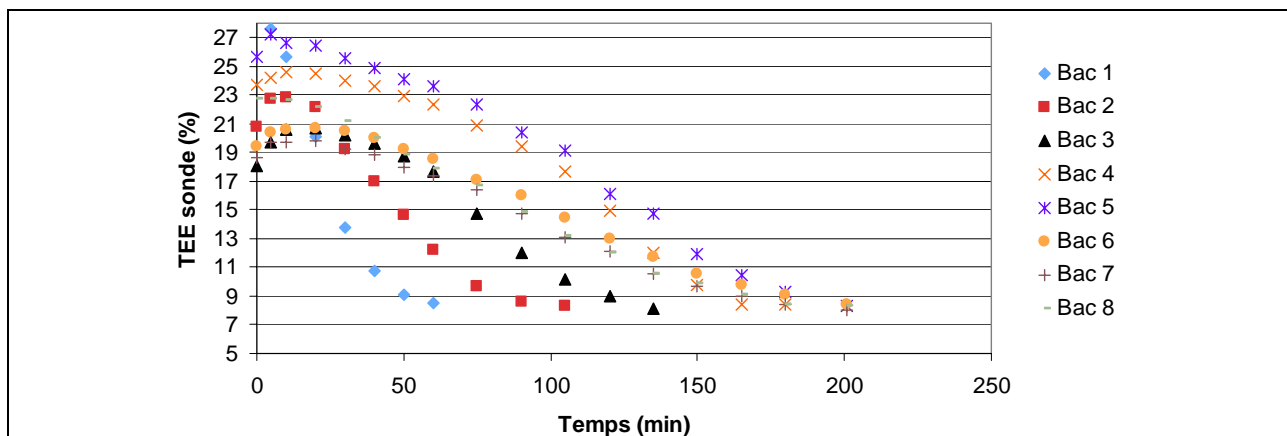


Figure 5. Teneur en eau des sondes en fonction du temps (expérience semaine 1, TEE initiale = 20%, T = 40°C).

Des régressions linéaires ont été calculées à partir des données de chaque couche individuellement et avec les données des huit couches regroupées pour chaque expérience. Elles suivent le modèle $TEE_{pred} = a \times TEE_{sonde} + c$. Le tableau 1 présente les résultats obtenus pour la première semaine d'expérience à une TEE initiale de 20% et une température de séchage de 40°C. La figure 6 montre la droite de régression des 115 données pour cette même expérience. Il y a une très forte relation entre les TEE exactes et les TEE estimées par les sondes comme le démontre les coefficients de détermination (R^2) qui vont de 0,911 à 0,989 lorsque les couches

sont analysées individuellement. La relation est toujours forte lorsque les 115 données sont regroupées pour cette expérience ($R^2 = 0,905$).

Tableau 1. Paramètres statistiques de régression linéaires ($TEE_{\text{exacte}} = a * TEE_{\text{sonde}} + c$) pour les couches individuelles et les 8 couches regroupées (TEE initiale de 20% et température de séchage de 40°C lors de la première semaine).

| # couche | Paramètres | | Nombre d'observ. | R^2 | Erreur standard |
|----------|------------|--------|------------------|-------|-----------------|
| | a | c | | | |
| 1 | 0,463 | 11,852 | 8 | 0,986 | 0,515 |
| 2 | 0,620 | 8,107 | 11 | 0,967 | 0,694 |
| 3 | 0,688 | 8,501 | 13 | 0,911 | 1,054 |
| 4 | 0,573 | 8,560 | 15 | 0,962 | 0,735 |
| 5 | 0,533 | 9,003 | 17 | 0,972 | 0,619 |
| 6 | 0,631 | 8,516 | 17 | 0,970 | 0,516 |
| 7 | 0,692 | 8,006 | 17 | 0,968 | 0,582 |
| 8 | 0,592 | 9,893 | 17 | 0,989 | 0,355 |
| 1 à 8 | 0,552 | 9,739 | 115 | 0,905 | 1,041 |

Le tableau 2 montre les résultats des régressions de chacune des 18 expériences faites avec les données regroupées pour les huit bacs. Les moins bonnes corrélations sont obtenues lors des expériences avec une TEE initiale du fourrage de 40% où R^2 varie de 0,601 à 0,867. Les erreurs standard sont également plus élevées à cette TEE initiale. Les R^2 des régressions pour les expériences réalisées avec une TEE initiale de 20% vont de 0,737 à 0,905 et de 0,795 à 0,919 pour les expériences réalisées avec une TEE initiale de 30%. Par contre, les erreurs standard sont moins élevées pour les TEE initiales de 20%.

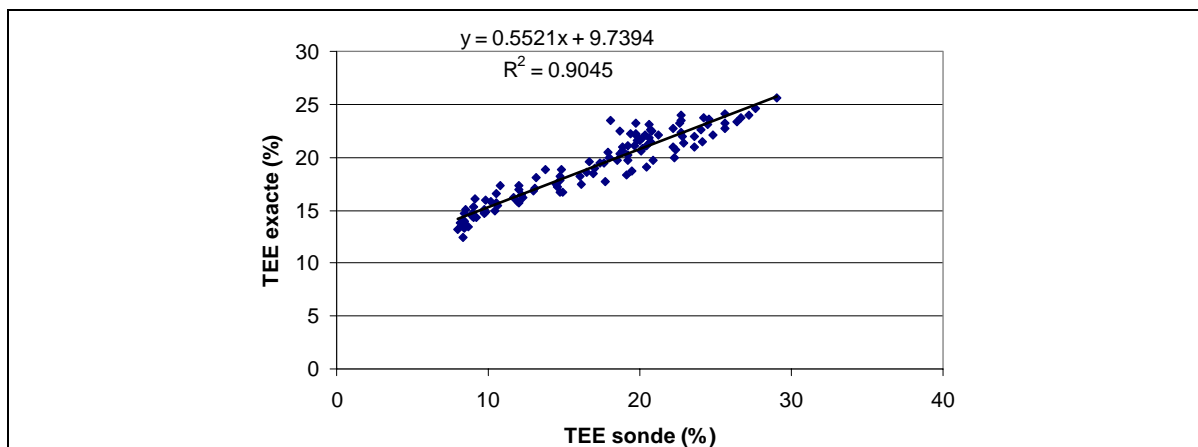


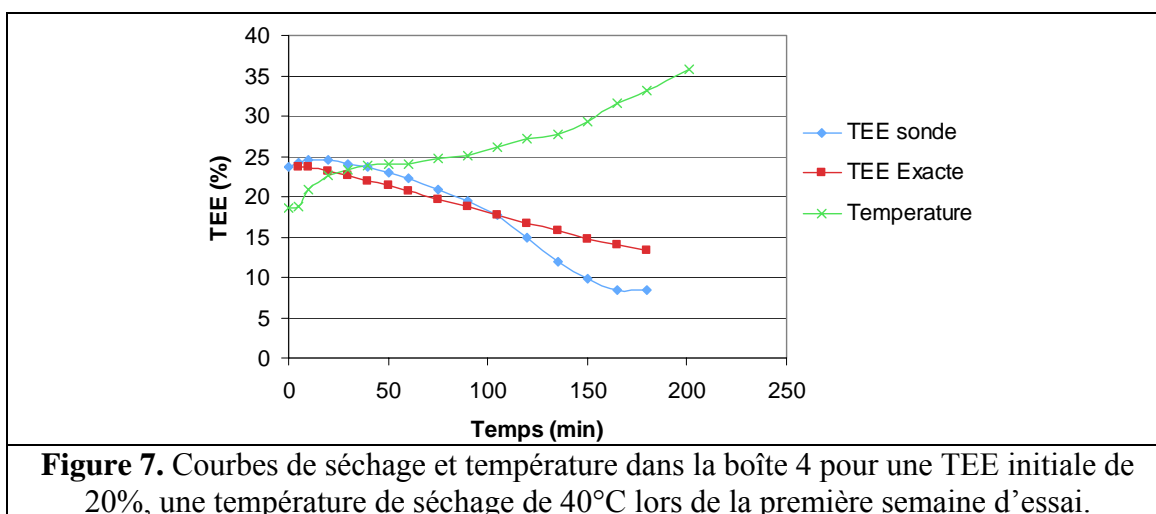
Figure 6. TEE exacte en fonction de la TEE des sondes pour une TEE initiale de 20% et une température de séchage de 40°C lors de la première semaine de tests.

