



DEMI-JOURNÉE D'INFORMATION SCIENTIFIQUE SUR LES FOURRAGES

Mardi, le 20 février 2007

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 reproduits, en tout ou en partie, sans le consentement préalable des auteurs. Ce document est également disponible sur le site d'Agri-Réseau (www.agrireseau.qc.ca).

AVANT-PROPOS

Le contexte économique et environnemental dans lequel s'insère la production des plantes fourragères évolue de plus en plus rapidement. La production fourragère fait face non seulement à des contraintes telles la diminution des superficies ou les risques associés au climat mais également à de nouvelles opportunités liées à leur contribution à la durabilité de l'agriculture et aux besoins croissants de nos sociétés en bioressources. La recherche réalisée en concertation avec l'industrie est aujourd'hui un objectif non seulement souhaitable mais plus que jamais essentiel pour mettre à profit le plein potentiel des plantes fourragères.

En 1990, le Comité des plantes fourragères lançait l'idée d'une journée d'information scientifique sur les fourrages dans le but de rapprocher les chercheurs, les vulgarisateurs et les représentants de l'industrie. Dès le départ, la réponse à cette initiative a été très enthousiaste et ce forum d'échange de connaissances a été depuis repris sur une base quasi-annuelle. Au fil des ans, le concept a évolué en des rencontres d'une demi-journée tenues en collaboration avec le Conseil Québécois des Plantes Fourragères (CQPF) tout en maintenant l'objectif initial de fournir le meilleur portrait de la recherche actuelle sur les fourrages et de son impact sur l'industrie.

Nous sommes heureux de vous présenter les comptes-rendus des conférences de la quinzième édition de la demi-journée d'information scientifique sur les fourrages. Vous y trouverez des textes qui résument les présentations de sept conférences sur des travaux qui se situent à l'avant-garde du domaine tant au niveau des nouvelles connaissances que des applications qui en découlent. On y traite, entre autres, d'une nouvelle approche de modélisation pour l'estimation des pertes liées au climat en production fourragère, de la contribution des plantes fourragères à la durabilité agro-environnementale du secteur laitier québécois et des résultats de plusieurs autres travaux de recherche portant sur la production, la conservation et la valeur nutritive des plantes fourragères. Nous vous souhaitons une excellente lecture qui, nous sommes convaincus, vous permettra de constater cette année encore le dynamisme de la recherche effectuée au Québec sur cette importante ressource agricole.

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

TABLE DES MATIÈRES

1-	Effet du climat sur les plantes fourragères au Québec: Estimation des pertes de rendement par la modélisation. <u>Isabelle Duchesne</u>	3
2-	Mélanges trèfle rouge–graminées. <u>Raynald Drapeau</u>	6
3-	Mesure électronique de la teneur en eau des fourrages: précision et répétabilité. <u>Étienne Cormier</u>	11
4-	Le séchage du fourrage haché en vrac avec un apport d'énergie solaire. <u>René Morissette</u>	19
5-	Évaluation de la durabilité agro-environnementale des fermes laitières québécoises. <u>Valérie Bélanger</u>	27
6-	DACA et teneur en cadmium de graminées fourragères fertilisées au chlore. <u>Sophie Pelletier</u>	31
7-	Effet de l'inoculation avec <i>Fusarium graminearum</i> et de l'étanchéité des silos sur la production de mycotoxines et sur l'efficacité des additifs à ensilage dans le maïs épi humide. <u>André Amyot</u> ¹	36

L'effet du climat sur les plantes fourragères au Québec : Estimation des pertes de rendement par modélisation

Isabelle Duchesne-Ortiz¹, Louis Martel¹, Gilles Bélanger² et Guy Allard³

¹La Financière agricole du Québec, 1400 boul. de la Rive-Sud, 2e, St-Romuald, (Québec), G6W 8K7, isabelle.duchesne@fadq.qc.ca louis.martel@fadq.qc.ca

² Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2560, boul. Hochelaga, Québec, (Québec) G1V 2J3,
belangergf@agr.gc.ca

³Faculté des Sciences de l'Agriculture et de l'Alimentation, 1120-D, Pav. Paul-Comtois,
Université Laval, (Québec) G1K 7P4, guy.allard@fsaa.ulaval.ca

La production de plantes fourragères s'effectue sur plus de 50% des terres agricoles du Québec. Pour La Financière agricole du Québec, la protection d'assurance récolte destinée aux plantes fourragères pérennes représente 25 % de toutes les valeurs assurées en assurance récolte. Depuis quelques années, La Financière agricole a entrepris une réforme de cette protection d'assurance récolte donnant ainsi place au présent projet.

Objectifs

Le souci de La Financière agricole est d'estimer les pertes en fourrage de ses assurés selon leur réalité. Pour répondre à ce besoin, des travaux de recherche ont été entrepris. Ils utilisent la modélisation des relations plantes-environnement, plus particulièrement celle qui vise à décrire la relation existant entre une variable dépendante, comme le rendement, et des variables indépendantes, comme la pluie et la température (France et Thornley, 1984). L'Ontario utilise déjà la modélisation pour sa protection d'assurance récolte liée aux fourrages, soit le modèle SIMFOY développé à partir des travaux de Selirio et Brown (1979).

Ainsi la présente étude a pour but d'estimer le rendement des plantes fourragères à l'aide d'un modèle empirique qui est composé de variables agronomiques et bioclimatiques. La perte ou le gain de rendement pourra alors être établi en comparant le rendement estimé par le modèle à un rendement de référence basé sur la capacité de production démontrée historiquement.

Méthodologie

Le Québec agricole a été découpé en zones puisqu'il comporte une topographie et une hydrographie très variées où s'observent des différences climatiques non seulement du nord au sud, mais également d'est en ouest. Ainsi, le territoire agricole a été fractionné en 12 zones thermiques dans lesquelles étaient contenues les unités expérimentales, c'est-à-dire les stations climatologiques. Les informations nécessaires à la création du modèle ont été recueillies de façon répétée entre 1998 et 2005 dans chacune des stations.

Pour construire la base de données climatologiques, les températures minimale et maximale, les précipitations en pluie et en neige et la couverture de neige au sol, et ce, sur une base quotidienne

ont été compilées pour chaque station climatologique. Par la suite, le choix des variables bioclimatiques à introduire dans le modèle a été précisé selon la description qui en était faite dans la littérature (Rochette, 1988; De Jong et Stewart, 1993; Brière et al., 1999; Bélanger et al., 2002). L'objectif était d'avoir des variables bioclimatiques qui caractérisaient toute l'année puisque toutes les saisons, incluant l'hiver, influencent les rendements des plantes fourragères pérennes.

D'autre part, l'information agronomique provenait de producteurs de plantes fourragères qui sont associés à chacune des stations climatologiques, en autant qu'un minimum de 50 % de leurs superficies en production soient situées à 20 km ou moins d'une station climatologique. Les variables agronomiques utilisées ont été l'espèce fourragère vivace (légumineuse ou graminée), la texture du sol (grossière ou moyenne-fine) et le nombre de coupes effectuées (1, 2 ou 3).

De cette même base de données agronomiques, nous avons extrait la variable dépendante soit le rendement fourrager saisonnier, rendement qui se retrouve donc associé à chaque station climatologique. Ce rendement a été calculé comme suit :

Rendement = $\frac{\text{fourrages récoltés sur l'ensemble de la saison (kg, cumul des fauches)}}{\text{superficies totales cultivées (ha, cumul des fauches)}}$

Pour des fins de modélisation, un modèle linéaire a été construit de telle sorte que le rendement en fourrage était estimé en utilisant l'effet fixe des variables agronomiques et l'effet aléatoire des variables bioclimatiques. De plus, les mesures étaient répétées dans le temps, donc d'année en année. En conséquence, une procédure statistique disponible dans SAS, PROC MIXED, était l'outil le plus approprié pour développer un modèle qui s'adapte à la base de données à modéliser (Littell et al. 1996).

Par la suite, des statistiques descriptives portant sur la différence existant entre le rendement des fourrages mesuré et le rendement estimé par le modèle ont été utilisées pour apprécier la performance du modèle (Yang et al., 2000; Tedeschi, 2006). Les statistiques utilisées étaient les suivantes : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur moyenne et l'efficacité du modèle en pourcentage. L'efficacité est une statistique qui permet d'apprecier la qualité de l'ajustement de la valeur mesurée (Y) et de l'estimation du modèle (X). Si $Y = X$, cela signifie que l'ajustement du modèle est parfait (efficacité = 100 %). En quelque sorte, l'efficacité peut parfois être considérée comme un équivalent du coefficient de détermination (R^2).

Résultats

Le modèle développé à partir des données recueillies dans un rayon de 20 km autour d'une station a, en moyenne pour les douze zones thermiques, une efficacité de 63 %. De plus, l'erreur moyenne indique que le modèle surestime en moyenne de 0,15 % le rendement mesuré ce qui représente un faible biais. Finalement, le RMSE ou erreur de prédiction est égal à 267 kg/ha soit

10% de la moyenne des rendements. Cette valeur se compare avantageusement à celle obtenue par le modèle mécaniste de Bonesmo et Bélanger (2002) pour l'est du Canada, où le RMSE du rendement printanier était égal à 658 kg/ha, soit 19% de la moyenne des rendements.

L'analyse et l'interprétation du modèle obtenu dans les 12 zones thermiques sont toujours en cours. Afin de valider notre modèle, des simulations sont prévues en utilisant une base de données externe à celle ayant servi à construire le modèle. Les données agronomiques et climatiques recueillies en 2006 seront utilisées à cette fin.

Conclusions

Le modèle empirique développé permet de décrire la relation existant entre le rendement des plantes fourragères et son environnement, c'est-à-dire la régie de culture et le climat, et ce, pour douze zones thermiques du Québec agricole. De plus, le concept innovateur développé dans l'étude permet d'obtenir un modèle dont l'efficacité, la précision et l'exactitude statistique sont suffisamment fiables pour permettre à La Financière agricole d'utiliser confortablement ce modèle dans sa nouvelle protection d'assurance récolte destinée aux plantes fourragères pérennes.

Références bibliographiques

- Bélanger, G., P. Rochette, Y. Castonguay, A. Bootsma, D. Mongrain et D.A.J. Ryan, 2002.
Climate change and winter survival of perennial forage crops in Eastern Canada. Agron. J. 94 : 1120-1130.
- Bonesmo, H. et G. Bélanger, 2002. Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model : I. Growth and nitrogen. Agron. J. 94 : 337-345.
- Brière, J.F., P. Pracros, A.Y. Le Roux et J.S. Pierre. 1999. A novel rate model of temperature-dependent development for arthropods. Environ. Entomol. 28: 22-29.
- De Jong, R. et D.W. Stewart, 1993. Estimating global solar radiation from common meteorological observations in western Canada. Can. J. Plant Sci. 73: 509-518.
- France, J. et J.H.M. Thornley, 1984. Mathematical models in agriculture. Butterworth & Co. Kent, UK, pp. 335.
- Littell, R., G.A., Milliken, W.W. Stroup et R.D. Wolfinger, 1996. SAS System for mixed models SAS Institute Inc. Cary. NC. 633 pages.
- Rochette, P., 1988. Contribution au zonage agroclimatique du Québec méridional. Thèse de doctorat. Université Laval. Québec. 272 pages.
- Selirio I.S. et D.M. Brown, 1979. Soil moisture-based simulation of forage yield. Agr. Meteorol. 20 : 99-114.
- Tedeschi, L.O., 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models. Agr. Syst, 89: 225-247.
- Yang, J., D.J. Greenwood, D.L. Rowell, G.A. Wadsworth et I.G. Burns, 2000. Statistical methods for evaluating a crop nitrogen simulation model, N_ABLE. Agr. Syst. 64: 37-53.

Mélanges trèfle rouge/graminées

Raynald Drapeau¹ et Carole Lafrenière²

¹Agriculture et Agroalimentaire Canada, Normandin. (drapeaur@agr.gc.ca)

²Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ferme de recherche sur le Bovin de Boucherie, Kapuskasing. (carole.lafreniere@uqat.ca)

Introduction

Le maintien de la fraction légumineuse dans les associations légumineuses/graminées est un enjeu important pour l'obtention des fourrages de qualité puisque la légumineuse peut fournir une bonne partie de l'azote nécessaire à la productivité des graminées. Les associations luzerne/graminées permettent l'obtention de rendements meilleurs que les associations trèfle rouge/graminées. Toutefois, le trèfle rouge est encore très utilisé parce qu'il tolère mieux les sols humides, bas en fertilité ou acides (Smith *et al.* 1985). Lorsqu'il est ensilé, le trèfle rouge est moins sensible à la protéolyse et les performances zootechniques peuvent être équivalentes à celles de la luzerne quant à l'utilisation de l'azote (Broderick *et al.* 2001). Par ailleurs, le trèfle rouge est une plante vivace qui, sous les conditions du Québec, se comporte comme une bisannuelle. Il y a donc un intérêt à étudier les associations trèfle rouge/graminées avec un objectif d'augmenter leur contribution au rendement sur une période dépassant deux années de production.

La littérature rapporte que la graminée associée et les modes de semis peuvent influencer la contribution du trèfle rouge au rendement. Les objectifs de cet essai étaient donc de déterminer l'espèce de graminée la plus appropriée et le mode de semis pour des associations binaires trèfle rouge /graminées afin d'augmenter la contribution de la durée de vie du trèfle rouge tout en assurant un rendement adéquat et une bonne valeur nutritive pour les ruminants.

Matériel et méthodes

Des parcelles ont été établies à Normandin et à Kapuskasing. Les cultivars de fléole des prés Champ, de brome inerme Baylor, de dactyle Kay et de fétuque élevée Courtenay ont été ensemencés en association avec le trèfle rouge AC Charlie selon des doses respectives de 7,10,9,10 et 7 kg/ha et selon trois modes de semis : 1) la graminée et la légumineuse sur le même rang (MR), la graminée semée en rang alterné simple avec la légumineuse (1+1), la graminée et la légumineuse en rangs alternés doubles (2+2). Deux semis ont été réalisés (1995 et 1996). La fertilisation lors du semis et des années de production a été établie en fonction des analyses de sol et des recommandations de fertilisation des plantes fourragères du CRAAQ.

