



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

Mercredi, le 12 février 2014

Organisée par le
Comité des plantes fourragères du CRAAQ
en collaboration avec le
Conseil Québécois des Plantes Fourragères (CQPF)

COMPTES-RENDUS DES CONFÉRENCES
Victoriaville, Québec

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

AVANT-PROPOS

L'innovation en production fourragère est non seulement souhaitable mais essentielle à plusieurs égards pour renforcer l'économie et assurer la durabilité du secteur agricole québécois. Elle aide les producteurs laitiers et de bœuf à rencontrer les besoins alimentaires toujours croissants d'une génétique animale en constante progression. Elle permet également de soutirer le plein potentiel fourrager de nos terres dans un cadre de gestion environnementale qui garantit le maintien du patrimoine agricole pour les générations futures. La recherche et le développement est un élément déterminant pour l'adaptation à un contexte socio-économique et à des conditions climatiques qui évoluent de plus en plus rapidement. Depuis plusieurs années, le Comité Plantes Fourragères du Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec et le Conseil Québécois des Plantes Fourragères organisent conjointement une demi-journée de communications scientifiques qui font état de travaux de recherche sur la production fourragère sous nos conditions de production. La variété et la qualité des sujets dénotent un dynamisme soutenu dans la recherche en plantes fourragères au Québec. Cette vigueur toujours renouvelée favorise l'essor du secteur agricole et nous aidera à répondre aux défis de demain.

Yves Castonguay, président,
Comité Plantes Fourragères du CRAAQ

TABLE DES MATIÈRES

1- Un fourrage enrichi en sélénium pour les vaches laitières: aspects agronomiques. <u>Gaëtan Tremblay</u>	4
2- Un fourrage enrichi en sélénium pour les vaches laitières : expérience animale. <u>R. Seboussi</u> ..	7
3- Les effets de l'augmentation du CO ₂ et de la température sur les mélanges luzerne-fléole cultivés en « Open-Top Chambers ». <u>Jonathan Messerli</u>	16
4- Une espèce fourragère c'est bien mais deux c'est mieux. <u>Gilles Bélanger</u>	20
5- Nouvelle approche de sélection assistée par marqueurs dans le développement d'une luzerne plus résistante aux maladies. <u>Patrice Audy</u>	23
6- Chantiers de récolte de foin sec en vrac haché ou en balles rondes. <u>Jocelyn Marceau</u>	26
7- Détermination de la longueur et caractérisation de la forme des particules de fourrage haché par l'analyse d'images. M.-A. Audy-Dubé	32
8- Capacité au champ, consommation énergétique et émissions de gaz à effet de serre durant la fenaison. <u>René Morissette</u>	41

UN FOURRAGE ENRICHI EN SÉLÉNIUM POUR LES VACHES LAITIÈRES : ASPECTS AGRONOMIQUES

GAËTAN TREMBLAY¹, GILLES BÉLANGER¹, JULIE LAJEUNESSE², YVAN CHOUINARD³ ET ÉDITH CHARBONNEAU³

^{1,2} Agriculture et Agroalimentaire Canada, ¹Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Québec, QC, G1V 2J3; ²Ferme de recherche, Normandin, QC, G8M 4K3; ³Département des sciences animales, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec, QC, G1V 0A6.
Courriel: gaetan.tremblay@agr.gc.ca

INTRODUCTION

Le sélénium (Se) est un micronutriment essentiel et une déficience en Se est observée chez les animaux domestiques qui sont nourris d'aliments ou de rations contenant moins de 0,1 mg Se/kg matière sèche (MS). De façon générale, les aliments cultivés dans les plaines des États-Unis et du Canada contiennent plus de 0,1 mg Se/kg MS alors que ceux cultivés à l'est du Mississipi et à l'ouest des Rocheuses contiennent moins de 0,1 mg Se/kg MS (Gupta et Gupta, 2000). Dans les zones où le sol est très peu pourvu en Se, la supplémentation de la ration en Se est une pratique courante. Le Se peut aussi être ajouté aux fertilisants afin d'accroître la teneur en Se des fourrages et des grains servis aux animaux. C'est une pratique courante en Nouvelle-Zélande et en Finlande qui s'est avérée efficace et inoffensive pour l'environnement (Oldfield, 1998). Le gouvernement finlandais demande en effet aux producteurs d'ajouter du Se aux fertilisants.