Une tendance est observable lorsque les courbes de TEE exactes, des sondes et de la température en fonction du temps de séchage sont superposées comme à la figure 7. Lorsque la température à l'intérieur d'un bac augmente, la TEE estimée par les sondes diminue. Le biais, c'est-à-dire la différence entre la TEE exacte et celle estimée par les sondes, augmente à ce moment. La figure 7 montre la même expérience utilisée comme exemple pour les figures 4 et 5 mais la même

tendance se produit aussi pour les 17 autres expériences. L'augmentation du biais est encore plus marquée lors du séchage à 50°C pour les autres TEE initiales.

Tableau 2. Paramètres statistiques des régressions linéaires ($TEE_{\text{exacte}} = a * TEE_{\text{sonde}} + c$) sur l'ensemble des bacs pour chacune des 18 expériences.

| Semaine | TEE initiale (%) | Température d'air (°C) | Paramètres | | R ² | Erreur standard |
|---------|------------------|------------------------|------------|--------|----------------|-----------------|
| | | | a | c | | |
| 1 | 20 | 40 | 0,552 | 9,739 | 0,905 | 1,041 |
| | | 50 | 0,678 | 10,009 | 0,904 | 1,469 |
| | 30 | 40 | 0,507 | 15,603 | 0,872 | 1,853 |
| | | 50 | 0,571 | 15,303 | 0,829 | 2,025 |
| | 40 | 40 | 0,518 | 18,308 | 0,601 | 4,401 |
| | | 50 | 0,688 | 19,735 | 0,761 | 4,136 |
| 2 | 20 | 40 | 0,514 | 8,676 | 0,896 | 1,154 |
| | | 50 | 0,632 | 7,568 | 0,895 | 1,184 |
| | 30 | 40 | 0,554 | 11,978 | 0,910 | 1,932 |
| | | 50 | 0,627 | 12,336 | 0,795 | 2,777 |
| | 40 | 40 | 0,651 | 16,626 | 0,863 | 2,775 |
| | | 50 | 0,845 | 15,039 | 0,734 | 4,621 |
| 3 | 20 | 40 | 0,659 | 6,223 | 0,835 | 1,250 |
| | | 50 | 0,789 | 4,976 | 0,737 | 1,660 |
| | 30 | 40 | 0,635 | 9,484 | 0,919 | 1,932 |
| | | 50 | 0,569 | 13,882 | 0,883 | 2,370 |
| | 40 | 40 | 0,523 | 16,103 | 0,867 | 1,982 |
| | | 50 | 0,515 | 16,259 | 0,820 | 2,400 |



Étant donné que la température semble avoir un effet sur l'estimation de la TEE par les sondes, celle-ci a été intégrée à l'intérieur du modèle de régression comme nouveau facteur afin d'améliorer les coefficients de détermination et avoir une meilleure équation de calibration. Le tableau 3 regroupe les paramètres statistiques des régressions intégrant la température. Le modèle de régression devient : $y = a \times TEE_{\text{sonde}} + b \times \text{Température} + c$. Comme le montre le tableau 3, l'ajout de la température dans la régression a permis d'améliorer les corrélations puisque les R² augmentent dans toutes les des expériences; le facteur de température était statistiquement significatif dans 16 expériences sur 18. Les R² varient de 0,776 à 0,949, de 0,849 à 0,940 et de

0,685 à 0,889 pour les TEE initiales de 20, 30 et 40%, respectivement. L'erreur standard était en moyenne +/- 1,14, 1,80 et 3,09% aux trois TEE initiales, respectivement.

Tableau 3. Paramètres statistiques des régressions incluant la température de l'air de séchage T ($TEE_{\text{exacte}} = a * TEE_{\text{sonde}} + b * T + c$) pour chacune des 18 expériences.

| Semaine | TEE initiale (%) | Température (°C) | Paramètres | | | R ² | Erreur standard |
|---------|------------------|------------------|------------|--------|--------|----------------|-----------------|
| | | | a | b | c | | |
| 1 | 20 | 40 | 0,370 | -0,294 | 20,333 | 0,943 | 0,806 |
| | | 50 | 0,395 | -0,286 | 23,748 | 0,949 | 1,081 |
| | 30 | 40 | 0,641 | 0,302 | 5,409 | 0,903 | 1,619 |
| | | 50 | 0,442 | -0,223 | 24,286 | 0,855 | 1,871 |
| | 40 | 40 | 0,181 | -0,667 | 44,713 | 0,685 | 3,932 |
| | | 50 | 0,393 | -0,630 | 45,466 | 0,842 | 3,384 |
| 2 | 20 | 40 | 0,421 | -0,128 | 13,801 | 0,921 | 1,011 |
| | | 50 | 0,544 | -0,078 | 11,058 | 0,903 | 1,143 |
| | 30 | 40 | 0,488 | -0,126 | 1,872 | 0,916 | 1,872 |
| | | 50 | 0,413 | -0,233 | 23,667 | 0,849 | 2,395 |
| | 40 | 40 | 0,496 | -0,296 | 28,267 | 0,888 | 2,521 |
| | | 50 | 0,912 | 0,104* | 9,484* | 0,738 | 4,617 |
| 3 | 20 | 40 | 0,551 | -0,092 | 10,265 | 0,842 | 1,228 |
| | | 50 | 0,481 | -0,167 | 14,485 | 0,776 | 1,543 |
| | 30 | 40 | 0,512 | -0,167 | 16,789 | 0,934 | 1,328 |
| | | 50 | 0,310 | -0,381 | 31,657 | 0,940 | 1,712 |
| | 40 | 40 | 0,419 | -0,279 | 25,895 | 0,889 | 1,820 |
| | | 50 | 0,418 | -0,185 | 23,686 | 0,846 | 2,233 |

* Paramètre non-significatif dans la régression (P > 0,05)

Une erreur d'estimation de la TEE de l'ordre de +/- 1 à 2% est probablement acceptable dans un procédé industriel pour le foin destiné au commerce. En séchant tout le foin à une TEE apparente inférieure à 12%, on aurait une assurance assez grande qu'à peu près tous les points seraient plus secs que 15% de TEE, le seuil reconnu comme étant sensible au développement de moisissures (Couture et al. 2002). Ainsi les mesures des sondes électroniques, telles que corrigées avec les régressions incluant une correction de température, donneraient une estimation acceptable pour le séchage du foin initialement moins humide que 30% de TEE. Par contre, le séchage de foin initialement plus humide, en particulier près de 40% de TEE, exigerait un autre type de sondes ou des contrôles supplémentaires, comme le séchage à l'étuve et au micro-ondes, pour s'assurer d'avoir une TEE sécuritaire à la fin du séchage.

Conclusions

Un système de mesure en continu de la TEE a été expérimenté pour le séchage du foin. Dans certains cas, la TEE était sur-estimée en début de séchage mais un croisement des courbes de TEE se produisait pendant le séchage et les sondes sous-estimaient alors la TEE jusqu'à la fin du séchage. Pour d'autres cas, les sondes sous-estimaient la TEE pendant tout le séchage.

Des corrélations linéaires ont d'abord été obtenues entre les TEE des sondes et les TEE exactes. Les corrélations étaient semblables aux TEE initiales de 20 et 30% : elles variaient entre 0,737 à 0,905 (moyenne de 0,862) à 20% et entre 0,795 à 0,919 (moyenne de 0,868) à 30%. Elles étaient plus basses à une TEE initiale élevée de 40% : entre 0,601 et 0,867 (moyenne de 0,774). Les erreurs standard étaient plus faibles à basse TEE initiale (1,29, 2,15 et 3,39%, respectivement aux TEE de 20, 30 et 40%).