Deux récoltes ont été prélevées à chacune des années de production lorsque le trèfle rouge était au stade de maturité 10 à 50 % en fleurs. À chacune des récoltes, un quadrat de 0,25 m² a été prélevé pour établir la contribution des espèces au rendement. Les rendements, la teneur en matière sèche, la protéine brute, la fibre ADF ont été déterminés sur chacune des parcelles. Un

arrangement factoriel de 12 traitements (4 graminées associées au trèfle rouge x 3 modes de semis) en blocs complets répétés quatre fois a été utilisé à chacun des sites. Les résultats sont présentés par site pour chacune des années de production.

Résultats

Modes de semis

Dans les peuplements, le trèfle rouge n'a pas dépassé deux années confirmant ainsi les résultats obtenus par Darisso et Drapeau (1982). Lors de la première année de production, la contribution au rendement du trèfle rouge a varié de 59 à 66 % selon les sites et il n'y a pas eu d'effet significatif des modes de semis (Tableau 1A). Dès la deuxième année, la contribution du trèfle rouge au rendement a chuté et ce, de façon plus importante à Kapuskasing qu'à Normandin. L'envahissement des mauvaises herbes tel qu'exprimé indirectement par la contribution au rendement du trèfle rouge additionné de la graminée a augmenté graduellement avec les années à Normandin mais pas à Kapuskasing. L'effet a été moins important pour le semis MR. Cet effet est probablement relié au fait d'une meilleure occupation spatiale de la graminée après la disparition de la légumineuse.

Les rendements annuels du semis MR ont toujours été supérieurs aux modes 1+1 ou 2+2 et ce, à chacun des sites sauf la première année à Kapuskasing (Tableau 1A). Les modes de semis en rangs alternés ont donné les mêmes résultats à Normandin, ce qui n'a pas été le cas à Kapuskasing (Tableau 1A). Aux deux sites, malgré une faible présence du trèfle rouge en troisième année de production, les rendements des semis MR ont été supérieurs (Tableau 1A).

Les modes de semis n'ont pas eu d'effet sur les facteurs de qualité (teneur en protéines et ADF), bien que des différences aient été observées à Kapuskasing en deuxième et troisième année de production (Tableau 1A). Il est généralement admis que lorsque les rendements sont plus faibles, la valeur nutritive est plus élevée (Drapeau *et al.* 2005), ce qui pourrait expliquer les résultats obtenus à Kapuskasing mais pas à Normandin. Toutefois, les écarts de rendements ont été plus faibles à Normandin qu'à Kapuskasing (Tableau 1A).

Graminée associée au trèfle rouge

Au site de Kapuskasing, à la première année de production, la contribution du trèfle rouge au rendement a été la même pour toutes les graminées associées et a varié de 58 à 62,3 % (Tableau 1B). Ces observations indiquent une absence de compétitivité entre les graminées et le trèfle rouge. Au site de Normandin, toujours en première année de production, ce sont le brome inerme et la fléole des prés qui ont permis au trèfle rouge d'avoir les meilleures contributions au rendement, le dactyle la plus faible et la fétuque élevée, une contribution intermédiaire (Tableau 1B). Les observations à Normandin sont en accord avec la compétitivité des espèces de graminées rapportée par le CRAAQ (2005).

En deuxième année de production, la contribution du trèfle rouge au rendement a diminué de façon importante aux deux sites. À Kapuskasing, c'est le brome inerme qui a permis de conserver la meilleure contribution au rendement du trèfle rouge avec 37,4 % alors qu'à Normandin, toutes

les graminées ont donné sensiblement les mêmes résultats, à l'exception du dactyle qui n'a pas permis au trèfle rouge de dépasser 23,8 % (Tableau 1B). À Kapuskasing, la disparition du trèfle rouge a été compensée par les graminées avec une contribution de 75 % et plus à l'exception du brome inerme, tandis qu'à Normandin, bien que la fléole des prés et le brome inerme aient doublé leur contribution au rendement, ce sont le dactyle et la fétuque élevée qui ont présenté les plus fortes contributions (Tableau 1B). En troisième année de production, il n'y avait plus de trèfle rouge dans les parcelles à Kapuskasing. À Normandin, seule la fétuque élevée permettait encore au trèfle rouge de contribuer à près de 20 % du rendement (Tableau 1B).

Le rendement annuel de la fétuque élevée associée au trèfle rouge a été plus élevé à chacune des années tant à Kapuskasing qu'à Normandin, à l'exception de la 1^{ère} année à Kapuskasing où toutes les graminées associées au trèfle rouge ont donné des rendements similaires (Tableau 1B). Les rendements des associations du trèfle rouge avec le brome inerme ou la fléole des prés ont généralement été du même ordre de grandeur pour un même site sauf pour la 2^{ième} année de production à Kapuskasing et la 1^{ère} année de production à Normandin. Les rendements de l'association du trèfle rouge avec le dactyle ont été significativement plus faibles à chacune des années de production à Normandin, tandis qu'à Kapuskasing, les rendements de cette association ont été les moins élevés en 2^{ième} et 3^{ième} année de production (Tableau 1B).

Le fourrage des différentes associations avait une bonne valeur nutritive à chacun des sites. Au site de Kapuskasing, la fibre ADF n'a pas varié avec la graminée associée sauf en deuxième année de production où les associations trèfle rouge/brome inerme et trèfle rouge/fétuque élevée ont présenté des valeurs inférieures à 300 g kg⁻¹ MS, alors que pour les autres associations, elles ont été de l'ordre de 300-310 g kg⁻¹ MS (Tableau 1B). Pour les teneurs en protéines brutes, lorsqu'il y a eu des différences entre les associations, c'est l'association du trèfle rouge avec le brome inerme qui a permis d'obtenir les teneurs les plus élevées avec 153 et 149 g kg⁻¹ MS respectivement pour la première et deuxième année de production. Au site de Normandin, les associations ont présenté des différences à chacune des années de production. Toutefois, la fibre ADF de l'association trèfle rouge/dactyle a été significativement la plus élevée avec 325 et 314 g kg⁻¹ MS en première et deuxième année de production. De façon générale, la protéine brute a été en ordre décroissant : brome inerme= fléole des prés > fétuque élevée > dactyle. La récolte des parcelles a été faite en fonction du stade du trèfle rouge. Les différences de valeurs nutritives entre les associations reflètent donc la maturité physiologique des graminées. C'est ce qui a été observé à Normandin mais pas à Kapuskasing.

Conclusions

- Un semis sur le même rang pour les associations trèfle rouge/graminées permet d'obtenir les meilleurs rendements et une bonne valeur nutritive.
- La fétuque élevée peut très bien s'inscrire dans les systèmes fourragers à base de trèfle rouge.
- Ni les modes de semis, ni les principales espèces de graminées tempérées cultivées au Québec n'ont permis d'augmenter la persistance du trèfle rouge au-delà de deux années de production dans les conditions des essais.

Références bibliographiques

- Broderick, G.A., Walgenbach, G.H., Russelle, M.P. 2001. Production of lactating dairy cows fed alfalfa or red clover silage at equal dry matter or crude protein contents in the diet. *J. Dairy Sci.* 84: 1728-1737.
- Darisson, F., Drapeau, R. 1982. Étude de l'effet de la luzerne ou du trèfle rouge associé au brome ou à la fléole des prés sur la production d'herbage au Lac St-Jean. *Can. J. Plant Sci.* 62 : 929-934.
- Drapeau, R., Bélanger, G., Tremblay, G.F., Michaud, R. 2005. Rendement et valeur nutritive de la fétuque élevée cultivée en régions à faible degrés-jours de croissance. *Can. J. Plant Sci.* 85 : 369-376.
- Smith, R.R., Taylor, N.L., Bowley, S.R. 1985. Red Clover. P. 457-470. *In* N.L.Taylor (ed.) *Clover science and technology*. Agro. Monogr. 25. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI

Tableau 1A et 1B. Effet des modes de semis (**1A**) et des graminées associées (**1B**) au trèfle rouge sur le rendement annuel, la fibre ADF, la teneur en protéines brutes et la contribution des espèces au rendement pour des associations binaires trèfle rouge/graminée au cours de trois années de production à deux sites.

1A	Mode de semis	Rendement annuel			ADF			Protéines brutes			Contribution des espèces au rendement en %											
		Mg MS ha ⁻¹			g kg ⁻¹ MS			g kg ⁻¹ MS			Trèfle rouge		Graminées		Trèfle rouge		Graminées		Trèfle rouge		Graminées	
		AP1 ^w	AP2	AP3	AP1	AP2	AP3	AP1	AP2	AP3	AP1	AP2	AP3	AP1	AP2	AP3	AP1	AP2	AP3			
Kapuskasing	1+1 ^y	7.1	5.8b	6.5b	300	297ab	334a	146	137b	130b	59.1	39.6	19.9	75.5	dm ^x	dm						
	2+2	7.3	5.2c	6.1b	299	287b	311b	146	147a	141a	59.9	38.7	21.8	73.0	dm	dm						
	MR	7.4	6.4a	7.4a	300	310a	339a	146	120c	125c	60.6	38.3	27.4	68.9	dm	dm						
Normandin	1+1	6.3b ^v	5.4b	5.0b	303	292	289	170ab	161	144	62.4	31.4	26.9b	58.3	9.5	54.1b						
	2+2	6.2b	5.5b	4.9b	309	292	289	164b	159	145	62.6	30.7	27.4b	55.7	9.3	51.2b						
	MR	6.3a	5.9a	5.3a	301	286	288	174a	165	148	65.7	30.6	35.8a	53.9	12.1	61.7a						
1B	Graminées	AP1	AP2	AP3	AP1	AP2	AP3	AP1	AP2	AP3	AP1		AP2		AP3							
	Kapuskasing																					
	Brome inerme	7.1	5.5c	6.6b	296	285b	331	153a	149a	132	59.4	39.4	37.4a	56.4b	dm	dm						
Normandin	Fétuque élevée	7.7	6.4a	7.3a	301	296ab	323	142b	132b	131	58.0	41.2	18.8b	77.0a	dm	dm						
	Dactyle	7.2	5.4c	6.0b	305	304a	333	142b	137b	134	62.3	37.0	15.3b	81.8a	dm	dm						
	Fléole des prés	7.1	5.9b	6.5b	296	309a	327	148ab	133b	132	59.7	38.1	20.6b	74.7a	dm	dm						
	Brome inerme	6.2c	5.7b	5.2b	294b	275c	292a	178a	172a	144	70.5a	23.3c	32.8a	44.4b	7.2b	50.6b						
	Fétuque élevée	6.8	6.1a	5.7a	304b	293b	296a	170b	158b	145	60.3b	35.2b	31.9a	61.0a	19.2a	63.2a						
	Dactyle	6.0c	5.2c	4.4c	325a	314a	296a	151c	147c	145	52.8c	42.4ab	23.8b	67.3a	7.7b	62.4a						
	Fléole des prés	6.4b	5.5bc	5.1b	294b	276c	271b	177a	168a	149	70.8a	22.6c	31.5a	51.1b	7.2b	46.6b						

^w AP = Année de production.

^y 1+1= 1 rang de légumineuse et 1 rang de graminée; 2+2 = 2 rangs de légumineuse et 2 rangs de graminée; MR = semence mélangée sur le même rang.

^x dm = données manquantes.

^v Les moyennes suivies par une lettre différente dans une colonne sont significativement différentes à un niveau de $\alpha = 0.05$.

Mesure électronique de la teneur en eau des fourrages: exactitude et constance

Étienne Cormier¹, Hugues Joannis² et Philippe Savoie²

¹Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Québec G1K 7P4

²Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 boul. Hochelaga, Québec (QC) G1V 2J3

Résumé

Quatre capteurs électroniques commerciaux ont été évalués pour leur exactitude et leur constance à prédire la teneur en eau (TEE) du foin, dans la plage de 10 à 40%. La constance a été estimée par la variation entre plusieurs mesures dans des conditions théoriquement identiques (8 mesures systématiques dans 48 volumes de foin différents). Le foin avait une variation intrinsèque de la TEE de référence (séchage à l'étuve à 103°C); l'écart-type (ET) moyen était de 1,36%. L'ET du foin croissait de 0,5% à basse TEE jusqu'à 2,6% à TEE élevée. Les quatre sondes évaluées avaient des ET moyens entre 1,8 et 3,1%. Lorsque comparées avec la TEE de référence, les mesures électroniques avaient des déviations moyennes entre 0,6 et 6,4%. La masse volumique à deux niveaux (90 et 180 kg MS/m³) avait un effet important sur la prédiction de la TEE et devrait être prise en compte. Même après un étalonnage avec des courbes de régression, les mesures électroniques permettaient d'estimer la TEE réelle avec des intervalles de confiance variant entre $\pm 3,4$ et $\pm 5,3\%$, avec une probabilité de 95%. Ces appareils donnent une idée de la TEE et peuvent guider dans la prise de décision concernant la conservation, mais ils ne peuvent remplacer la mesure de la TEE à l'étuve.

Introduction

Une mesure précise et rapide de la teneur en eau (TEE) des fourrages revêt une grande importance en agriculture. Dans un premier temps lors de la récolte, la précision permet d'améliorer la conservation des fourrages. En effet, un ensilage trop humide pourra mal fermenter et produire divers inhibiteurs en alimentation animale (acide butyrique, acide acétique, etc.). Un foin trop humide pourra moisir et produire des toxines. Dans un deuxième temps lors de l'alimentation des animaux, une mesure précise est également nécessaire pour bien mélanger les divers ingrédients (fourrages, grains, tourteaux, minéraux, etc.) sur une base sèche ; une erreur d'estimation de la teneur en eau produira des rations mal équilibrées au point de vue protéique et énergétique, et peut réduire l'efficacité de la production animale.