Au Canada, une application de 10 g Se/ha permettrait d'accroître suffisamment la teneur en Se des aliments pour rencontrer les besoins des ruminants (Gupta et Gupta, 2000). De plus, la biodisponibilité du Se de sources organiques serait d'environ deux fois celle des sources inorganiques de Se généralement ajoutées aux rations (Pehrson et coll., 1989); la fertilisation en Se serait alors plus avantageuse que la supplémentation de la ration en Se inorganique. Au Québec, Bachand et Mailloux (1999) rapportaient qu'une application de 5 g/ha de Se à dégagement lent, soit une application de 0,5 kg/ha de Selcote Ultra[®], permettrait de maintenir une teneur en Se acceptable pendant toute la saison de croissance tout en demeurant sécuritaire pour l'environnement. Le présent projet avait pour objectif de quantifier l'évolution de la teneur en Se du fourrage en fonction de la dose de Se appliquée au printemps sur trois sites québécois.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Des doses de 0, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 et 2,5 kg/ha de granules de Se à dégagement lent [Selcote Ultra[®] contenant 1% de Se dans une proportion 1:3 de sélénate de sodium (Na_2SeO_4) et de sélénate de baryum (BaSeO_4)] correspondant respectivement à des doses de 0, 5, 10, 15, 20 et 25 g Se/ha, ont été appliquées sur des parcelles de 2 × 4 m à Deschambault et Lévis et de 2 × 6 m à Normandin dans un dispositif en blocs complets aléatoires avec 4 répétitions (6 traitements × 4 répétitions = 24 parcelles/site). Les quantités de Selcote Ultra[®] à appliquer sur chaque parcelle ont d'abord été mélangées à celles des engrais N, P et K afin d'assurer l'uniformité de l'application qui a été faite au printemps 2010. L'application printanière de P et K a été faite en fonction des analyses de sol alors que des applications de 70 et 40 kg N/ha ont été faites au printemps et après la première coupe, respectivement. Les parcelles de fléole des prés ont par la suite été récoltées en 1^{re} et 2^e

coupe de 2010 sur les trois sites de même qu'en 1^{re} coupe de 2011 à Lévis et Normandin. Le rendement et les teneurs en Se, N, P et NDF du fourrage ont été mesurés.

RÉSULTATS

L'application printanière de Se sous forme de Selcote Ultra[®] a causé une augmentation linéaire de la teneur en Se de la fléole des prés de 1^{re} coupe, et ce, aux trois sites de l'étude. Elle a de plus eu des effets résiduels en 2^e coupe de l'année d'application et en 1^{re} coupe de l'année suivant l'application. En moyenne pour les trois sites, l'application printanière de 1,0 kg de Selcote Ultra[®]/ha (10 g Se/ha) a permis de produire un fourrage de fléole des prés ayant une teneur de 0,30 mg Se/kg MS lors de la 1^{re} coupe qui a suivi l'application et d'une teneur d'environ 0,15 mg Se/kg MS lors de la 2^e coupe de l'année d'application et de la 1^{re} coupe de l'année suivante (figure 1). L'application de Se n'a pas eu d'effet sur le rendement en MS de même que sur les teneurs en N, P et NDF du fourrage de fléole des prés.