L'estimation de la TEE par les sondes était influencée par la température de l'air circulant à travers le foin. En effet, lorsque la température augmentait, le biais augmentait comparativement au début du séchage. L'ajout de la température dans les régressions a amélioré les corrélations puisque les R^2 ont augmenté dans tous les cas et variaient de 0,776 à 0,949 (moyenne de 0,889) et de 0,849 à 0,940 (moyenne de 0,900) pour les TEE initiales de 20 et 30%, respectivement. Les erreurs standard de prédiction ont aussi diminué, à 1,14 et 1,80%, respectivement. Pour une TEE initiale de 40%, l'erreur standard avait diminué à 3,09%, un niveau encore inacceptable dans un procédé industriel de séchage de foin destiné au commerce.

L'utilisation des sondes a permis de mesurer l'évolution de la TEE dans le foin à l'intérieur d'un séchoir expérimental. Une équation de correction linéaire qui inclut la température permet de corréliser les lectures des sondes avec les TEE exactes avec une erreur standard inférieure à 2% quand la TEE initiale est inférieure à 30%. Il serait souhaitable de tester le système dans un séchoir à grande échelle où les conditions sont plus variables qu'à l'échelle expérimentale.

Liste des ouvrages cités

- ASABE. 2006. Moisture measurement - forages. Standard S358.2. In ASAE Standards. St. Joseph, MI : ASABE.
- Cormier, É., H. Joannis et P. Savoie. 2007. Mesure électronique de la teneur en eau des fourrages: exactitude et constance. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages, Victoriaville, le 20 février. Pages 11-18. Conseil québécois des plantes fourragères, Québec. <http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/documents/Compte-rendu%2007.pdf>
- Couture, L., B.P. Hua et P. Savoie. 2002. Seuils d'émergence des moisissures dans le foin en fonction de l'humidité. Pages 30-35. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages, Victoriaville, le 7 février. Conseil québécois des plantes fourragères, Sainte-Foy, Québec. <http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/documents/Compte-rendu-2002.pdf>
- Descôteaux, S. and P. Savoie. 2006. Bi-directional dryer for mid-size rectangular hay bales. Applied Engineering in Agriculture 22(4): 481-489.
- Inventagri. 2005. Round & Square Bale Hay Dryer. <http://www.inventagri.com/>
- Morissette, R. et P. Savoie. 2006. Modélisation et validation du séchage du foin en balles. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages, Victoriaville, le 14 février. Pages 53-60. Conseil québécois des plantes fourragères, Sainte-Foy, Québec. Disponible le site: <http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/documents/Compte-rendu%20DJISF%202006.pdf>
- Savoie, P. 2006. Marchés, production et commercialisation du foin en 2006 et 2016. Colloque INPACQ (Innovation et Progrès en Agroalimentaire au Centre du Québec). Pages 34 à 37 du Cahier de conférences. MAPAQ, Centre du Québec, Nicolet, Qc. Disponible sur le site: <http://www.agrireseau.qc.ca/> (Grandes cultures, plantes fourragères).

Fractionnement de la fibre de maïs pour servir comme fourrage, bioénergie et biomatériau

Luc D'Amours^{1,2} et Philippe Savoie²

¹Département de Génie des Bioressources, Campus Macdonald de l'Université McGill, Sainte-Anne de Bellevue, QC, H9X 3V9; luke_damours99@yahoo.ca

²Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche sur les sols et les grandes cultures, 2560 boulevard Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3 savoiep@agr.gc.ca

Résumé

Une quantité importante de fibre de maïs, estimée à plus de 2,4 millions de tonnes de matière sèche (MS) au Québec annuellement, est laissée au champ après la récolte du grain. La récolte d'environ 400 000 t de fibre par année n'aurait aucun impact négatif sur l'environnement et fournirait une importante nouvelle source de biomasse pour des usages multiples en alimentation animale, énergie et biomatériaux. À partir de cultivars observés au Québec, la fraction de fibre par rapport à la masse totale de la plante a diminué graduellement de 79% le 6 septembre à 44% le 22 novembre. La méthode de récolte aura un impact important sur le rendement et la teneur en eau de cette fibre. Si seulement la fibre au-dessus de l'épi est récoltée, on aura entre 4,0 et 6,1 t MS/ha avec une teneur en eau entre 42 et 77%, selon la date de récolte. Si toute la fibre est récoltée, les rendements varieront entre 6,4 et 9,2 t MS/ha et la teneur en eau entre 50 et 79%.

Introduction

Le maïs est une culture importante au Canada, semée en moyenne sur 1,21 million d'hectares par année au cours des cinq dernières années, entre 2003 et 2007, avec des rendements moyens de 7,60 t de grain/ha (Statistique Canada, 2007). La production est concentrée en Ontario et au Québec, avec des superficies moyennes de 720 000 et 388 000 ha, respectivement, soit 92% des superficies au Canada. En 2007, les superficies ont atteint un sommet historique au Canada (1,41 Mha) de même qu'en Ontario avec 892 000 ha et au Québec avec 443 000 ha (Le Bulletin des agriculteurs, 2007). Les rendements ont aussi atteint un sommet au Québec en 2007, dépassant 9 t/ha et une production totale de 4,1 millions de tonnes de grain.

Le maïs est reconnu pour produire une quantité importante de fibre. Le ratio de la masse de fibre à la masse de grain varie avec le temps, la région climatique et le type de cultivar. Par exemple, Shinnors et al. (2003) ont rapporté un ratio moyen de 0,74 lors au Wisconsin tandis qu'Edens et al. (2002) ont observé un ratio de 1,0 au Tennessee. Pordesimo et al. (2004, 2005) ont toutefois nuancé que le ratio de fibre récoltable était de 0,8 au Tennessee. Shinnors et Binversie (2007) ont montré que la fraction de fibre diminuait graduellement avec la maturité et qu'elle était plus importante dans les cultivars destinés à l'ensilage. Pour 11 cultivars récoltés pendant trois ans, ils ont estimé un ratio moyen de 0,92 (48% de fibre et 52% de grain) à la récolte. Au Québec, Savoie et Descôteaux (2004) avaient estimé un ratio de 0,82. Donc au Québec, pour une superficie de 400 000 ha en maïs et un rendement moyen en grain de 7,5 t/ha, la quantité de fibre de maïs laissée au sol est d'au moins 2,4 million de tonnes.

De cette quantité, combien peut-on raisonnablement récolter? Aux États-Unis, Graham et al. (2007) ont utilisé l'équation de perte de sol universelle et une équation d'érosion éolienne pour estimer la quantité minimale de fibre à laisser au champ pour satisfaire les critères de conservation de sol selon le U.S. Conservation Service. Ils ont estimé que 30% de la fibre de maïs aurait pu être récoltée aux États-Unis en 2004 en considérant les méthodes courantes de travail du sol. Si tous les producteurs de maïs adhéraient à des pratiques de travail du sol minimal, la fraction récoltable augmenterait à 50% selon leur modèle. Au Canada, il ne semble pas y avoir eu d'analyse semblable. Toutefois, dans les Prairies, Sokhansanj et al. (2006) ont suggéré qu'il fallait laisser entre 0,75 et 1,5 t de paille/ha pour la protection des sols après la récolte des céréales. Dans les conditions du Québec où le rendement moyen en grain de maïs est de 7,5 t/ha et celui de la fibre d'environ 6 t/ha, on estime qu'il serait possible de prélever 4 t de fibre/ha sur les sols avec une faible pente et un bon drainage, c'est-à-dire au moins 100 000 ha et 400 000 t de fibre. Il pourrait même y avoir des avantages environnementaux à récolter une partie de la fibre. En effet, Wilhelm et al. (2004) ont suggéré que le prélèvement d'une partie de la fibre, en particulier dans les climats frais, favorisait un réchauffement du sol, une émergence plus rapide des semences au printemps et une réduction du travail d'enfouissement des résidus.