Un projet de recherche a été mis sur pied pour améliorer la précision et la rapidité des mesures de la teneur en eau, particulièrement pour le foin destiné au séchage artificiel et à la commercialisation. Des techniques de séchage artificiel ont été mises au point récemment afin de faciliter la production de foin de haute qualité (Inventagri 2005 ; Descôteaux et Savoie 2006; Savoie et Joannis 2006). Toutefois, la mesure précise, instantanée et à un coût abordable de la teneur en eau pose encore un défi énorme. La mesure normalisée est toujours le séchage à l'étuve durant 24 ou 72 heures (ASABE 2006) mais divers fabricants d'instruments électroniques proposent des sondes pour estimer la teneur en eau instantanément ou très rapidement. Des mesures précises et rapides de la teneur en eau permettraient d'améliorer l'efficacité du séchage

artificiel. Grâce à ces données, un système de contrôle automatisé pourrait déterminer de façon continue les conditions optimales d'opération comme la température de l'air de chauffage, la proportion de re-circulation de l'air de sortie, la direction du flux d'air et une période de refroidissement en fin de séchage. Un tel système de mesure pourrait minimiser le coût de séchage tout en évitant le sur-séchage du foin.

L'expérience rapportée ici avait pour but de comparer quatre capteurs commerciaux au niveau de la précision des lectures. Il s'agit d'une première étape vers la réalisation d'un système permettant de mesurer la TEE en continu à divers points dans la masse de foin pendant le séchage.

Matériels et méthodes

Échantillons. La fléole des prés a été récoltée à la ferme expérimentale de Deschambault à quatre reprises durant le premier cycle végétatif, soit le 12 juin, le 19 juin, le 3 juillet et le 11 juillet 2006. Le fourrage frais a été prélevé directement au champ à des TEE moyennes initiales de 77, 70, 66 et 64%, respectivement, sur une base humide. Le fourrage était transporté en vrac jusqu'au laboratoire où il était conditionné soit au soleil, soit à l'ombre à l'intérieur, pour obtenir quatre niveaux de TEE normalement entre 10 et 30%. Chacune des TEE a été répétée trois fois chaque semaine. Il y a donc eu 48 unités expérimentales (4 semaines x 4 teneurs en eau x 3 répétitions).

Le conditionnement consistait à placer le fourrage frais sur des grilles pour une période de 2 à 3 jours en effectuant des retournements régulièrement. Au moment où le fourrage avait atteint la TEE visée, il était placé pendant une période d'une heure dans un contenant fermé afin d'uniformiser la distribution de l'eau.

Chaque unité expérimentale était soumise à une série de mesures électroniques de la teneur en eau, expliquées ci-bas. Après ces mesures, huit échantillons d'environ 200 g ont été prélevés pour être séchés à l'étuve d'abord pendant 72 heures à 60°C. Les mêmes huit échantillons ont ensuite été séchés à l'étuve pendant 24 heures à 103°C conformément aux deux conditions de séchage suggérées par la norme S358.2 de l'ASABE (2006).

Équipements. Quatre appareils électroniques commerciaux, soit le DelmHorst F-2000, le Farmex HMT-2 Portable Hay Tester, le PreAgro 25 Moisture Meter et le Draminski Forage Tester, ont été sélectionnés. Chacun était muni d'une tige pénétrante. La figure 1 et le tableau 1 présentent les appareils et certaines de leurs caractéristiques.



Figure 1. Appareils électroniques utilisés pour la cueillette de données.

Tableau 1. Caractéristiques des appareils utilisés pour la mesure de la TEE du foin.

Fabricant	Modèle	Principe de fonctionnement	Plage de mesure de TEE	Longueur de la sonde (mm)
Delmhorst	F-2000	Conductance électrique	8 – 40 %	250
Farmex	HMT-2	Conductance électrique	8 – 44 %	500
PreAgro	25	Capacitance électrique	13 – 70 %	460
Draminski	-	Conductance électrique	10 – 80 %	560

Le PreAgro 25 était aussi équipé d'un compensateur de masse volumique qui permettait d'adapter la mesure au degré de tassemement de l'échantillon. La plage de masse volumique couverte par le capteur était de 8 à 16 lb/pi³ sur une base humide (130 à 260 kg/m³). Afin d'effectuer les mesures dans des conditions de masse volumique contrôlée, le fourrage a été placé dans une boîte spécialement conçue à cette fin (figure 2).

Cette boîte, construite en contre-plaquée de 19 mm d'épaisseur et ayant des dimensions intérieures 400 x 300 x 200 mm, présentait deux patrons avec 16 orifices, aménagés pour l'insertion des sondes, sur deux faces opposées (figure 2). Le couvercle mobile était connecté à un vérin hydraulique (figure 3) qui permettait de contraindre le fourrage de masse connue à volume constant de façon à obtenir les masses volumiques souhaitées, soit normalement 90 kg MS/m³ et 180 kg MS/m³. Les masses volumiques réellement obtenues pour chaque unité expérimentale ont varié légèrement du niveau souhaité parce que la TEE était seulement estimée au moment de la prise de mesure avec les sondes et mesurée exactement après les mesures.

Cueillette des données. Suite à la période d'uniformisation de la TEE, la quantité de foin nécessaire pour remplir la boîte était placée dans celle-ci. La masse de fourrage était déterminée en fonction du volume de la boîte ainsi que de la TEE estimée à l'aide d'un four à micro-onde. Une fois remplie, la boîte était placée sous les vérins afin de contraindre, dans un premier temps, le fourrage à un volume de 0,024 m³ pour obtenir la masse volumique de 90 kg MS/m³. La sonde du premier capteur (PreAgro 25) était insérée successivement dans 4 trous sélectionnés au hasard parmi les 16 trous et ce à deux profondeurs (70 et 140 mm) pour obtenir 8 mesures électroniques. Ensuite, la sonde du deuxième capteur (Farmex HMT-2) était insérée successivement dans 4

trous sélectionnés au hasard parmi les 12 trous restants. De la même façon, la troisième sonde (F-2000) et la quatrième sonde (Draminski) furent insérées dans les 8 derniers trous. Dans un deuxième temps, le fourrage était contraint à un volume de 0,012 m³ pour obtenir la masse volumique de 180 kg MS/m³ et les sondes furent insérées suivant la même procédure.

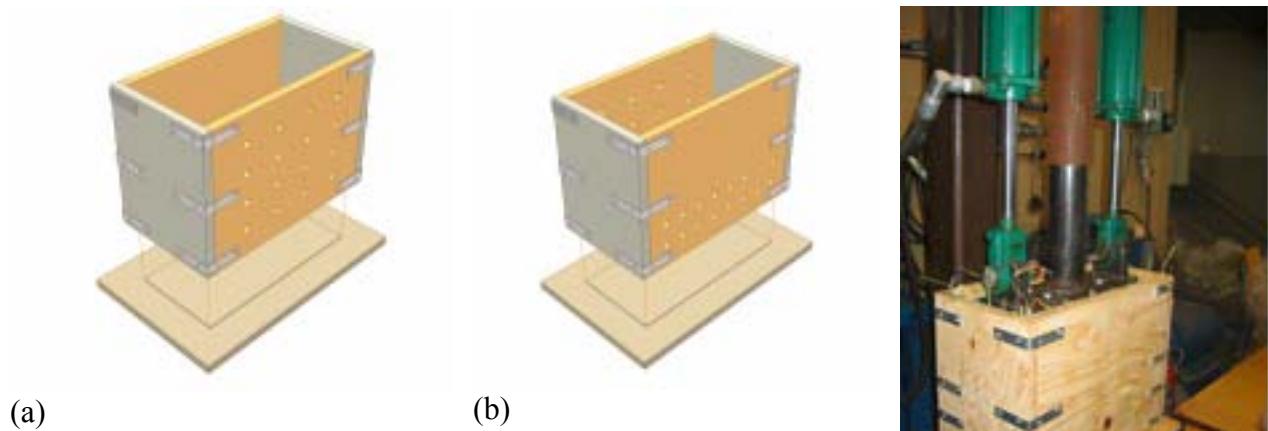


Figure 2. Boîte utilisée pour la cueillette de données avec 16 trous pour l'échantillonnage : (a) du côté à faible masse volumique ; (b) du côté à masse volumique élevée.



Figure 3. Boîte sous les vérins hydrauliques.

Résultats et discussion

Constance des mesures. La constance indique comment une mesure sera reproduite fidèlement quand la mesure est reprise dans des conditions identiques. Un bon indice de la constance est l'écart-type (ÉT) des mesures à l'intérieur d'une unité expérimentale supposée homogène. La figure 4 présente les ÉT sur la TEE de référence obtenue par séchage à l'étuve à 103°C (TEE_{103°C}) à l'intérieur de chacune des 48 unités expérimentales. Les ÉT sont calculés à partir de la TEE des huit échantillons prélevés et séchés pour chacune des unités expérimentales. On voit que le fourrage placé dans la boîte n'avait pas une TEE parfaitement homogène. L'ÉT moyen était de 1,36%. Il avait tendance à augmenter avec la TEE. À partir de la régression linéaire des ÉT (Tableau 2), on peut estimer que l'ÉT de la TEE_{103°C} passait de 0,5% à une faible TEE (10%) jusqu'à 2,6% pour une TEE élevée (40%).

Puisque le foin a une TEE intrinsèquement variable, on s'attend à ce que les mesures électroniques reflètent au minimum cette variation et au pire une variation beaucoup plus grande due à l'instabilité de l'appareil.

La figure 5 présente les ÉT des quatre capteurs pour les 8 mesures (4 trous à deux profondeurs) à l'intérieur de chaque unité expérimentale, à haute densité (180 kg MS/m³). La valeur moyenne des ÉT était de 1,8% pour le Delmhorst, 1,9% pour le PreAgro, 2,6% pour le Farmex et 3,1% pour le Draminski (Tableau 2). Les ÉT des appareils sont tous supérieurs à l'ÉT intrinsèque du foin (1,3%). Un appareil avec un ÉT faible permettra d'obtenir une mesure précise avec un plus

petit nombre de répétitions qu'un appareil avec un ÉT élevé. À cet égard, le Delmhorst et le PreAgro se démarquaient bien des deux autres appareils.

Par contre, une mesure peut être précise, c'est-à-dire peu variable, sans toutefois être exacte. En effet, si l'appareil présente une déviation systématique («offset»), il faudra ajuster la mesure. La section suivante illustre les ajustements nécessaires avec les quatre appareils évalués.

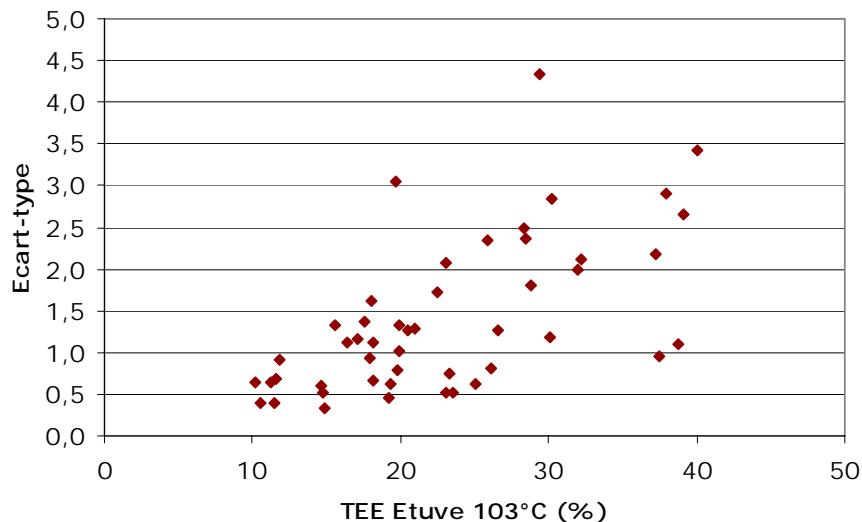


Tableau 2. Écarts-types intrinsèques de la mesure de la TEE (ÉT basés sur 8 mesures par unité théoriquement homogène; $\bar{\text{ET}}_{\text{moy}}$ basés sur 48 unités à densité élevée).

Mesure	$\bar{\text{ET}}_{\text{moy}}$	Modèle : $\bar{\text{ET}}_{\text{préd}} = a + b * \text{TEE}$		Prédiction de l'ÉT	
		a	b	À 10% TEE	À 40% TEE
Étuve, 103°C	1,36	-0,158	0,0681	0,52	2,57
Delmhorst	1,78	+0,0714	0,0744	0,82	3,05
Draminski	3,06	-1,78	0,203	0,23	6,31
PreAgro	1,91	-0,0453	0,0854	0,81	3,37
Farmex	2,60	+1,74	0,0372	2,12	3,23

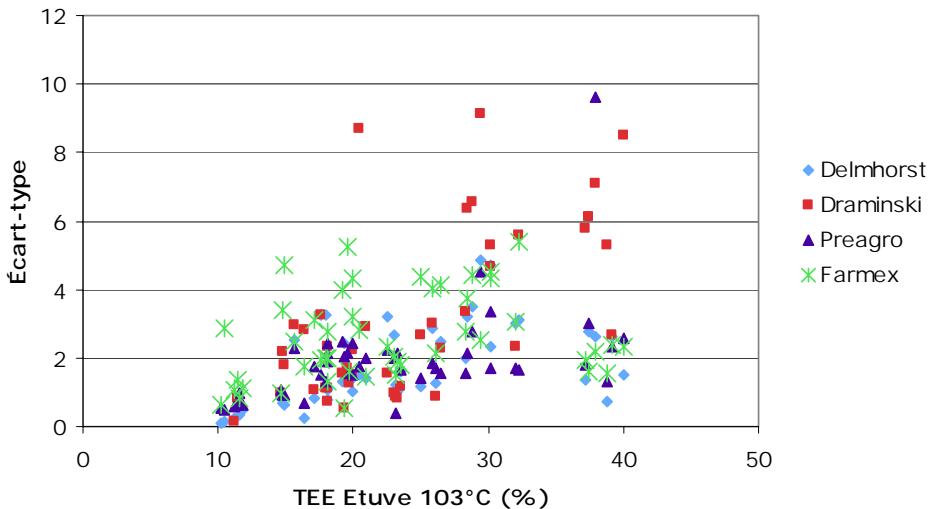


Figure 5. Écart-type de la TEE mesurée pour chacune des sondes à l'intérieur des 48 unités expérimentales à masse volumique élevée (8 mesures par sonde et par unité).