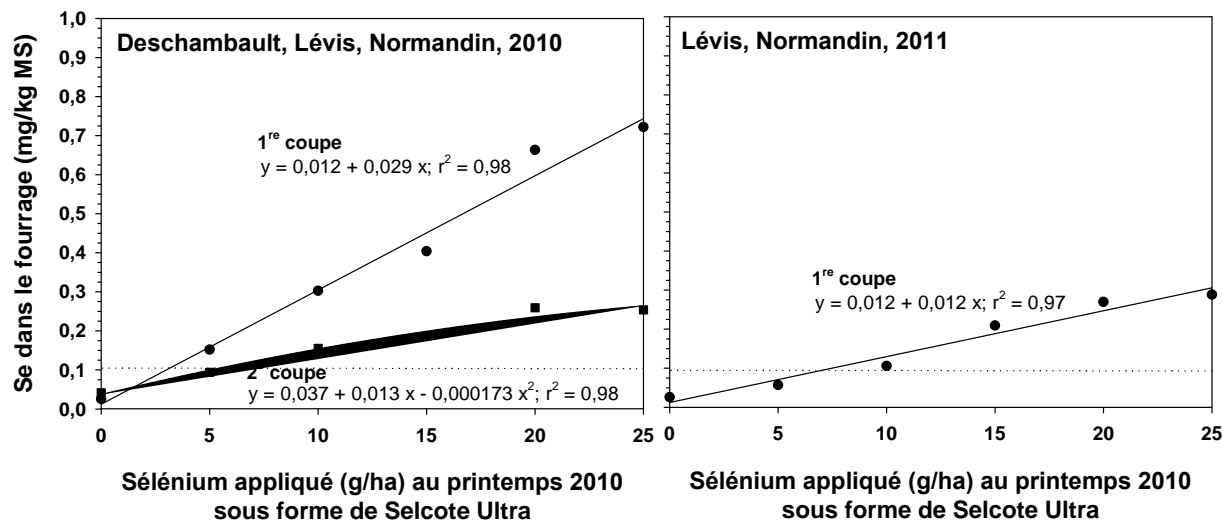


Figure 1. Effet moyen de l'application de sélénium (Se) sous forme de granules à dégagement lent (Selcote Ultra[®]) au printemps 2010 sur la teneur en Se du fourrage contenant plus de 90% de fléole des prés aux deux premières coupes de l'année d'application (2010) aux trois sites de l'étude et à la première coupe de l'année suivante (2011) à deux des trois sites.

CONCLUSIONS

L'application printanière de 1 kg de Selcote Ultra[®]/ha (10 g Se/ha) permet de produire du fourrage de fléole des prés contenant plus de 0,1 mg de Se/kg MS en première et deuxième coupes de l'année d'application de même qu'en première coupe de l'année qui suit l'application.

Il serait donc envisageable de remplacer la supplémentation en Se inorganique de la ration des ruminants par la fertilisation en Se des fourrages. Cette dernière fertilisation aurait alors l'avantage de fournir à l'animal le Se sous forme organique qui est mieux absorbé et utilisé par le ruminant.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été financé par les Producteurs laitiers du Canada (PLC) et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) du Canada dans le cadre du programme « Subvention de recherche et développement coopérative – 2010-2013 ». Le projet ayant pour titre « Amélioration du statut antioxydant de la vache et de la santé humaine en utilisant du fourrage riche en sélénium » fut mené par Édith Charbonneau en collaboration avec Yvan Chouinard, Gaëtan Tremblay, Younes Chorfi, Gilles Bélanger et Yvon Couture. Il fut appuyé par le Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD). Les auteurs tiennent à remercier sincèrement Danielle Mongrain, Rabiha Séboussi, Mario Laterrière, Véronique Ouellet et Jean-Noël Bouchard pour le travail au champ et en laboratoire.

RÉFÉRENCES

- Bachand, D. et A. Mailloux. 1999. Le sélénium dans les graminées. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages, CRAAQ, [Comptes-rendus de conférences, p. 3-4](#).
- Gupta, U.C. et S.C. Gupta. 2000. Selenium in soils and crops, its deficiencies in livestock and humans: Implications for management. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 31:1791–1807.
- Oldfield, J.E. 1998. Environmental implications of uses of selenium with animals. *dans* *Environmental chemistry of selenium*, eds: W.T. Frankenberger, R.A. Engberg, CRC Press, pages 129-142.
- Pehrson, B., M. Knutsson et M. Gyllenswärd. 1989. Glutathione peroxidase activity in heifers fed diets supplemented with organic and inorganic selenium compounds. *Swed. J. Agric. Res.* 19:53-56.