Quels sont les débouchés pour une telle fibre? Plusieurs usages ont été proposés et certains sont même pratiqués présentement, quoique généralement à petite échelle. À la ferme, la fibre de maïs peut servir d'aliment pour les ruminants, de litière, de source d'énergie pour le chauffage des bâtiments ou encore de source d'énergie pour le séchage des grains. À l'extérieur de la ferme, la fibre de maïs peut être transformée en granules énergétiques, servir de fibre pour des biomatériaux comme des panneaux agglomérés, être hydrolysée en sucres pour la production d'éthanol cellulosique et servir en co-combustion dans les centrales thermiques. L'utilisation de la fibre de maïs doit toutefois faire face à plusieurs obstacles techniques et économiques.

Pendant que la recherche se poursuit pour développer diverses applications, il est important de caractériser les fibres de maïs disponibles au Québec et les méthodes de récolte appropriées, à un coût raisonnable et avec une qualité acceptable, notamment sans contamination par le sol. Un projet de recherche entrepris par Agriculture et Agroalimentaire Canada, en collaboration avec des partenaires privés, vise à mieux connaître cette fibre et les méthodes de récolte. L'expérience rapportée ici avait pour but de caractériser les fractions de fibre au moment de la récolte.

Méthodologie

Des plantes de maïs ont été récoltées chaque semaine sur deux sites (Deschambault et Sainte-Anne-de-Bellevue) à partir du 6 septembre 2007 jusqu'à 12 semaines de suite. Deux cultivars échantillonnés à Deschambault provenaient de la compagnie Syngenta : N06-C1 (2300 unités thermiques maïs) et N16-N7 (2600 UTM). Deux autres cultivars échantillonnés à Sainte-Anne-de-Bellevue provenaient de la compagnie Pioneer : 38M59 (2800 UTM) et 38B11 (2650 UTM). À chaque semaine et pour chaque cultivar, on coupait cinq plantes au hasard à 100 mm du sol. On comptait le nombre de plantes sur trois lignes de 8 m de longueur pour estimer la densité de semis. Chaque plante était amenée au laboratoire dans un sac de polyéthylène pour éviter l'évaporation d'eau et subdivisée en sept composantes morphologiques : la tige sous l'épi (tiges-bas), la tige au-dessus de l'épi (tiges-haut), les feuilles sous l'épi (feuilles-bas), les feuilles au-dessus de l'épi (feuilles-haut), les grains, la rafle et les spathes. Chaque composante était pesée et séchée à l'étuve à 103°C. La norme S358.2 de l'ASABE (2007) suggère une durée de 24 h de

séchage pour les fourrages mais le temps de séchage a été allongé à six jours (144 h) jusqu'à la stabilisation de la matière sèche. Une longue durée de séchage était particulièrement nécessaire pour les tiges qui n'étaient pas hachées et desquelles l'eau s'évaporait lentement.

Résultats

Les cultivars Syngenta ont fait l'objet d'un suivi de 12 semaines tandis que les cultivars Pioneer ont été suivis pendant trois semaines (cv. 38M59) ou sept semaines (cv. 38B11) suite à une récolte hâtive du maïs à Sainte-Anne-de-Bellevue. Les mesures de longueur des plants sont présentées au tableau 1. Les cultivars à UTM plus faibles à chacun des sites (N06-C1 et 38B11) étaient plus courts et avaient un épi plus près du sol (0,96 m en moyenne) que les cultivars à UTM élevées (N16-N7 et 38M59) qui avaient l'épi plus haut par rapport au sol (1,21 m en moyenne). Il n'y a pas eu d'évolution notable de la longueur des plants de maïs à partir du 6 septembre pour les quatre cultivars et la durée des mesures (jusqu'à 12 semaines pour les cultivars Syngenta).

Tableau 1. Longueur (m) de plants de maïs coupés à 0,10 m du sol entre le 6 septembre et le 22 novembre.

| Longueur sous l'épi | Cultivars Pioneer | | Cultivars Syngenta | |
|------------------------|-------------------|-------|--------------------|--------|
| | 38M59 | 38B11 | N06-C1 | N16-N7 |
| Moyenne | 1,18 | 0,85 | 0,86 | 1,04 |
| Minimum | 1,08 | 0,69 | 0,74 | 0,93 |
| Maximum | 1,26 | 0,99 | 0,97 | 1,16 |
| Écart type | 0,07 | 0,13 | 0,09 | 0,10 |
| Nombre d'observations | 20 | 35 | 60 | 60 |
| Longueur totale | | | | |
| Moyenne | 2,90 | 2,54 | 2,44 | 2,60 |
| Minimum | 2,77 | 2,36 | 2,32 | 2,42 |
| Maximum | 3,02 | 2,68 | 2,54 | 2,74 |
| Écart type | 0,10 | 0,13 | 0,09 | 0,13 |
| Nombre d'observations | 20 | 35 | 60 | 60 |

Pour la suite de l'analyse, seulement les données des cultivars Syngenta sont présentées car elles étaient disponibles pendant 12 semaines consécutives. À la figure 1, la fraction du grain du cultivar N06-C1 par rapport à la masse totale a augmenté graduellement jusqu'à la fin d'octobre. À la fin du suivi (22 novembre 2007), la masse était répartie comme suit : 56%, 9%, 4%, 8%, 4%, 7% et 11% respectivement pour la fraction massique de grain, de rafle, de spathes, de feuilles-haut, de feuilles-bas, de tiges-haut et de tiges-bas. À la même date, la répartition pour le cultivar N16-N7 (figure 2) était de 52%, 10%, 6%, 6%, 5%, 6% et 16%, respectivement. Le pourcentage de grain a augmenté de 31% à 56% pour le N06-C1 et de 21% à 53% pour le N16-N7.

Les figures 3 et 4 présentent les teneurs en eau des fractions. Au début du suivi (6 septembre), la teneur en eau moyenne des deux cultivars était de 62%, 69%, 80%, 80%, 85%, 78% et 80% respectivement pour le grain, la rafle, les spathes, les feuilles-haut, les feuilles-bas, les tiges-haut et les tiges-bas. À la fin du suivi (22 novembre), les teneurs en eau avaient diminué à 30%, 50%, 51%, 29%, 39%, 55% et 77%, respectivement. La teneur en eau est sans doute influencée par le climat quotidien mais elle diminue nettement pour toutes les composantes, excepté les tiges-bas, du début de septembre à la fin de novembre.

Les rendements de biomasse sont présentés aux figures 5 et 6. La masse de grain a dépassé la masse de fibre à partir du 4 octobre pour le cultivar N06-C1 (plus hâtif) et à partir du 1^{er} novembre pour le cultivar N16-N7 (plus tardif). La quantité totale de grain n'était toutefois pas supérieure pour le cultivar tardif. Durant la période du 11 octobre au 15 novembre, le rendement de grain a varié entre 8400 et 9700 kg MS/ha, avec des moyennes de 9018 kg MS/ha pour le N06-C1 et de 8818 kg MS/ha pour le N16-N17 (équivalant à des rendements de 10,5 et 10,3 t de grain à 14,5% de teneur en eau, respectivement).

Étant donné que la récolte se fait d'abord en fonction du grain, le cultivar N06-C1 aurait dû être récolté durant la période entre le 4 octobre et le 15 novembre quand le rendement était élevé et stable. Selon les mêmes critères, la période de récolte du cultivar N16-N7 aurait été décalée d'une semaine, entre le 11 octobre et le 22 novembre. Durant la période associée à la récolte du cultivar N06-C1, la masse totale de fibre baissait graduellement entre un maximum de 8,9 et un minimum de 6,6 t MS/ha (moyenne 7,9 t MS/ha). Durant la période associée à la récolte du cultivar N16-N7, la masse totale de fibre baissait de façon moins prononcée entre un maximum de 9,3 et un minimum de 8,3 t MS/ha (moyenne 8,8 t MS/ha).