Exactitude des mesures. L'exactitude peut être quantifiée par l'erreur de mesure (ε), c'est-à-dire la différence entre la TEE moyenne mesurée par une sonde et la TEE moyenne de référence ($\varepsilon = \text{TEE}_{\text{sonde}} - \text{TEE}_{103^\circ\text{C}}$). Le tableau 3 montre que l'erreur absolue moyenne variait entre 0,6 et 6,4%, selon les capteurs et selon la masse volumique. L'erreur était généralement plus faible lorsque la mesure était prise à une masse volumique élevée. La seule exception était le PreAgro qui était aussi exact, sinon plus, à une faible masse volumique. Cet appareil était le seul muni d'un compensateur de masse volumique. Grâce à cet ajustement, le PreAgro ne sous-estimait pas la TEE lorsque la masse volumique était faible, contrairement aux trois autres appareils. On voit donc l'importance d'ajuster la mesure en fonction de la masse volumique.

Par ailleurs, on a estimé des régressions linéaires pour prédire la TEE en fonction des mesures des capteurs aux deux niveaux de masse volumique (tableau 3). On a aussi estimé les intervalles de confiance (IC) sur la prédition de la TEE avec une probabilité de 95% (Steel et al. 1997).

À faible masse volumique, le PreAgro présentait le meilleur modèle de prédition (R^2 le plus élevé à 0,954 et l'IC le plus faible à $\pm 3,38\%$). À masse volumique élevée, le Draminski avait le R^2 le plus élevé et l'IC le plus faible. Même si le Draminski était intrinsèquement plus variable que tous les autres appareils (ET de 3,06% au Tableau 2), la moyenne de 8 mesures fournissait une valeur stable et mieux corrélée avec la vraie $\text{TEE}_{103^\circ\text{C}}$ que les moyennes des autres appareils à haute masse volumique.

Les intervalles de confiance étaient relativement élevés, entre $\pm 3,4$ et $\pm 5,3\%$, selon les appareils et le niveau de masse volumique. Donc, même en incluant un ajustement par corrélation des mesures électroniques, les quatre appareils évalués ne fournissaient pas une grande précision absolue par rapport à la TEE de référence.

Tableau 3. Erreur de mesure ($\varepsilon = \text{TEE}_{\text{sonde}} - \text{TEE}_{103^\circ\text{C}}$) moyenne, prédition de la TEE basée sur la lecture des sondes et intervalle de confiance (IC) sur la $\text{TEE}_{\text{préd}}$.

Masse vol. (kg MS/m ³)	Capteur	n*	ε_{moy}	Modèle: TEE _{préđ.} = a + b*TEE _{sonde}			IC à TEE = 18%
				a	b	R ²	
90	Delmhorst	47	-6,39	0,88	0,68	0,897	± 5,29
	Draminski	41	-4,90	1,85	0,73	0,940	± 3,77
	PreAgro	42	0,87	7,71	0,69	0,954	± 3,38
	Farmex	48	-3,98	1,47	0,76	0,926	± 4,66
180	Delmhorst	47	-2,29	3,34	0,95	0,917	± 4,75
	Draminski	44	1,39	6,10	0,70	0,938	± 4,05
	PreAgro	42	-2,10	-13,6	1,76	0,927	± 4,20
	Farmex	48	0,63	0,30	0,96	0,932	± 4,50

*La variable n = nombre de données retenues pour la régression après avoir filtré les données hors de la plage d'utilisation selon le fabricant.

Conclusions

Parmi quatre appareils électroniques évalués pour la mesure de la TEE, les plus précis ou moins variables étaient le Delmhorst et le PreAgro. Ils requerraient moins de mesures que les autres pour obtenir une bonne moyenne. Par contre, il fallait corriger les mesures moyennes de tous les appareils pour réduire l'effet de déviation et estimer la TEE réelle. Des équations de régression différentes étaient nécessaires à deux niveaux de masse volumique différents (90 et 180 kg MS/m³). À cause de la variation naturelle de la TEE dans le foin (écart-types entre 0,5 et 2,6% selon la TEE), les mesures électroniques reflétaient cette variation intrinsèque plus une certaine variation due à l'appareil. Les meilleurs coefficients de détermination (R²) pour la prédiction de la TEE réelle étaient de 0,954 à masse volumique faible et 0,938 à masse volumique élevée. Les intervalles de confiance étaient relativement larges, entre ±3,4 et ±5,3%, selon les appareils et le niveau de masse volumique.

Donc, même très bien calibrés, les appareils de mesure électronique ne donnent pas une valeur très exacte par rapport à la TEE mesurée à l'étuve. Il reste que ces appareils donnent une idée de l'évolution de la TEE et peuvent apporter une aide relative pour la prise de décision concernant les méthodes de conservation.

Suite à ces résultats, le PreAgro et le Delmhorst ont été retenus pour poursuivre les études de mesure de teneur en eau en mode dynamique. Ils seront utilisés pour estimer la TEE de façon continue durant le séchage artificiel du foin en balles.

Références bibliographiques

- ASABE. 2006. Moisture measurement - forages. Standard S358.2. In *ASAE Standards*. St. Joseph, MI : ASABE.
- 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/>
- Savoie, P. and H. Joannis. 2006. Bidirectional drying of baled hay with air recirculation and cooling. *Canadian Biosystems Engineering / Le génie des biosystèmes au Canada* 48: 3.53-3.59.
- Steel, R. G. D., J. H. Torrie and D. A. Dickey. 1997. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. McGraw-Hill Series in Probability and Statistics. 666 pages. New York, NY.

Le séchage du fourrage haché en vrac avec un apport d'énergie solaire

René Morissette¹ et Philippe Savoie^{1,2}

¹Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Québec, G1K 7P4
(rene.morissette@fsaa.ulaval.ca); ²Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 boul. Hochelaga, Québec, G1V 2J3

INTRODUCTION

Au Québec, le foin est généralement récolté en balles afin de réduire le volume d'entreposage et de faciliter la manipulation. Cependant, ce foin requiert un séchage presque complet au champ qui s'avère difficile à cause du climat humide. Depuis de nombreuses années, des producteurs européens conservent leur foin haché en vrac grâce à un système intégré de séchage en grange avec un apport d'énergie solaire. Ce système permet de récolter un fourrage plus humide. La flexibilité lors des récoltes, la réduction de la main-d'œuvre, le coût élevé de l'énergie et la réduction des intrants sur l'exploitation sont quelques-uns des facteurs qui ont incité plusieurs producteurs à adopter ce système. On compte plus de 1200 séchoirs à foin solaires en Suisse, 200 en Norvège (ARPE, 2006) et 400 en France (Bochu et al., 2005). Au Québec, la ferme Cressier, dans la région de Bécancour, est la seule installation connue de séchage de foin utilisant l'énergie solaire (Larivière, 2006).

Le principe du séchoir solaire est simple. Aspiré par un ventilateur, l'air extérieur circule sous la toiture qui fait office de capteur solaire. L'air s'y réchauffe de quelques degrés (4 à 6 °C en moyenne) avant d'être poussé à travers le caillebotis pour sécher le fourrage haché. Le foin peut ensuite rester dans l'aire de séchage (cas le plus fréquent) ou être stocké dans une autre partie de l'exploitation. Le séchage solaire est surtout utilisé pour le fourrage récolté en vrac, mais il peut s'adapter au foin mis en balles.

Cet article propose un aperçu de cette pratique de conservation des fourrages adapté aux producteurs laitiers européens et les perspectives du transfert de cette technologie au Québec. Il est basé sur une revue de littérature sur le sujet et des informations techniques obtenues de MM. Yann Charrier (SGF Conseil) et Bertrand Silande (SEGRAFO Ouest) lors d'une visite en Bretagne en février 2006.

MATÉRIEL TECHNIQUE

Le séchage des fourrages en vrac à l'aide de l'énergie solaire est un mode de récolte et de conservation particulièrement efficace, économique en énergie et respectueux de l'environnement. En effet, la récolte et le séchage se font dans de très bonnes conditions; la perte de matière sèche (MS) par les opérations mécaniques et la dégradation organique sont limitées. Plusieurs éléments font partie de la réussite du système de conservation en vrac : l'autochargeuse, la griffe télescopique, les cellules de séchage, le capteur solaire et les ventilateurs.

L'AUTOCHARGEUSE

En Europe, plusieurs manufacturiers dont Poettinger, Claas, Krone et Mengle proposent des autochargeuses de 20 à 70 m³. Par exemple, une autochargeuse de 50 m³ peut contenir jusqu'à 2,5 t de MS. Sa capacité est d'environ 6 t MS/h en supposant que la parcelle se situe à 5 minutes du

séchoir et qu'on compte 15 minutes pour le chargement et le déchargement de l'autochargeuse. L'autochargeuse est munie de couteaux permettant de couper grossièrement le foin lors de la récolte afin de réduire le volume d'entreposage. La longueur de coupe recommandée est d'environ 20 cm. La Figure 1 montre une autochargeuse Poettinger.

LA GRIFFE TÉLESCOPIQUE

La griffe télescopique (Figure 2) est un outil essentiel à la manutention du foin en vrac, autant pour placer le foin humide dans le séchoir que pour la distribution au troupeau. La griffe est montée sur deux poutres d'acier fixées au toit du bâtiment permettant le déplacement au dessus des cellules de séchage et de l'étable. En France, la marque STEPA (Steindel-Palfinger) est la plus populaire, suivie de Auer et Gach. Les griffes télescopiques les plus communes ont une capacité maximale de 1000 kg et permettent l'allongement du bras jusqu'à 12 m.



Figure 1. L'autochargeuse de foin en vrac



Figure 2. La griffe télescopique

LES CELLULES DE SÉCHAGE

Les cellules permettent le séchage et l'entreposage du foin (Figure 3). Les dimensions nominales des cellules sont définies en fonction des besoins alimentaires annuels, le rythme de récolte et la vitesse de l'air souhaitée à travers le foin. Généralement, un séchoir compte 2 ou 3 cellules de séchage dont la surface moyenne est d'environ 120 m² (entre 240 et 360 m² au total). La hauteur de foin peut atteindre jusqu'à 8 m mais il est recommandé de ne pas excéder 6 à 7 m (FAT, 1992). Une cellule peut ainsi contenir jusqu'à 100 t MS.

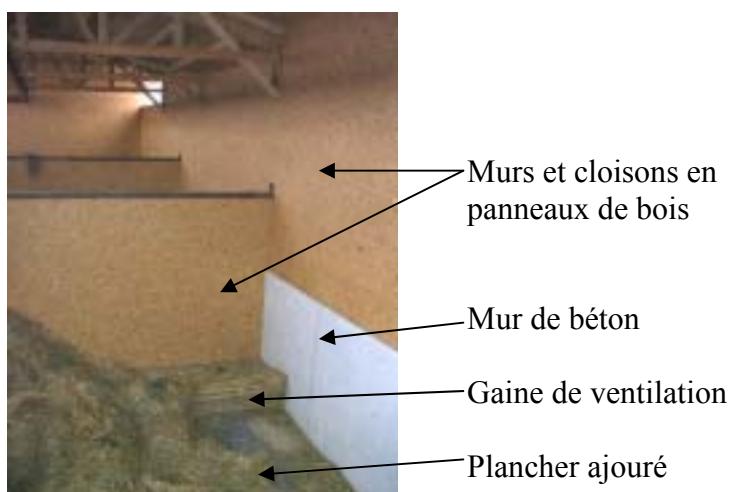


Figure 3. Les cellules de séchage et ses composantes

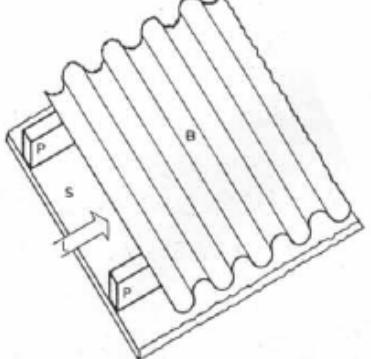
Selon l'emplacement de l'étable et l'utilisation de la griffe, les cellules peuvent avoir une partie en-dessous du niveau du sol. La base des murs extérieurs et le plancher sont faits de béton pour prévenir l'infiltration d'eau. Les cloisons entre les cellules sont faites de béton et/ou de bois et leur hauteur ne gêne pas l'activité de la griffe. L'intérieur des cellules et les cloisons sont recouverts de panneaux de bois de façon à éliminer les fuites d'air. Le fond des cellules est fait d'un caillebotis situé à environ 30 cm au-dessus du plancher en béton. Ce caillebotis communique avec la gaine de ventilation située sur un des côtés de la cellule. L'air de séchage circule donc de bas en haut à travers le foin.

LES VENTILATEURS

Les ventilateurs (Figure 4) permettent d'aspirer l'air extérieur et le pousser à travers la masse de foin. On compte généralement deux ventilateurs centrifuges par séchoir dont la puissance varie entre 10 et 20 kW. Pour les séchoirs comptant 3 cellules, un ventilateur se partage 2 cellules alternativement. Un système d'actuateur manuel permet de diriger l'air dans l'une ou l'autre des cellules. Le choix des ventilateurs repose sur plusieurs critères techniques dont les vitesses d'air souhaitées à travers le foin et dans le capteur solaire ainsi que les pertes de pression occasionnées par le capteur solaire, les conduites et le foin (hauteur, masse volumique, etc). Selon la FAT (1992), la vitesse d'air dans le foin doit être d'environ 0,10 m/s et la vitesse dans le capteur solaire doit se situer entre 2 et 4 m/s.

LE CAPTEUR SOLAIRE

Le capteur solaire est intégré au toit du séchoir et sert à préchauffer l'air de séchage et à protéger le foin des intempéries. En Europe, plusieurs matériaux sont utilisés pour absorber les rayons du soleil : éternit brun, aluminium, acier, polycarbonate translucide et tuiles. La Figure 5 montre les principales composantes d'un capteur solaire. Le revêtement extérieur de couleur foncée (B) qui absorbe les rayons du soleil, les pièces de bois (P) qui soutiennent le revêtement et créent un espace où l'air circule pour y être réchauffé et le revêtement intérieur (S) qui peut être un panneau de bois ou un panneau isolant afin d'augmenter le rendement du capteur. Les pièces de bois sont directement assises sur les chevrons du bâtiment de séchage. L'air circule parallèlement aux pièces de bois.