Les figures 5 et 6 présentent aussi la répartition de la fibre en dessous et au-dessus de l'épi. En moyenne, la fraction de fibre par rapport à la fibre totale au-dessus de l'épi était de 64% pour le cultivar N06-C1 et 54% pour le N16-N7. Les teneurs en eau pondérées pour ces deux fractions de fibre ainsi que la fibre totale sont présentées aux figures 7 et 8. Pour le cultivar N06-C1, si on récoltait seulement la fibre inférieure à l'épi, on obtiendrait entre 2,3 et 3,6 t MS/ha à une teneur en eau variant entre 64% et 85%. Si on récoltait seulement la fibre supérieure, on obtiendrait de 4,0 à 6,2 t MS/ha à une teneur entre 43% et 77%. Si on récoltait toute la fibre, on obtiendrait entre 6,3 et 9,2 t MS/ha à une teneur en eau entre 50 et 78%. Ainsi la fraction récoltée et le moment de récolte ont une grande influence sur la quantité et la teneur en eau. Cette dernière caractéristique est importante particulièrement pour les applications industrielles de la fibre de maïs qui doit être séchée (jusqu'à 10 ou 12% de teneur en eau en général, selon les applications comme des granules énergétiques et des panneaux d'agglomérés). Dans ce contexte, on chercherait sans doute à récolter la fibre la plus sèche possible.

Pour le cultivar N16-N7, on peut faire la même analyse : la masse de fibre inférieure a varié entre 3,6 et 5,3 t MS/ha à une teneur en eau entre 67 et 82%; la masse de fibre supérieure a varié entre 4,2 et 5,8 t MS/ha à une teneur eau entre 48 et 75%; la masse de fibre totale a varié entre 8,0 et 11,0 t MS/ha à une teneur en eau entre 43 et 77%. La discussion qui suit propose diverses méthodes de faire une récolte sélective ou totale de la fibre.

Scénarios de récolte de la fibre de maïs

Pour récolter la fibre supérieure, la méthode la plus simple est de former un andain directement à l'arrière de la moissonneuse-batteuse en arrêtant le mécanisme de dispersion de la paille. Par cette méthode, Shinnors et Binversie (2007) ont estimé qu'on pourra récolter les rafles, les spathes et 50% des feuilles et tiges supérieures. Si on applique cette estimation au cultivar N06-C1, une proportion entre 43 et 49% (3 à 4,5 t MS/ha) de toute la fibre disponible serait récoltable. Si on désire récolter une plus grande quantité de fibre, il faudra envisager d'autres opérations après le battage : par exemple, le broyage des tiges restées au sol et le râtelage subséquent au-dessus de l'andain déjà formé derrière la batteuse. Deux inconvénients majeurs sont le risque de

contamination des fibres déplacées latéralement au sol et le compactage du sol suite à l'augmentation du nombre de passages au champ. L'utilisation d'une faucheuse-andaineuse à disques au lieu d'un broyeur et d'un râteau permettrait de réduire les particules de sol mélangées à la fibre et de former l'andain en un seul passage au lieu de deux.

Shinners et al. (2007) et Birrel (2006) ont modifié des moissonneuses-batteuse pour tenter de combiner la récolte de la fibre et du grain. Ces moissonneuses sont munies d'un mécanisme qui broie et souffle les résidus de battage sous forme hachée vers une benne. Pour augmenter la quantité de résidus récoltée, ils ont testé un nez de fourragère qui récolte la plante entière. L'inconvénient majeur de ce système est un chantier de récolte imposant : la moissonneuse-batteuse suivie continuellement par un convoi tracteur-wagon pour le grain et un autre convoi tracteur-wagon pour la fibre hachée. De plus, la capacité de battage diminue proportionnellement à la quantité de fibre devant être traitée par la moissonneuse. Toutefois, un grand avantage est le fait que la fibre ne touche jamais au sol. Avant de se lancer dans la récolte des résidus de maïs, il est essentiel d'analyser chaque technique de récolte, les caractéristiques de la fibre désirée et le prix que le marché est prêt à déboursier. En bref, les paramètres importants à examiner sont la quantité et la teneur en eau de la fibre, la présence de contaminants, la capacité du chantier de récolte et ses coûts, le nombre d'opérateurs nécessaire, l'achat de nouvelles machines, le mode de transport et son coût jusqu'à l'utilisateur. Par ailleurs, le fait que le maïs-grain est récolté tard à l'automne dans des conditions de terrain généralement humides est un obstacle majeur à la récolte de la fibre au Canada et au Québec. Pour cette raison, il faut envisager le développement de machines novatrices pour la collecte de cette fibre.

Conclusions

Durant la période normale de récolte de maïs-grain (entre le 4 octobre et le 22 novembre), le rendement de grain a oscillé entre 8400 et 9700 kg MS/ha, avec des moyennes de 9018 kg MS/ha et de 8818 kg MS/ha pour deux cultivars particuliers (soit 10,5 et 10,3 t de grain à 14,5% de teneur en eau, respectivement).

Durant la même période, la masse totale de fibre a baissé graduellement entre un maximum de 8,9 et un minimum de 6,6 t MS/ha (moyenne 7,9 t MS/ha) pour un cultivar, et entre un maximum de 9,3 et un minimum de 8,3 t MS/ha (moyenne 8,8 t MS/ha) pour l'autre cultivar. Alors que la masse de grain était relativement constante, la masse de fibre diminuait de 10 à 20% sur une période de six semaines.

En pratique, on ne souhaite pas à récolter toute la fibre, mais seulement une fraction afin de laisser un couvert protecteur au sol pour l'hiver. La fibre au-dessus de l'épi, incluant la rafle et les spathes, représentait en moyenne entre 54 et 65% de la fibre totale selon le cultivar. La récolte de la fibre supérieure seulement représente une quantité qui variait entre 4 et 6 t MS/ha à une teneur en eau comprise entre 45 et 76%, surtout en fonction de la date de coupe. Pour une utilisation industrielle (granules énergétiques, biomatériau), la fibre devrait être récoltée à une teneur en eau relativement basse parce qu'elle doit être séchée artificiellement. Cela implique un intérêt à récolter tardivement, principalement la fibre au-dessus de l'épi plutôt que la fibre inférieure qui est plus humide et de considérer le fanage au champ, dans la mesure du possible.

Liste des ouvrages cités

- ASABE. 2007. Moisture measurement – forages. American Society of Agricultural and Biological Engineers, Standard S358.2. St. Joseph, MI: ASABE.
- Birrell, S. 2006. Iowa State researchers developing machinery to harvest corn stalks and leaves. Accédé au site : <http://www.public.iastate.edu/~nscentral/news/2006/dec/stover.shtml>
- Edens, W.C., L.O. Pordesimo and S. Sokhansanj. 2002. Field drying characteristics and mass relationships of corn stover fractions. ASAE Paper No. 026015. St. Joseph, MI: ASAE.
- Graham, R. L., R. Nelson, J. Sheehan, R. D. Perlack, and L. L. Wright. 2007. Current and Potential U.S. Corn Stover Supplies. *Agron. J.* 99:1–11.
- Le Bulletin des agriculteurs. 2007. Superficie record de maïs-grais enssemencée au Québec. Accédé au site : <http://www.lebulletin.com/informations/actualite/>
- Pordesimo, L. O., B.R. Hames, S. Sokhansanj and W.C. Edens. 2005. Variation in corn stover composition and energy content with crop maturity. *Biomass and Bioenergy* 28(4): 366-374.
- Pordesimo, L. O., W. C. Edens and S. Sokhansanj. 2004. Distribution of aboveground biomass in corn stover. *Biomass and Bioenergy* 26(4): 337-343.
- Savoie, P. and Descôteaux, S. 2004. Artificial drying of corn stover in mid-size bales. *Canadian Biosystems Engineering/Le génie des biosystèmes au Canada* 46: 2.25-2.34.
- Shinners, K. J., G. S. Adsit, B. N. Binversie, M. F. Digman, R. E. Muck, and P. J. Weimer. 2007. Single-pass, split-stream harvest of corn grain and stover. *Transactions of the ASABE* 50(2): 355–363.
- Shinners, K. J. and B. N. Binversie. 2007. Fractional yield and moisture of corn stover biomass produced in the Northern US Corn Belt. *Biomass and Bioenergy* 31(6): 576-584.
- Shinners, K.J., B.N. Binversie and P. Savoie. 2003. Harvest and storage of wet and dry corn stover as a biomass feedstock. ASAE Paper No. 036088. St. Joseph, MI: ASAE.
- Sokhansanj, S., S. Mani, M. Stumborg, R. Samson and J. Fenton. 2006. Production and distribution of cereal straw on the Canadian prairies. *Canadian Biosystems Engineering / Le génie des biosystèmes au Canada* 48: 3.39-3.46.
- Statistique Canada. 2007. Grandes cultures et cultures spéciales (Superficie enssemencée). Accédé au site http://www40.statcan.ca/102/cst01/prim11a_f.htm
- Wilhelm, W. W., Johnson, J. M. F., Hatfield, J. L., Voorhees, W. B., and Linden, D. R. 2004. Crop and soil productivity response to corn residue removal: A literature review. *Agron. J.* 96, 1-17.

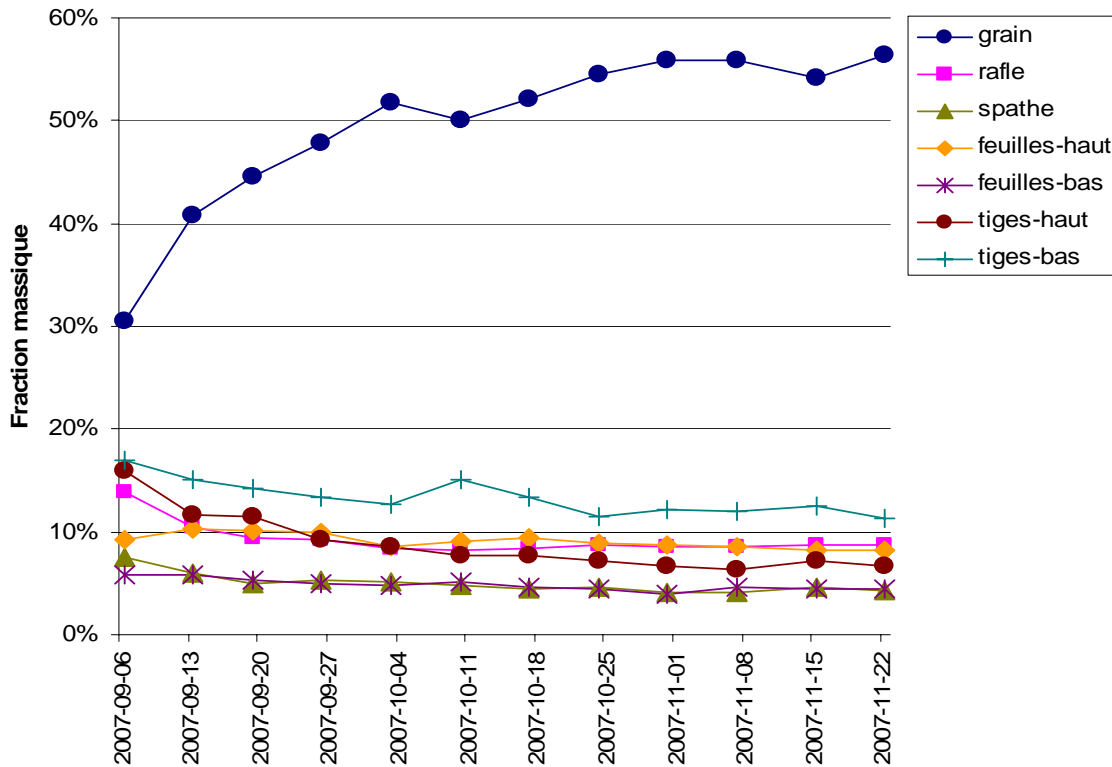


Figure 1. Évolution des fractions de maïs pour le cultivar N06-C1 (2300 UTM) à Deschambault.

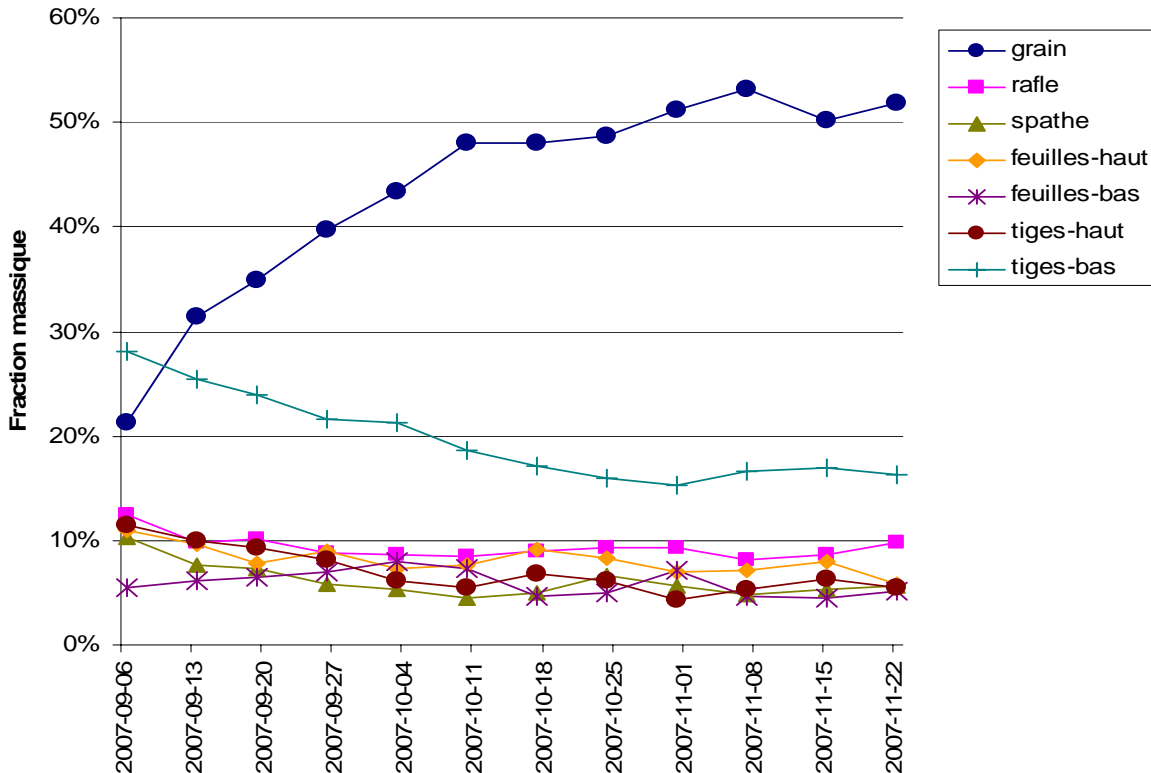


Figure 2. Évolution des fractions de maïs pour le cultivar N16-N7 (2600 UTM) à Deschambault.