	
Figure 4. Le ventilateur centrifuge alimentant 2 cellules avec le système de déviation du flux d'air.	Figure 5. Le capteur solaire (FAT, 1992)

La superficie du capteur dépend de la surface du tas de foin à sécher. Plus le capteur est grand, plus son rendement sera élevé. Cependant, un capteur trop grand peut nuire à la circulation

efficace de l'air et les pertes de charges augmentent. Un compromis doit être trouvé pour conjuguer ces facteurs. Par exemple, la FAT (1992) recommande une superficie de capteur entre 1,5 à 2,5 fois plus grande que la superficie du tas de foin à sécher lorsqu'on utilise un revêtement métallique foncé. Ainsi pour un tas ayant 120 m², un capteur de 180 à 300 m² est suffisant pour obtenir une augmentation moyenne de la température de l'air de 5 à 6 °C. Une telle augmentation de température permet de réduire considérablement la durée du séchage, comparativement à un séchage à l'air ambiant.

LES ÉTAPES: DE LA RÉCOLTE À LA DISTRIBUTION

La réussite de cette technique repose sur la maîtrise des étapes de récolte, de conservation et de distribution. Une fois l'herbe fauchée sans conditionnement, elle est fanée pendant 24 à 48 h. La plupart du temps, un seul passage de faneur est nécessaire. Après la mise en andains, le foin est récolté en vrac à l'aide de l'autochargeuse lorsque sa teneur en eau (TEE) se situe entre 35 et 55 % (PRELUDDE, 2006). Lorsque l'autochargeuse est remplie, elle se dirige vers le séchoir pour décharger le foin dans l'aire prévue. La griffe prend le fourrage humide et le répartit uniformément dans une ou deux cellules de façon à favoriser un écoulement uniforme de l'air. Le premier jour, une seule couche de 1 à 2 m de foin humide doit être placée. Si l'on dispose de deux ventilateurs, deux cellules peuvent être démarrée au cours de la première journée. Si le foin est très humide (45-55%), la ventilation doit être prolongée la nuit. Sinon, il est conseillé de ventiler le jour seulement entre 9h et 21h, selon les conditions climatiques. Deux jours plus tard, 1 m de foin humide supplémentaire peut être ajouté sur le foin déjà en place. On procède ainsi au rythme d'un mètre par jour jusqu'à une hauteur de 6 à 7 m. Selon les conditions climatiques et la TEE initiale du foin, le séchage se poursuit de 2 à 5 jours après le dernier jour de récolte afin d'assurer une bonne conservation du foin (TEE finale moyenne entre 10 et 12%) (PRELUDDE, 2006).

Le rythme de la récolte doit être synchronisé avec le rythme de séchage. Par exemple, en supposant que le foin en vrac a une masse volumique de 70 kg MS/m³, pour remplir deux cellules de 120 m² sur 2 mètres de hauteur (480 m³ de foin), il faudra faucher 33600 kg MS ou environ 11 ha (rendement moyen de 3 t MS/ha en première coupe). Les jours suivants (pas nécessairement consécutifs), seulement 5,5 ha par jour devront être fauchés afin d'harmoniser la récolte à la capacité de séchage. La même procédure est répétée lors de la deuxième coupe afin de remplir la troisième cellule.

La reprise du foin s'effectue avec la griffe. Il est fréquent de voir le séchoir annexé à l'étable; la griffe peut ainsi circuler du séchoir jusqu'au dessus des vaches pour y apporter le foin (Figure 6). Le système s'adapte autant en stabulation libre qu'entravée. La Figure 7 montre l'aménagement type d'une exploitation européenne intégrant le séchoir en vrac et l'étable en stabulation libre.

Ainsi, la mécanisation des opérations de récolte et de distribution est complète. Il est donc possible d'effectuer le travail seul ou en groupe limité et d'organiser le chantier avec plus de flexibilité.

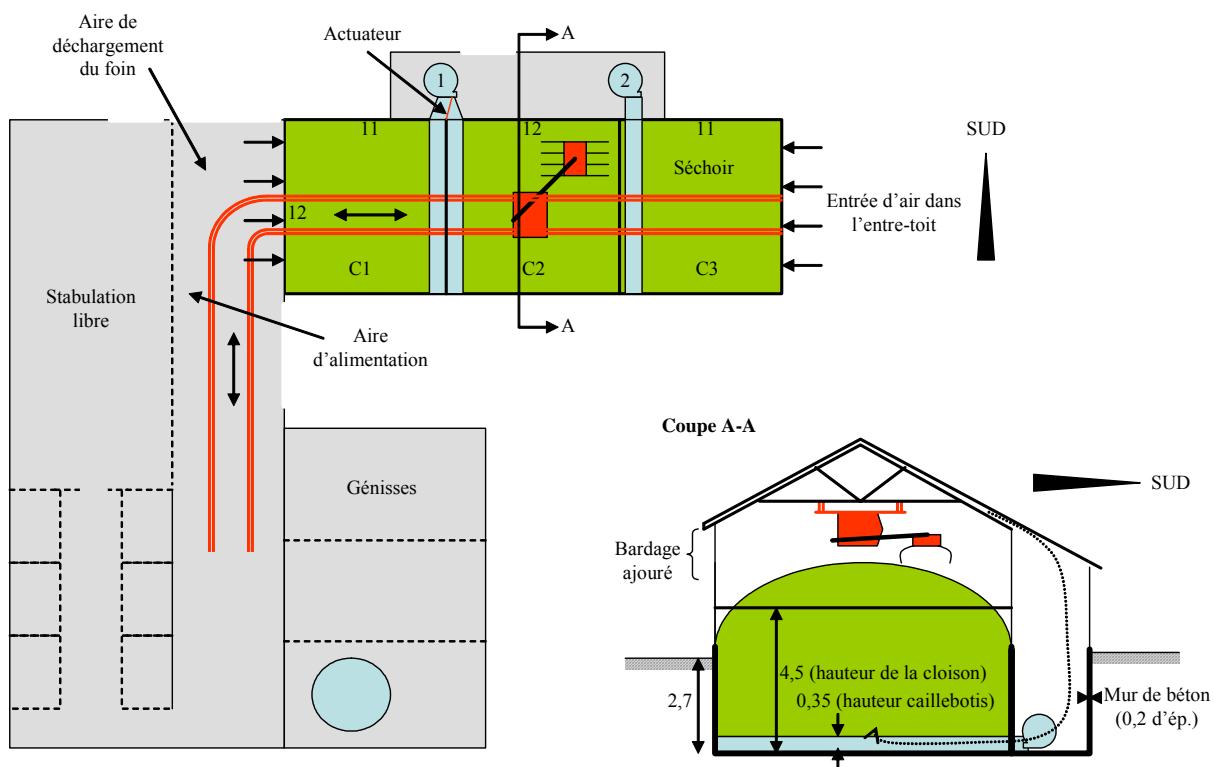


Figure 7. Aménagement d'une installation type de séchage en vrac avec distribution à l'étable (les dimensions sont en mètres)

RÉSULTATS TECHNIQUES

Les promoteurs européens du séchage du foin en vrac vantent l'amélioration de la qualité du fourrage, le bénéfice en production laitière, la meilleure santé des animaux, une plus grande assurance qualité pour les filières fromagères au lait cru et aussi une plus grande facilité pour faire le passage au biologique (SEGRAFO, 2006; PRELUDDE, 2006).

L'implantation au Québec doit se justifier aussi sur des bases économiques, énergétiques et de facilité du travail. L'analyse qui suit examine principalement les coûts d'énergie, de machinerie et de bâtiments.

CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE ET COÛT DE SÉCHAGE

Un séchoir solaire consomme deux types d'énergie : le soleil et l'électricité. Afin de quantifier cette énergie, la consommation annuelle d'un séchoir type est donnée en exemple. En supposant un séchoir avec un débit d'air de 50000 m³/h, fonctionnant 60 jours par an à raison de 12 h par jour et avec une élévation moyenne de température de 5°C, environ 210 GJ d'énergie solaire est récupérée (équivalent à 58800 kWh) et 10800 kWh d'électricité est consommée par les ventilateurs (puissance de 15 kW). En comparaison avec le propane (20 \$/GJ), l'utilisation de l'énergie solaire représente une économie de 4200 \$ soit environ 14 \$/t MS (pour un séchoir de 300 t MS). Ainsi, le coût d'opération se résume à l'électricité (0,05 \$/kWh) consommée par les ventilateurs soit 1,80 \$/t MS et l'énergie consommée par la griffe à raison d'une heure par jour pendant 1 an, représentant des frais d'environ 0,55 \$/t MS. Le coût d'énergie électrique est de 2,35 \$/t MS.

COÛT DE LA MACHINERIE ET DU BÂTIMENT

Certains éléments de machinerie dont l'autochargeuse et le grappin ne sont pas commercialisés au Québec, voire même au Canada. Les prix proviennent de statistiques européennes et sont convertis en devise canadienne. Le prix de détail d'une autochargeuse est d'environ 50 000\$ et celui d'une griffe télescopique est de 30 000\$. Pour un séchoir à 3 cellules, les coûts de construction sont estimés à 150 000\$. Il en coûte environ 10 000\$ par ventilateur muni d'un système de contrôle et raccordé au réseau. Au total, le coût de l'équipement et de la construction du séchoir s'élève à 250 000\$. D'autres frais peuvent s'ajouter pour adapter l'étable existante ou en construire une nouvelle dans le but de rendre le système de distribution du foin pleinement fonctionnel. En Europe, beaucoup d'exploitants choisissent de construire eux-mêmes le séchoir et l'adaptation de l'étable est aisée car la structure haute et dégagée permet d'accueillir facilement la griffe.

PERSPECTIVES

Au Québec, l'approvisionnement en foin est relativement difficile étant donné le climat humide et incertain. De plus, les séchoirs actuels dans les fenils sont de faible capacité et permettent difficilement de répondre à un besoin grandissant de foin de qualité malgré l'augmentation troupeau laitier. On donne ainsi plus d'ensilage, beaucoup plus facile à récolter, et les problèmes d'acidose, de pattes et de fertilité font surface.

D'un point de vue technique, le transfert de cette technologie européenne est réalisable car l'ensoleillement au Québec est comparable à celui de la France et les matériaux de construction sont facilement disponibles. Par contre, l'autochargeuse et la griffe ne sont pas commercialisées au Québec. Il est néanmoins possible de les importer. Un des défis à relever est l'intégration de la technique en fonction de nos bâtiments.

Une première perspective est l'utilisation intégrale de la technique. Le séchoir est adapté au séchage du foin en vrac et la récolte s'effectue avec l'autochargeuse. Le foin est destiné à l'autoconsommation sur la ferme et sa distribution au troupeau se fait à l'aide de la griffe. Cependant, le déplacement de la griffe dans l'étable peut occasionner des modifications importantes car la majorité des constructions au Québec ne sont pas conçues pour supporter une

telle charge ponctuelle. De plus, l'alimentation n'a pas besoin d'être uniquement à base de foin pour profiter des avantages de la technique.

Une seconde perspective est d'utiliser l'énergie solaire pour sécher le foin en balles dans une installation existante (grange ou fenil). Un capteur solaire installé sur le toit du bâtiment permettrait de préchauffer l'air de séchage et ainsi réduire la durée de séchage et augmenter la qualité du foin avec un investissement raisonnable. Par contre, la capacité du ventilateur en place à fournir le débit et la pression nécessaire doit être évaluée. Les balles doivent être à une TEE initiale inférieure à 30 % car elles sont plus denses que le foin en vrac et pourraient nuire à une ventilation efficace.

La technique pourrait aussi être adapté au foin de commerce. Cette troisième perspective permettrait de produire un foin à valeur ajoutée et exempt de poussière, présentement très prisé sur le marché américain. Le foin pourrait être récolté en vrac, séché et pressé en petite ou grosse balle. Par contre, cette procédure demande plus de manipulation. Le foin pourrait aussi être séché directement en balle mais la réussite du procédé de séchage à faible élévation de température repose entre autre sur l'utilisation de foin pressé à faible masse volumique; ce qui augmente les frais de transport par la suite s'il n'est pas recompressé. Cette option serait considérable avec l'ajout d'une source de chaleur supplémentaire (brûleur, résistance électrique, etc) afin de réduire la durée du séchage. À ce stade, les investissements sont plus importants et une bonne connaissance du marché est primordiale.

Ainsi, il est possible au Québec de retirer un bénéfice de cette technologie. Le soleil est une énergie gratuite et sous-exploitée. Le séchage en vrac des fourrages peut s'adapter à plusieurs types d'exploitations, petites et grandes, désirant s'assurer d'un approvisionnement en foin de haute qualité.

CONCLUSION

L'énergie solaire récupérée améliore nettement les performances d'une installation de séchage. Un séchage plus rapide garantit la qualité du foin ventilé et réduit la consommation électrique de ventilation. Cette technique de conservation n'engendre ni déchets (ficelle, bâche, plastique...) ni rejets polluants (jus d'ensilage, odeurs nauséabondes...). Elle permet le maintien et la valorisation de la biodiversité des plantes fourragères. De plus, l'utilisation modérée d'intrants (engrais, pesticides...) limite les risques de pollution de l'environnement. La technique contribue aussi à la bonne conservation des sols par l'allongement des rotations, l'utilisation réduite de la machinerie et la présence de couvert végétal quasi permanent; elle favorise le développement durable.

La technique de séchage en vrac permet d'assurer l'approvisionnement en foin dans le cadre d'une alimentation à base de foin et de moulée. Ce type d'alimentation diminue considérablement les risques de contamination par les butyriques et la listeria, assurant ainsi la qualité des fromages au lait cru. Cependant, l'installation de séchage, la machinerie et les adaptations devant être effectuées sur l'étable demandent un investissement important. Toutefois, il n'existe pas d'analyse technique et économique présentant les performances de la technique dans le contexte québécois. Pour en apprendre davantage sur cette technique dans nos conditions, il faudra encore attendre quelques années pour observer les producteurs l'ayant expérimentée.