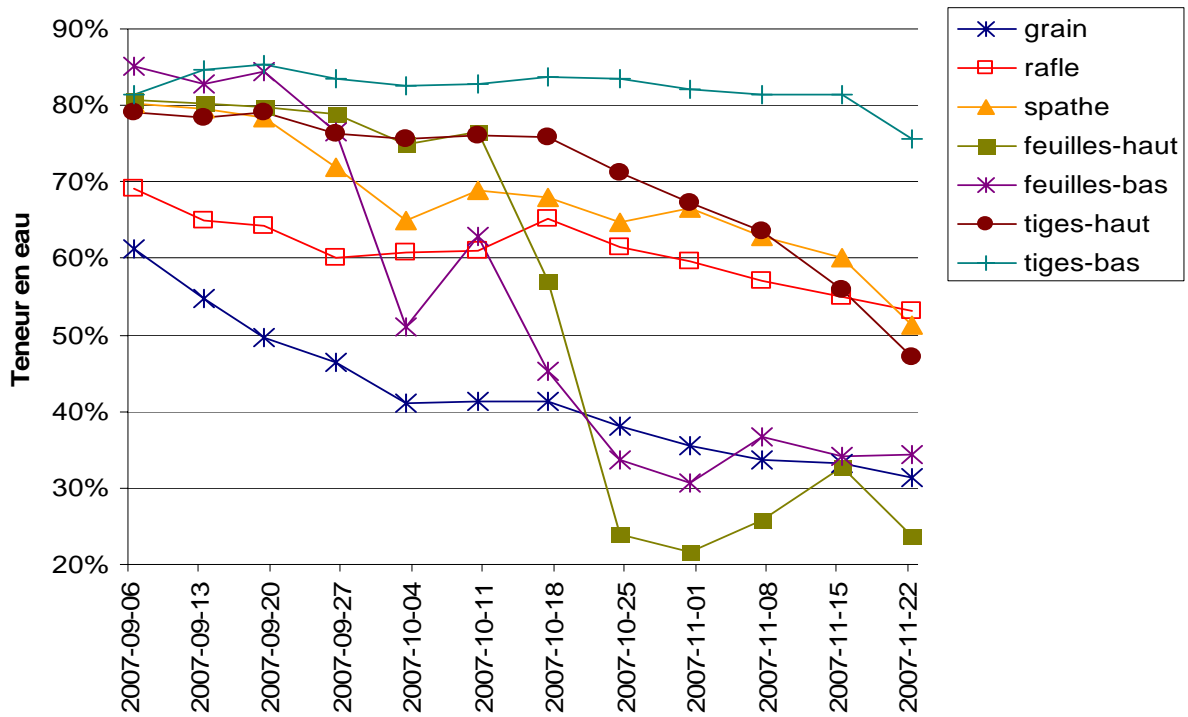


Figure 3. Évolution de la teneur en eau des fractions de maïs du cultivar N06-C1.

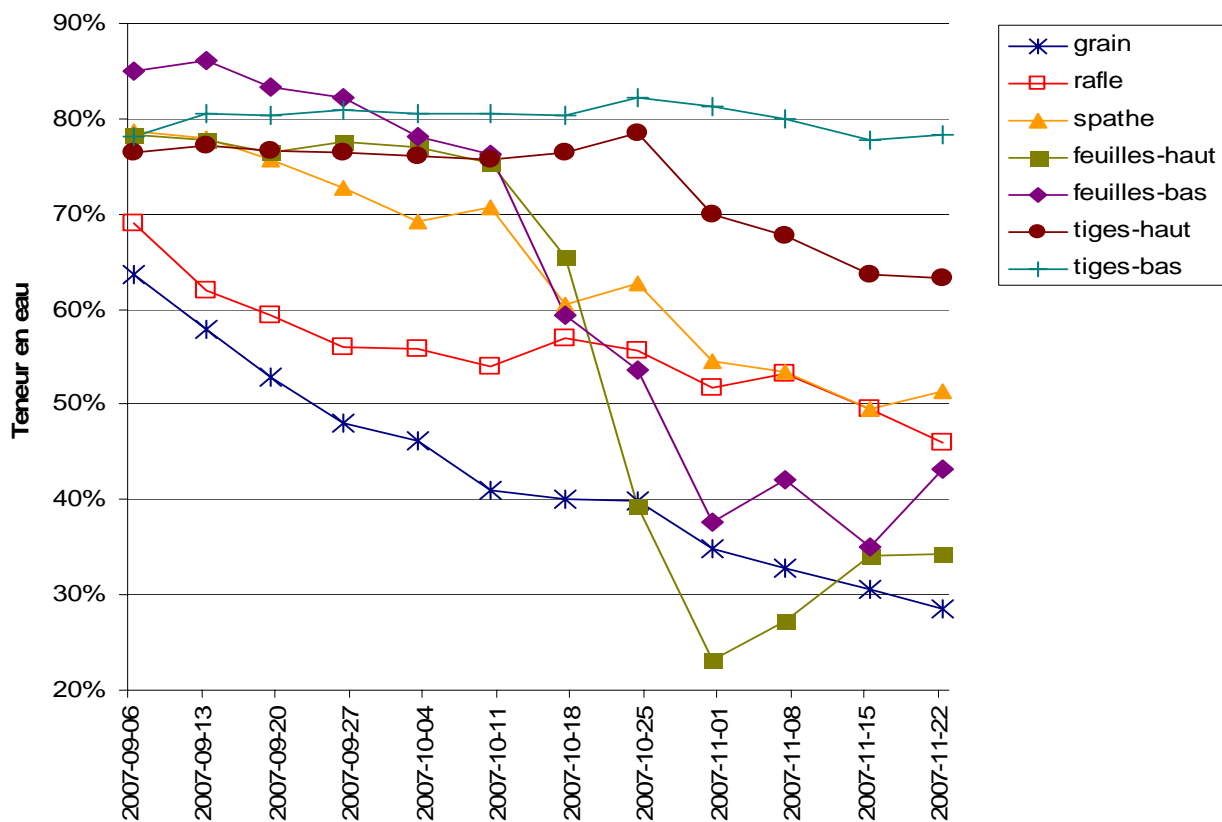


Figure 4. Évolution de la teneur en eau des fractions de maïs du cultivar N16-N7.

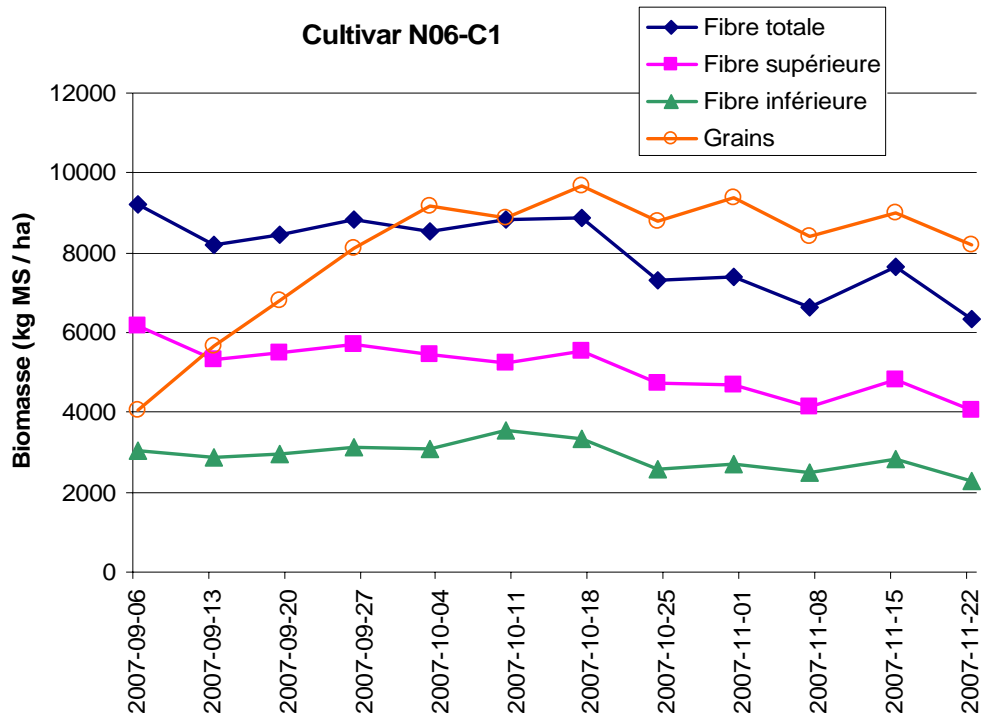


Figure 5. Masse sèche de grain, de fibre inférieure (sous l'épi) et de fibre supérieure (au-dessus de l'épi, incluant la rafle et les spathes) récoltée selon la date pour le cultivar N06-C1.