Références bibliographiques

- ARPE. 2006. *Le séchage solaire des fourrages*. Les fiches techniques de l'Agence Régionale Pour l'Environnement. Midi-Pyrénées. France.
- Bochu, J-L, C.Couturier, P. Pointereau, M. Charru et E. Chantre. 2005. *Maîtrise de l'énergie et autonomie énergétique des exploitations agricoles françaises: état des lieux et perspectives d'actions pour les pouvoirs publics*. SOLAGRO. France.
- FAT. 1992. *La ventilation du foin de A à Z*. Station fédérale de recherches d'économie d'entreprise et de génie rural (FAT). Suisse. No. 406.
- Larivière, V. 2006. Se servir du soleil...pour sécher le foin. *L'Utili-terre*. Août 2006 : 16-23.
- PATLQ. 2006. Les systèmes d'alimentation : choisir le bon. *Le Producteur de Lait Québécois*. Décembre 2006 : 24-26.
- PRELUDDE. 2006. *Le séchage solaire des fourrages*. Programme régional de lutte contre l'effet de serre et pour le développement durable. ADEME et ARPE. Région Midi-Pyrénées. France.
- SEGRAFO. 2006. *À la découverte d'une technique : séchage en grange des fourrage de l'ouest*. Bertrand Silande. Rennes, France.

Évaluation de la durabilité agroenvironnementale des fermes laitières québécoises

Valérie Bélanger¹, Anne Vanasse¹, Diane Parent¹, Guy Allard¹ et Doris Pellerin¹

¹Université Laval, Pavillon Paul-Comtois, Québec, G1K 7P4, valerie.belanger.10@ulaval.ca

Au Québec, l'intensification et la concentration géographique de certaines productions végétales et animales ont eu pour effet d'accroître la pression sur la qualité des ressources eau et sol, notamment par les surplus de fumiers et l'usage de quantités importantes de pesticides et d'engrais minéraux (5). Devant cet état de fait, plusieurs mesures ont été mises en place pour freiner la dégradation des ressources telles que le règlement sur les exploitations agricoles (REA) et, tout récemment, le plan d'accompagnement agroenvironnemental (PAA). Face à ce constat, les différents intervenants se sont donc dotés d'outils pour mieux encadrer la production dans le respect de l'environnement. De surcroît, la population est moins tolérante aux problèmes générés par le domaine agricole et elle est plus sensible à la qualité de l'environnement (5). Dans ce contexte, le besoin de définir un système d'exploitation durable qui va au delà des normes actuelles devient une nécessité. L'entreprise agricole durable se définit comme étant une entreprise *viable économiquement, vivable pour les humains qui y travaillent, transmissible à la relève et reproductible au plan des ressources naturelles* (7). Au plan environnemental, c'est la notion de reproductibilité qui prédomine. La reproductibilité renvoie à la qualité écologique qui se traduit par le degré d'adoption de pratiques agricoles durables, leurs effets sur les ressources (eau, air, sol) et le potentiel de reproduction de ces ressources. Les réflexions sur la durabilité des exploitations, des systèmes de production et des milieux semblent indissociables et c'est dans cette perspective que s'inscrit le présent projet.

Diverses méthodes ont été proposées pour évaluer les impacts environnementaux de l'agriculture. La mise au point d'outils appropriés est considérée par beaucoup d'auteurs comme une condition pour la mise en œuvre d'une agriculture durable (3). Les méthodes telles que le Management environnemental pour l'agriculture (8) et le diagnostic Solagro (8) utilisent un jeu d'indicateurs comme critères pour évaluer quantitativement l'atteinte des objectifs agroenvironnementaux. La méthode AGRO*ECO (2), maintenant commercialisée sous le nom de méthode Indigo, fait appel à une matrice d'interaction. Si ces méthodes ne prennent en compte que le volet environnemental, il en existe d'autres qui regroupent également les volets économique et social, telles que la méthode IDEA (9). Dans tous les cas, l'approche la plus concrète pour l'évaluation de l'impact environnemental est basée sur des mesures directement prises au niveau de la ferme (1). C'est avec cette approche que le présent projet de recherche sera réalisé

Un exemple de méthode d'évaluation de la durabilité

La méthode IDEA a été la principale source d'inspiration pour le projet en cours. Cette méthode mérite donc une plus grande attention. Dans IDEA, ce sont des indicateurs qui servent à mesurer la durabilité des exploitations agricoles. Les indicateurs de durabilité sont divisés premièrement par volet soit les volets environnemental, économique et social. Par la suite, ces indicateurs sont reliés ensemble sous un même thème qu'on appelle les composantes. La représentation schématique d'IDEA est une approche par mosaïque. Un graphique selon cette approche permet

d'identifier en un seul coup d'œil les points forts et les points faibles de l'entreprise. La comparaison avec un groupe de fermes est aussi possible. La figure suivante démontre le résultat d'une entreprise. La section ombragée foncée représente l'entreprise individuelle et la section ombragée pâle, l'ensemble des fermes d'une même région.

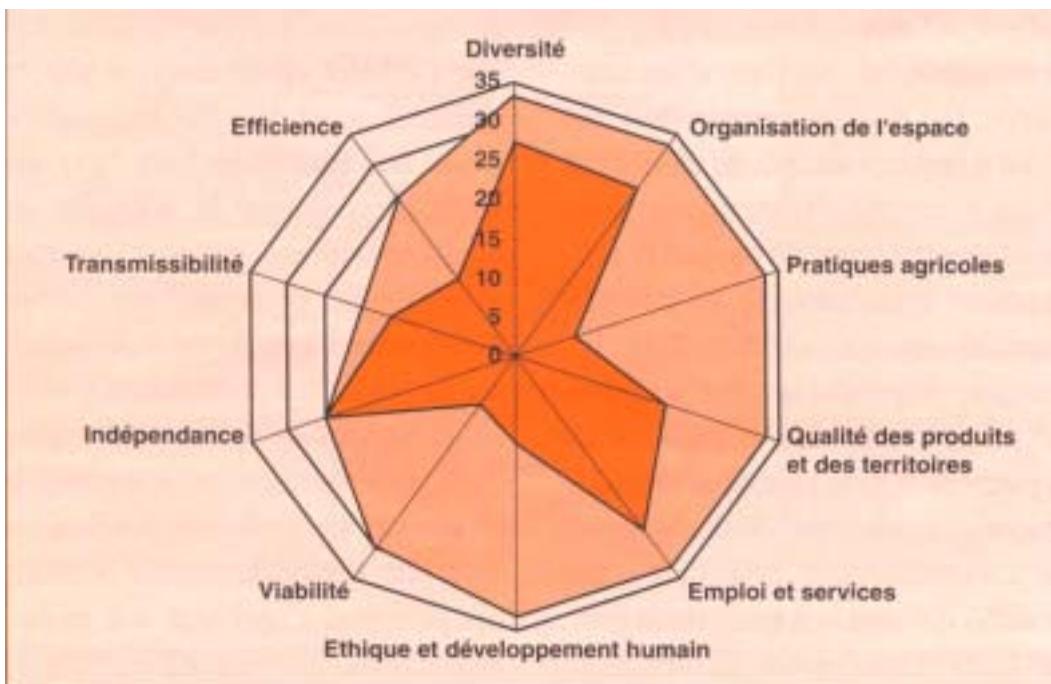


Figure 1 : Représentation graphique du niveau de durabilité pour une ferme selon la méthode IDEA

L'évaluation de la durabilité au Québec

L'objectif général du projet consiste à développer une méthode d'évaluation de la durabilité agroenvironnementale des fermes laitières québécoises. Afin d'atteindre cet objectif, les composantes de la durabilité agroenvironnementale du secteur laitier ont été identifiées et définies, ainsi que des indicateurs permettant d'évaluer l'état de chaque composante. Pour ce faire, 25 experts de tous les domaines de l'agriculture, y compris les producteurs, ont été consultés selon la technique Delphi, une méthode de recherche utilisée en sciences humaines (6). Par la suite, un *focus group* a été réalisé afin d'établir les indicateurs de durabilité. Les processus participatifs tels que la technique Delphi et le *focus group* sont reconnus pour être de bonnes méthodes dans le développement d'indicateurs (4).

À la suite des discussions, les composantes retenues sont l'état des ressources, les pratiques culturales, la gestion des matières fertilisantes et les aménagements agricoles. Dans chacune des composantes, des indicateurs plus précis font état de la situation sur une ferme donnée. Un système de pointage pour les indicateurs et une pondération de ceux-ci au sein de chaque composante ont été élaborés afin d'arriver à un score pour chaque ferme. Pour la validation des indicateurs, quarante fermes laitières ont été sélectionnées. Les fermes de l'enquête proviennent de deux régions agricoles contrastées au plan du développement agricole, soit la Montérégie et le

Bas-St-Laurent. Le tableau suivant présente l'ensemble des composantes et des indicateurs retenus par le processus.

Tableau 1 : Ensemble des composantes et des indicateurs retenus pour l'évaluation de la durabilité agroenvironnementale

Composante	Indicateur
État des ressources	Matière organique
	Saturation en phosphore
Pratiques culturales	Cultures annuelles <ul style="list-style-type: none"> • Travail de sol • Engrais vert • Rotation • Lutte intégrée
	Cultures pérennes
Gestion des matières fertilisantes	Structures d'entreposage
	Gestion des fumiers et des engrais minéraux
	Bilan Azote
	Bilan Phosphore
Aménagements	Bandes riveraines herbacées et arbustives
	Égouttement de surface et drainage
	Brise-Vent
	Pente
	Boisés

Des essais préliminaires de calculs finaux avec la pondération ont été faits pour quelques fermes de l'échantillon. Les résultats démontrent que des fermes semblables en termes de ressources et de production peuvent avoir des niveaux différents de durabilité. Les éléments évalués par les indicateurs expliquent les différences majeures qui font qu'un système est plus durable qu'un autre. L'analyse complète de ces quarante fermes se terminera dans le cadre du projet global incorporant les volets social et économique.

À l'issu du projet global, une méthode d'évaluation de la durabilité agroenvironnementale, sociale et économique des fermes laitières québécoises sera disponible. Cet outil de diagnostic à la ferme, simple d'utilisation pour le producteur et ses conseillers, facilitera l'identification des forces et faiblesses de l'entreprise ainsi que des avenues d'amélioration. Par la suite, la méthode pourra contribuer à améliorer l'efficacité des politiques agroenvironnementales et à établir des priorités en matière de développement durable dans le secteur agricole.

Références bibliographiques

1. Bockstaller, C. Girardin, P. van der Werf, H.M.G. 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farming systems. *Eur. J. Agron.* 7, 261-270.
2. Girardin, P. Bockstaller, C. van der Werf, H.M.G. 2000. Assessment of potential impacts of agricultural practices on the environment: the AGRO*ECO method. *Environ. Impact Assess. Rev.* 20, 227-239
3. Hansen, J.W. 1996. Is Agricultural Sustainability a Useful Concept?. *Agric. Syst.* 50, 117-143
4. King, C. Gunton, J. Freebairn, D. Coutts, J. Webb, I. 2000. The sustainability industry : where to from here ? A focus group study to explore the potential of farmer participation in the development of indicators. *Aust. J. Exp. Agric.* 40, 631-642
5. Lapointe, M. 2001. Vers une agriculture plus respectueuse de l'environnement. *Dans L'agriculture et l'environnement en harmonie. Compte rendu, Colloque en Agroenvironnement.* Drummondville. 14 pages.
6. Mayer, R. Ouellet, F. 2000. Méthodes de recherche en intervention sociale. Gaëtan Morin, éditeur. Boucherville, Québec.
7. Parent, D. 2001. D'une agriculture productiviste en rupture avec le territoire à une agriculture durable complice du milieu rural. *Téoros*, vol.20, no.2, été, p.22-25
8. van der Werf, H.M.G., Petit, J. 2002. Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicators-based methods. *Agri. Ecosyst. Environ.* 1922, 1-15.
9. Vilain, L. 2001.(Directeur de la rédaction). La méthode IDEA, indicateurs de durabilité des exploitations agricoles. Guide d'utilisation. Educagri Éditions. Dijon, France.

Différence alimentaire cations-anions (DACA) et teneur en cadmium (Cd) de graminées fourragères fertilisées au chlore (Cl)

Sophie Pelletier¹, Richard Simpson², Peter Randall², Gilles Bélanger¹, Gaëtan F. Tremblay¹, Philippe Seguin³, Raynald Drapeau⁴ et Guy Allard⁵

¹Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 boul. Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3; ⁴Normandin, QC, Canada G1M 4K3; ²CSIRO Plant Industry, GPO Box 1600, Canberra ACT 2601, Australie; ³Department of Plant Science, Macdonald Campus, McGill University, Sainte-Anne-de-Bellevue, QC, H9X 3V9; ⁵Département de phytologie, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec, QC, Canada G1K 7P4.

L'apport d'une ration anionique aux vaches laitières pré-partum aide à prévenir l'hypocalcémie (Sanchez, 1999). La susceptibilité d'une ration à prévenir la maladie est déterminée à l'aide de la différence alimentaire cations-anions (DACA). L'équation la plus utilisée pour calculer la DACA est la suivante:

$$\text{DACA (mmol}_c/\text{kg MS}) = (\text{K}^+ + \text{Na}^+) - (\text{Cl}^- + \text{S}^{2-}) \text{ (Ender et coll., 1971)}$$

La DACA de la ration servie aux vaches pré-partum devrait être de -50 mmol_c/kg MS pour prévenir l'hypocalcémie (Goff et Horst, 2003; Sanchez et Beede, 2004). Pour atteindre cette valeur, il est possible d'ajouter des sels anioniques à la ration sans affecter de manière importante la consommation de matière sèche à la condition d'avoir des fourrages à DACA inférieure à 250 mmol_c/kg MS (Horst et coll., 1997). Il est cependant difficile de produire un tel fourrage, car les sols sont souvent très riches en K, ce qui fait augmenter la DACA (Kayser et Isselstein, 2005).

La fléole des prés (*Phleum pratense* L.) est la graminée fourragère cultivée au Québec qui présente la concentration en K et la DACA les plus faibles (Tremblay et coll., 2006). De plus, la fertilisation chlorée contribue à réduire davantage la DACA de la fléole sans affecter son rendement (Pelletier et coll., 2007). Cependant, un contenu élevé en Cl dans le sol est associé à des teneurs élevées en Cd chez certaines espèces végétales (McLaughlin et coll., 1997). Le Cd est un métal lourd potentiellement toxique qui ne doit pas entrer dans la chaîne alimentaire. L'effet du Cl sur la teneur en Cd de la plante varie en fonction des caractéristiques du sol (pH, texture, matière organique), de la provenance du Cd (géogénique, fertilisants, amendements) et de l'espèce de plantes (McLaughlin et coll., 1997; Adams et coll., 2004).

L'objectif de la présente étude était de déterminer l'impact de la fertilisation chlorée sur la DACA et la concentration en Cd de 1) la fléole des prés cultivée dans des sols pauvres en Cd; et 2) la fléole des prés et l'alpiste aquatique cultivés dans des sols riches en Cd.

Matériel et méthodes

EXPÉRIENCE 1 : Cet essai a été réalisé avec le cultivar Champ de la fléole des prés dans quatre champs de la province de Québec présentant différentes teneur en K du sol (Normandin, 311 kg K/ha; Sainte-Anne-de-Bellevue, 290 kg K/ha; Saint-Augustin, 199 kg K/ha; Sainte-Perpétue, 124 kg K/ha). Quatre traitements de fertilisation chlorée ont été appliqués : 0, 80, 160 et 240 kg Cl/ha

sur une base annuelle sous forme de CaCl_2 . Ces traitements étaient combinés à une fertilisation azotée de 70 ou 140 kg N/ha sous forme de NH_4NO_3 . Les applications ont été divisées en deux : 60 % au printemps et 40 % après la récolte de juin. Les doses d'applications de Cl étaient donc de 0, 48, 96 et 144 kg Cl/ha au printemps et de 0, 32, 64 et 96 kg Cl/ha après la première coupe. La DACA de la fléole des prés a été calculée pour tous ces traitements. La concentration en Cd de la fléole a pour sa part été mesurée pour les doses annuelles de 0, 80, 160 et 240 kg Cl/ha combinées à la dose de 140 kg N/ha, à la récolte du printemps seulement.

EXPÉRIENCE 2: Cet essai a été réalisé en serre à Canberra en Australie, avec le cultivar Viking de la fléole des prés, et les cultivars Sirosa et AT 98 de l'alpiste aquatique (*Phalaris aquatica L.*). Les graminées ont été semées dans deux paires de sols provenant de deux fermes différentes. Le sol '+ Super' de la première paire de sols a été fertilisé au superphosphate contenant des traces de Cd et le sol '0 Super' n'a reçu aucune fertilisation. Le sol '+ Bio' de la deuxième paire de sols a été amendé avec des biosolides contaminés au Cd et le sol '0 Bio' n'a pas été amendé. Quatre traitements de fertilisation chlorée ont été appliqués : 0, 80, 160 et 240 kg Cl/ha sur une base annuelle sous forme de CaCl_2 . Les applications ont été divisées en deux : 40 et 60 % après 14 et 28 jours de croissance respectivement. Pour assurer une croissance optimale, les graminées ont reçu les doses recommandées de N, P, S, Cu, Mo et Zn en fonction des analyses de sol.

Résultats

DACA et concentrations en Cl et K des fourrages

EXPÉRIENCE 1 : La fertilisation en Cl a fait augmenter la concentration en Cl et diminuer la DACA de la fléole des prés (Tableau 1), et ce, peu importe le niveau de fertilisation azotée (données non présentées). La DACA de la fléole était plus faible lorsque cultivée sur les sols à faible disponibilité en K et plus élevée sur les sols à forte disponibilité en K (Tableau 1). En l'absence de fertilisation chlorée, la concentration en K et la DACA de la fléole des prés ont augmenté avec la fertilisation azotée sur les sols à disponibilité élevée en K (données non présentées). Enfin, la DACA a été affectée par la période de croissance; elle était plus élevée à la première qu'à la deuxième coupe (données non présentées). Cependant, les rendements étaient plus élevés à la première coupe comparativement à la deuxième coupe (données non présentées).

EXPÉRIENCE 2 : La fertilisation chlorée a augmenté la concentration en Cl et diminué la DACA de chaque graminée fourragère de l'expérience (Tableau 2). Cependant, la diminution de DACA était moins importante chez la fléole des prés comparativement aux deux cultivars d'alpiste aquatique, due à une augmentation moins forte de la concentration en Cl chez la fléole avec la fertilisation chlorée. Parce que la fléole avait également une faible concentration en K, elle présentait quand même la DACA la plus faible des trois graminées. Enfin, la diminution de DACA était plus grande sur les sols à faible teneur en Cl au début de l'expérience comparativement aux sols à haute teneur en Cl.

Rendement des fourrages

Pour les deux expériences, la fertilisation au Cl n'a pas affecté les rendements des graminées fourragères (données non présentées).

Teneur en Cd des sols

Les sols australiens contaminés au Cd (+ Super, 7 µg Cd/kg; + Bio, 109 µg Cd/kg) contenaient plus de Cd que leur témoin non contaminé (0 Super, 5 µg Cd/kg; 0 Bio, 4 µg Cd/kg). Les teneurs en Cd des sols canadiens étaient nettement plus faibles et moins variables (0,02 à 1,37 µg Cd/kg).

Concentration en Cd des fourrages

EXPÉRIENCE 1 : La fertilisation au Cl a augmenté la concentration en Cd de la fléole, mais seulement aux sites de Saint-Augustin et Sainte-Anne-de-Bellevue (Tableau 1). La concentration en Cd de la fléole n'était pas reliée à la teneur en Cd des sols. En effet, au site de Saint-Augustin, la concentration en Cd de la fléole était la plus élevée (0,04 mg/kg MS), alors que la teneur en Cd du sol était la plus faible (0,02 µg/kg) des quatre sites.

EXPÉRIENCE 2 : La concentration en Cd des graminées n'a pas été influencée par la fertilisation en Cl (Tableau 2). Cependant, des différences ont été observées entre les types de sols. Les concentrations en Cd des graminées étaient plus élevées dans les sols contaminés (+ Super et + Bio) comparativement aux sols non contaminés (0 Super et 0 Bio) en Cd. De plus, les concentrations en Cd des graminées étaient nettement supérieures lorsque cultivées dans le sol + Bio comparativement aux autres sols. La concentration en Cd des graminées a aussi été affectée par l'espèce de graminée; elle était plus élevée chez le cultivar AT 98 comparativement au cultivar Sirosa de l'alpiste aquatique, tandis que la fléole des prés avait une concentration en Cd beaucoup plus faible que celle des deux cultivars d'alpiste aquatique.

Conclusion

La fertilisation chlorée a causé une diminution de la DACA de la fléole des prés et de l'alpiste aquatique sans affecter les rendements. La diminution de DACA a été influencée par la teneur initiale en K et Cl du sol, l'espèce de graminée et la période de croissance. La concentration en Cd de la plante a été affectée par le type de sol et l'espèce de graminées; la fertilisation chlorée appliquée pour réduire la DACA des fourrages n'a eu qu'un effet très limité sur la concentration en Cd des graminées.

La fertilisation chlorée appliquée pour réduire la DACA des graminées fourragères ne présente donc pas de risque d'augmenter la teneur en Cd des fourrages à des niveaux potentiellement toxiques.

Références bibliographiques

- Adams, M.L., F.J. Zhao, S.P. McGrath, F.A. Nicholson et B.J. Chambers. 2004. Predicting cadmium concentrations in wheat and barley grain using soil properties. *Journal of Environmental Quality*, 33, 532-541.
- Ender, F., I.W. Dishington et A. Helgebostad. 1971. Calcium balance studies in dairy cows under experimental induction and prevention of hypocalceamic paresis puerperalis. *Zeitschrift für Tierphysiologie, Tierernährung und Futtermittelkunde*, 28, 233-256.
- Goff, J.P. et R.L. Horst. 2003. Role of acid-base physiology on the pathogenesis of parturient hypocalcaemia (milk fever) – the DCAD theory in principal and practice. *Acta Veterinaria Scandinavica*, (Suppl. 97), 51-56.
- Horst, R.L., J.P. Goff, T.A. Reinhardt et D.R. Buxton. 1997. Strategies for preventing milk fever in dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 80, 1269–1280.
- Kayser, M. et J. Isselstein. 2005. Potassium cycling and losses in grassland systems: a review. *Grass and Forage Science*, 60, 213–224.
- McLaughlin, M.J., N.A. Maier, G.E. Rayment, L.A. Sparrow, G. Berg, A. McKay, P. Milham, R.H. Merry et M.K. Smart. 1997. Cadmium in Australian potato tubers and soils. *Journal of Environmental Quality*, 26:1644-1649.
- 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 Cl and N fertilization. *Grass and Forage Science*. 62:66-77.
- Sanchez, W.K. 1999. Another new look at DCAD for the prepartum dairy cow. [En ligne] <http://www.txanc.org/proceedings/1999/newlookprepartum.pdf>.
- Sanchez, W.K. et D.K. Beede. 2004. Recent advances in the use of dietary cation-anion difference (DCAD) for transition dairy cows. Pages 201-222, *Dans Recent advances in animal nutrition*, P.C. Garnsworthy et J. Wiseman, éditeurs. Nottingham University Press, Nottingham.
- Tremblay, G.F., H. Brassard, G. Bélanger, P. Seguin, R. Drapeau, A. Brégard, R. Michaud et G. Allard. 2006. Dietary cation-anion difference (DCAD) of five cool-season grasses. *Agronomy Journal*, 98, 339-348.

Tableau 1. Résultats partiels de l'expérience 1 : différence alimentaire cations-anions (DACA) et concentration en Cd de la fléole des prés cultivée dans quatre champs de la province de Québec et fertilisée avec quatre doses de Cl combinée à une dose d'azote (moyenne de deux années, 2003 et 2004).

		Sainte-Anne-de-Bellevue		Normandin		Saint-Augustin		Sainte-Perpétue	
		DACA mmol _c /kg	Cd mg/kg						
0	140	479	0,0036	442	0,0000	409	0,0091	200	0,0132
48	140	353	0,0055	368	0,0002	225	0,0242	24	0,0125
96	140	265	0,0054	319	0,0002	182	0,0225	14	0,0189
144	140	225	0,0047	289	0,0007	143	0,0356	19	0,0187

Tableau 2. Résultats de l'expérience 2 : différence alimentaire cations-anions (DACA) et concentration en Cd d'un cultivar de fléole des prés (Viking) et de deux cultivars d'alpiste aquatique (Sirosa et AT 98) cultivés dans quatre sols récoltés dans la région de Canberra, Australie, et fertilisés avec quatre traitements de Cl.

Type de sol	Application de Cl (kg/ha)	Fléole des prés cv. Viking		Alpiste aquatique cv. Sirosa		Alpiste aquatique cv. AT 98	
		DACA mmol _c /kg	Cd mg/kg	DACA mmol _c /kg	Cd mg/kg	DACA mmol _c /kg	Cd mg/kg
0 Super	0	802	0,05	995	0,06	957	0,09
	80	549	0,04	676	0,10	642	0,10
	160	452	0,04	378	0,10	421	0,12
	240	438	0,05	243	0,10	381	0,10
+ Super	0	795	0,12	692	0,26	899	0,26
	80	504	0,11	578	0,26	678	0,28
	160	393	0,10	425	0,25	859	0,34
	240	367	0,14	292	0,24	550	0,31
0 Bio	0	774	0,10	1037	0,18	881	0,20
	80	655	0,11	750	0,19	685	0,19
	160	669	0,07	838	0,18	496	0,22
	240	703	0,10	721	0,18	661	0,22
+ Bio	0	636	0,54	511	2,14	482	2,48
	80	607	0,59	364	1,92	382	2,35
	160	564	0,57	312	2,27	342	2,52
	240	585	0,71	205	1,99	126	2,49

Effet de l'inoculation avec le *Fusarium graminearum* et de l'étanchéité des silos sur la production des mycotoxines et sur l'efficacité des agents de conservation dans l'ensilage de maïs épi humide

André Amyot¹ et Luc Couture²

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

²Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 boul. Hochelaga, Québec (Québec) G1V 2J3.

Introduction

Le maïs épi humide est un aliment énergétique utilisé en production bovine mais qui est susceptible de présenter, par temps chaud, des problèmes de stabilité aérobie se manifestant par une augmentation de la température. Les pertes qui s'ensuivent peuvent être très importantes et souvent avec des effets néfastes sur la santé et les performances des animaux par la présence de moisissures et de mycotoxines. Le *Fusarium graminearum* est la principale moisissure productrice de mycotoxine chez le maïs au Québec. Il contamine le maïs au champ pendant la saison de culture et peut élaborer des toxines dans les plantes infectées. Nous ne savons pas jusqu'à quel point il peut survivre en silo si les conditions ne sont pas complètement anaérobies. Différents agents de conservation peuvent être utilisés pour inhiber le développement des moisissures dans l'ensilage de maïs épi humide (acide propionique, ammoniac gazeux ou aqueux et certains inoculants). Or, nous avons très peu d'information concernant l'efficacité de ces agents. L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer l'effet des inoculants bactériens homolactique et hétérolactique et de l'ammoniaque sur la fermentation et la stabilité aérobie du maïs épi humide. De façon plus spécifique, on étudie l'effet de l'inoculation avec le *F. graminearum* et celui de l'étanchéité des silos sur la production de mycotoxines et sur l'efficacité des agents de conservation d'ensilage chez le maïs épi humide.

Méthodologie

Du maïs épi humide, inoculé ou non avec le *F. graminearum* lors de la mise en silo, a été ensilé dans des silos de laboratoire après l'un ou l'autre des traitements suivants :

- Aucun traitement (témoin);
- Ammonification (ammoniac aqueux 29,5 % NH₃; 16 kg/t de maïs épi humide);
- Inoculant bactérien homofermenteur Biomax HMC (*Lactobacillus plantarum* et *Enterococcus faecium*), 0,9 x 10⁵ ufc/g de maïs épi humide;
- Inoculant bactérien hétérofermenteur Sila-Bac 11A44 (*Lactobacillus buchneri*), 1 x 10⁵ ufc/g de maïs épi humide.

Les silos ont été entreposés dans une pièce dont la température a été ajustée en continu pour reproduire celle d'un ensilage de maïs épi humide réalisé en silo boudin. Des silos ont été gardés hermétiques pendant les 225 jours d'entreposage alors que d'autres ont été légèrement perforés après 45 jours. Après l'ouverture des silos, on a mesuré la perte de matière sèche, les paramètres de la fermentation, les populations de levures, de moisissures et des *Fusarium* et finalement la teneur en vomitoxine et en zéaralénone dans l'ensilage. Aussi, on a réalisé un test de stabilité

aérobie au cours duquel on a suivi la température en continu, mesuré le pH, évalué le développement des moisissures et déterminé la perte de matière sèche après 7 jours d'exposition à l'air.