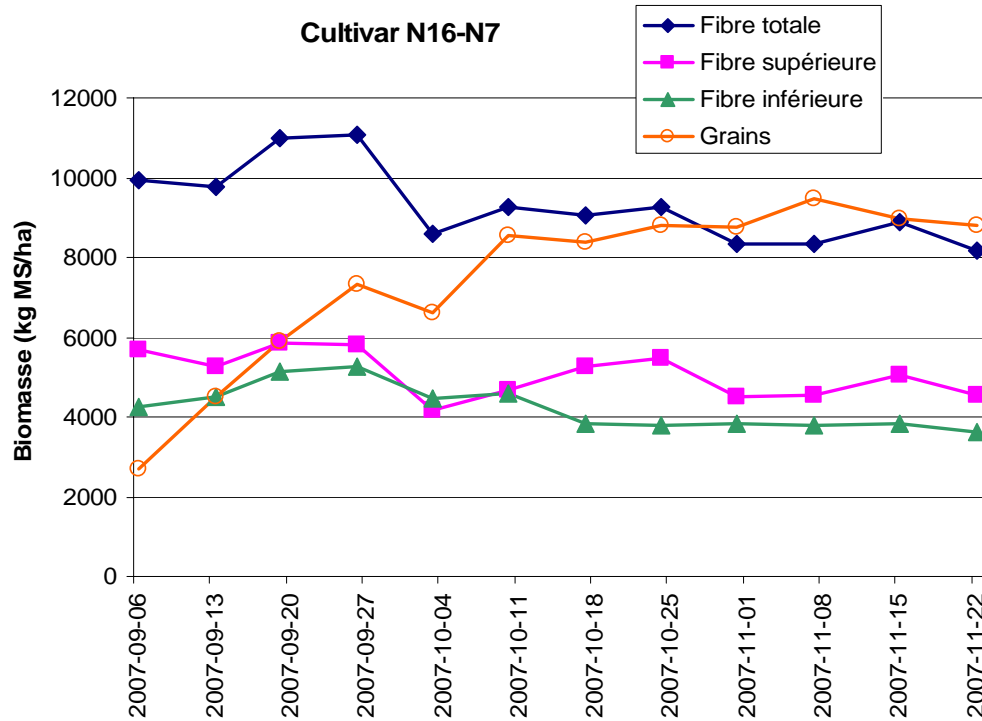


Figure 6. Masse sèche de grain, de fibre inférieure (sous l'épi) et de fibre supérieure (au-dessus de l'épi, incluant la rafle et les spathes) récoltée selon la date pour le cultivar N16-N7.

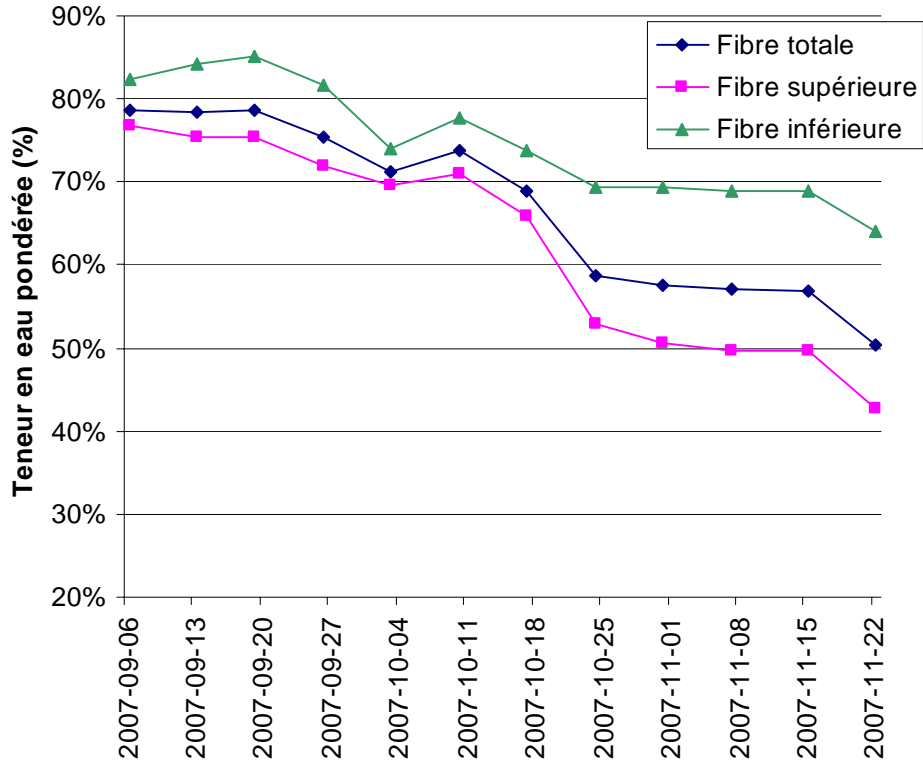


Figure 7. Simulation de la teneur en eau de la fibre récoltée pour le cultivar N06-C1.

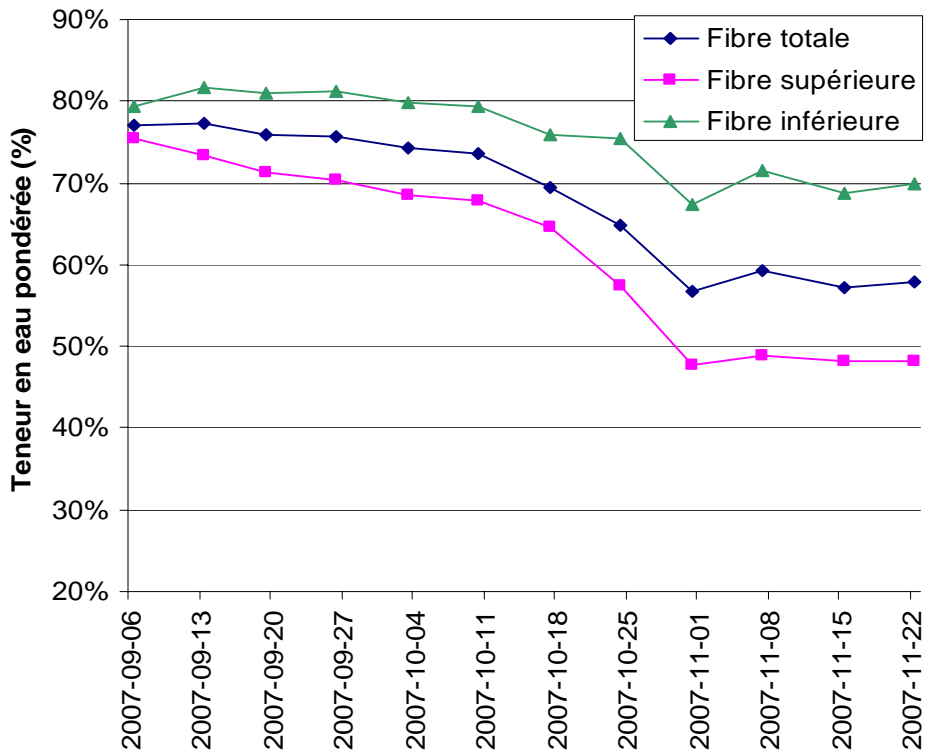


Figure 8. Simulation de la teneur en eau de la fibre récoltée pour le cultivar N16-N7.