Résultats

Fusarium et mycotoxines

Les *Fusarium* n'ont pas survécu jusqu'à l'ouverture des silos et l'inoculation du *F. graminearum* n'a pas influencé la fermentation ni la stabilité aérobie du maïs épi humide, tant dans les silos qui ont perdu leur étanchéité après 45 jours que dans ceux qui sont restés hermétiques pendant les 225 jours de l'expérience. Quant à la teneur en vomitoxine, elle a été quelque plus élevée dans le maïs inoculé avec le *F. graminearum* que dans celui non inoculé (3,35 vs 2,96 mg/kg MS ; P=0,067) et plus faible dans le maïs traité à l'ammoniaque que dans celui traité avec l'inoculant bactérien hétérolactique (2,73 vs 3,56 mg/kg MS) (**figure 1**). Par ailleurs elle n'a pas été influencée par la perte d'étanchéité après 45 jours.

Fermentation

Le traitement à l'ammoniaque a inhibé fortement la fermentation (pH : 7,5 vs 4,3 ; acide lactique 0,3% vs 1,3%) et a préservé plus de sucres solubles (3,3% vs 1,7%) que le témoin, quel que soit le niveau d'étanchéité des silos. Les inoculants bactériens ont eu des effets beaucoup moins prononcés. Ainsi, en silos étanches, l'inoculant homolactique a donné un ensilage avec un rapport lactate : acétate plus élevé que le témoin (4,1 vs 3,3), grâce à une moindre production d'acide acétique ; il n'y a pas eu de tel effet en silos non étanches. Quant à l'inoculant hétérolactique, il a favorisé une production d'acide acétique légèrement plus élevée que le témoin (0,6% vs 0,5%) attribuable à la transformation d'une partie de l'acide lactique en acide acétique, quelle que soit l'étanchéité des silos. La perte d'étanchéité des silos en cours d'entreposage a entraîné une diminution de la teneur en acide lactique (en moyenne 0,9% vs 1,2%) et une augmentation du pH (en moyenne 5,2 vs 4,9), plus ou moins prononcées selon l'agent.

Croissance fongique pendant l'entreposage

Quel que soit l'agent de conservation, le compte des levures a été plus élevé en silos non étanches qu'en silos étanches (6,76 vs 4,14 log ufc/g). Aussi, dans les silos étanches, le compte des moisissures (1,65 log ufc/g) et la perte de matière sèche (1,4%) ont été relativement faibles et comparables, quel que soit l'agent utilisé. En silos non étanches, seul le traitement à l'ammoniaque a réduit significativement le compte des moisissures (4,67 vs 6,87 log ufc/g) et la perte de matière sèche (2,3% vs 5,8%) par rapport au témoin.

Stabilité de l'ensilage après l'ouverture du silo

Le maïs des silos non étanches a commencé à chauffer (indice de stabilité aérobie) après 5 à 7 heures d'exposition à l'air et celui des silos étanches uniquement après 36 à 138 heures, selon l'agent utilisé, mais aucun traitement n'a été significativement différent du témoin (**figure 2**). Cependant, c'est l'inoculant bactérien hétérolactique qui a fait meilleure figure, avec un taux d'augmentation de température (indice d'instabilité aérobie) plus faible que le témoin, tant en silos non étanches (8,9°C/j vs 12,6°C/j ; P<0,0001) qu'en silos étanches (3,8°C/j vs 5,5°C/j ; P=0,0753) (**figure 3**). Après 7 jours d'exposition à l'air, la perte de matière sèche a été plus faible dans les silos étanches que dans les silos non étanches (en moyenne 2,4% vs 10,3%) et dans le maïs traité avec l'inoculant bactérien hétérolactique que dans chacun des autres traitements (en moyenne 5,0% vs 6,4% à 7,2%). La perte de matière sèche totale, c'est-à-dire celle subie pendant la période de conservation plus celle cumulée après 7 jours d'exposition à l'air, a été comparable,

quel que soit l'agent de conservation utilisé en silos étanches. Dans les silos non étanches, cette perte a été plus faible que chez le témoin (16,1%) en ensilage traité à l'ammoniaque (12,4%) et celui traité avec l'inoculant bactérien hétérolactique (14,1%) (**figure 4**).

Conclusion

Les *Fusarium* ne survivent pas en ensilage et le niveau d'infestation par le *F. graminearum* n'influence pas la fermentation ni la stabilité aérobiose du maïs épi humide lorsque le silo est hermétique au début de la période de conservation. Quant à la teneur en vomitoxine, elle n'est pas influencée par une perte d'étanchéité en cours d'entreposage mais elle est plus faible dans le maïs traité à l'ammoniaque que dans celui traité avec l'inoculant bactérien hétérolactique. Ce résultat semble indiquer que même si les *Fusarium* ne survivent pas longtemps en ensilage, l'utilisation d'un agent de conservation peut quand même permettre d'influencer légèrement la teneur en vomitoxine du maïs épi humide.

L'inoculant bactérien homolactique améliore la fermentation du maïs épi humide entreposé en silo étanche mais pas sa stabilité aérobiose. Par contre, l'inoculant bactérien hétérolactique semble le traitement qui a le plus de potentiel pour réduire le chauffage du maïs après l'ouverture du silo et la perte de matière sèche qui en résulte. Cependant, dans les conditions de cette expérience, son effet sur le chauffage a été mitigé et le mécanisme responsable des améliorations observées n'est pas apparent. Ceci suggère qu'une dose d'inoculation du *L. buchneri* supérieure à 1×10^5 ufc/g pourrait être nécessaire pour atteindre une production suffisante d'acide acétique, une réduction significative des levures et une amélioration marquée de la stabilité aérobiose du maïs au début de juin sous les conditions du Québec.

Quant à l'ammoniaque à la dose de 16 kg/t de maïs épi humide, c'est un traitement efficace pour réduire la perte de matière sèche en silo non étanche. Cet effet rapide vient principalement du fait qu'il diminue de façon marquée les populations de levures et de moisissures au moment de la mise en silo. Cependant, cette dose semble insuffisante pour améliorer la stabilité aérobiose du maïs épi humide exposé à l'air de façon prolongée, parce que le pH du maïs ainsi traité est presque neutre, sa teneur en sucres solubles élevée et l'acide acétique principalement sous forme dissociée (sel), à un tel pH. Au contraire, le maïs ainsi traité risque de chauffer plus rapidement que le non traité après l'ouverture d'un silo qui n'aurait pas été maintenu étanche pendant toute la période de conservation.

Le choix de l'un ou l'autre de ces traitements sera dicté principalement par l'objectif visé, puisque le coût de revient du traitement à l'ammoniaque est comparable à celui avec un inoculant bactérien hétérolactique, lorsque celle-ci est achetée en vrac et qu'on tient compte de la valeur de l'enrichissement du maïs en azote ammoniacal. L'ammoniaque peut être un bon choix si l'objectif est de réduire la teneur en vomitoxine du maïs épi humide ou la perte de matière sèche causée par un entreposage dans un silo non étanche. Lorsque l'objectif est de réduire le chauffage du maïs épi humide après l'ouverture du silo et la perte de matière sèche qui en résulte, l'inoculant bactérien hétérolactique semble un meilleur choix.

Remerciements

Nous tenons à remercier la Fédération des producteurs de bovins du Québec, la Coopérative fédérée de Québec et Pioneer Hi-Bred Limited pour le soutien financier accordé à cette

recherche, de même que le Centre de recherche en sciences animales de Deschambault qui a mis ses installations à notre disposition.

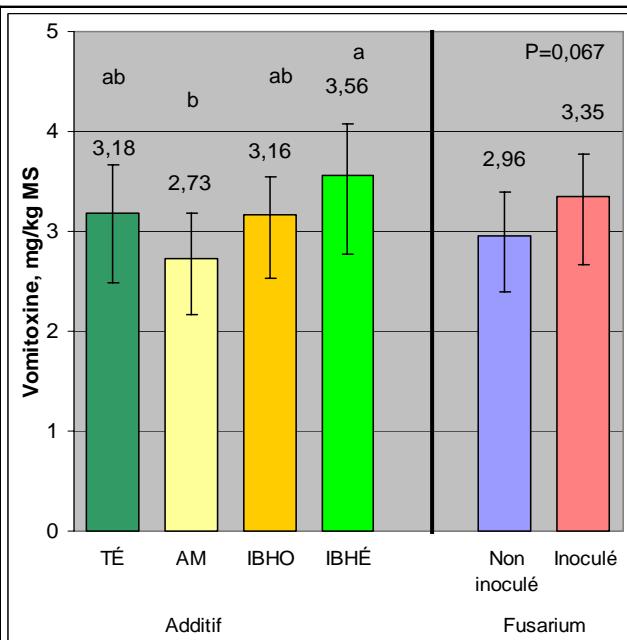


Figure 1. Effet des agents de conservation¹ et de l'inoculation avec le *Fusarium graminearum*² sur la teneur en vomitoxine du maïs épi humide.

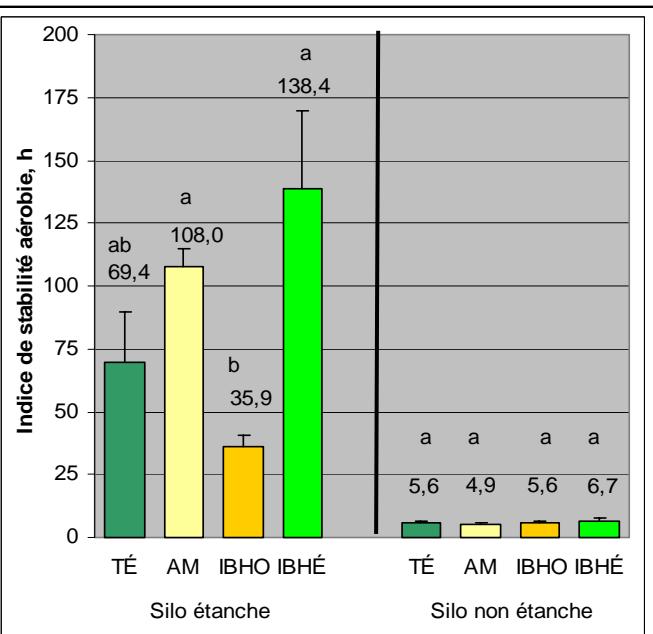


Figure 2. Effet des agents de conservation¹ et de l'étanchéité des silos³ sur l'indice de stabilité aérobique du maïs épi humide.

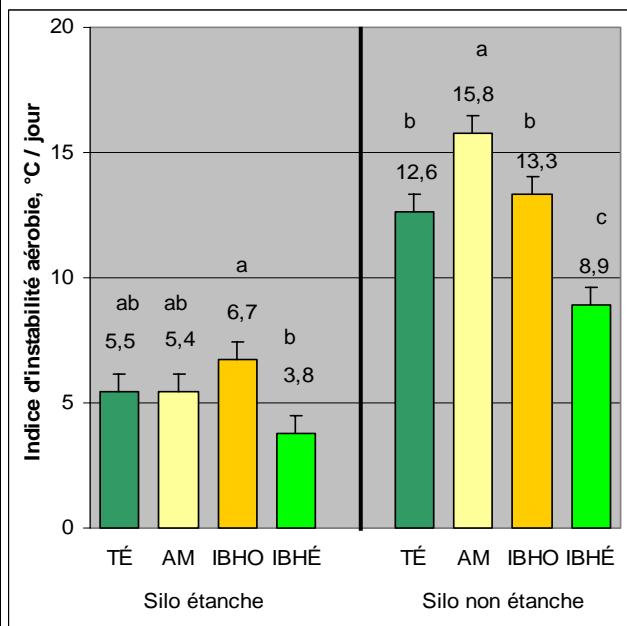


Figure 3. Effet des agents de conservation¹ et de l'étanchéité des silos³ sur l'indice d'instabilité aérobie du maïs épi humide.

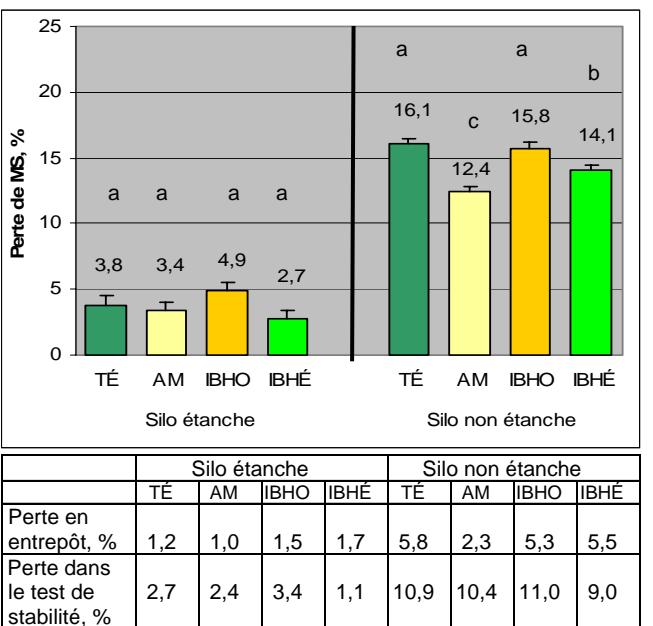


Figure 4. Effet des agents de conservation¹ et de l'étanchéité des silos³ sur la perte de matière sèche du maïs épi humide.

¹TÉ = témoin ; AM = ammoniaque ; IBHO = inoculant bactérien homolactique ; IBHÉ = inoculant bactérien hétérolactique.

² Maïs épi humide non inoculé ou inoculé au taux de $2,5 \times 10^2$ spores/g de poids frais.

³ Silos étanches pendant les 225 jours d'entreposage ou rendus non étanches après 45 jours.

⁴ Les valeurs sont les moyennes des moindres carrés alors que les barres sont les intervalles de confiance ($\alpha=0,05$) pour la vomitoxine et les erreurs types pour les autres paramètres. Pour chaque groupe de données, les moyennes marquées par une même lettre ne sont pas significativement différentes ($P>0,05$) selon l'ajustement de Tukey-Kramer.