UN FOURRAGE ENRICHİ EN SÉLÉNIUM POUR LES VACHES LAITIÈRES : EXPÉRIENCE ANIMALE

R. SEBOUSSI¹, V. OUELLET¹, P.Y. CHOUINARD¹, G.F. TREMBLAY², G. BÉLANGER², Y. CHORFI³,
A. FOURNIER⁴, Y. COUTURE³ ET E. CHARBONNEAU¹

¹Département des sciences animales, Université Laval, Québec, Qc;

² Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Québec, Qc;

³ Faculté de médecine vétérinaire, Université de Montréal, St-Hyacinthe, QC;

⁴ MAPAQ, Nicolet, QC.

Courriel: edith.charbonneau@fsaa.ulaval.ca

Le sélénium (Se) est un nutriment dont l'ajout dans les rations animales est très réglementé. Il est toutefois connu que son apport peut être limitant pour maintenir un bon statut antioxydant des vaches laitières, et ce surtout à certaines périodes critiques de leur cycle de production, comme la période entourant le vêlage par exemple. . En effet, des problèmes reliés au fonctionnement des systèmes reproducteur et immunitaire ont été observés chez les vaches n'ayant pas un statut adéquat en Se (Gerloff, 1992). De plus, les sols de l'Est du Canada sont faibles en Se ce qui implique que les aliments qui sont produits sur les fermes du Québec contribuent peu à l'apport en Se des rations. Il est donc essentiel d'avoir recours à des suppléments alimentaires.

Depuis les années 70, plus d'une quarantaine d'études ont été publiées sur la caractérisation des effets d'une supplémentation alimentaire de Se chez la vache et sur la teneur en Se du lait. Une méta-analyse récente (Ceballos et al., 2009) conclue que le défi est encore d'identifier la forme de Se et les protocoles de supplémentation à valoriser afin de rencontrer les besoins alimentaires des vaches, d'améliorer leur statut immunitaire, de produire un lait enrichi en Se, de fournir aux consommateurs des produits laitiers à valeur ajoutée et de favoriser une augmentation de la prise alimentaire de Se chez les humains. En effet, la production et la commercialisation d'un lait enrichi naturellement en Se, donc d'un lait à valeur ajoutée au niveau nutritionnel, permettraient de cibler des catégories de consommateurs sensibles à l'aspect santé des aliments. La consommation d'un lait enrichi en Se favoriserait l'augmentation de la quantité de ce nutriment consommé quotidiennement par les humains. Or, il a été démontré que des quantités supérieures aux apports recommandés en Se permettent de réduire de 60 % l'incidence du cancer de la prostate (Clark et al., 1996) de même que le pouvoir pathogène de certains virus (Beck et al., 1994).

Le présent projet de recherche a permis de valider l'intérêt d'une fertilisation en Se des fourrages (Tremblay et al., 2014), de vérifier l'impact de son utilisation par les vaches laitières et de quantifier son transfert dans le lait. Des comparaisons ont été effectuées avec une ration non-supplémentée et des rations supplémentées soit avec une forme inorganique ou organique de Se. Une fois ses résultats obtenus, une validation de l'intérêt économique d'une fertilisation en Se a été réalisée.

PRODUCTION DU FOURRAGE ENRICHİ EN SE POUR LA PHASE ANIMALE

Des fourrages de fléole des prés en peuplement pur et d'un mélange de luzerne et de fléole des prés ont été récoltés à l'été 2011. Pour chacune des espèces, environ 25 % des champs étaient fertilisés au printemps avec 2,5 kg/ha de Selcote® Ultra en plus de la fertilisation minérale normale. Il a ainsi été possible de récolter quatre fourrages différents, soit deux fourrages témoins (fléole des prés/luzerne et fléole des prés) et deux fourrages enrichis en Se (fléole des prés/luzerne + Se et fléole des prés + Se). Ces fourrages ont été conservés sous forme d'ensilage entreposé dans des sacs AgBag pour l'expérimentation animale (Tableau 1).

Tableau 1. Concentration en Se des fourrages récoltés au Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD)

Fourrages	Concentration en Se (ppm)
Fléole des prés - Témoin	0,07
Luzerne/Fléole des prés - Témoin	0,04
Fléole des prés - Enrichi en Se	1,7
Luzerne/Fléole des prés - Enrichi en Se	1,3

IMPACT SUR LES VACHES LAITIÈRES

Pour vérifier l'impact d'un fourrage enrichi en Se sur les vaches laitières, 33 vaches primipares ont été distribuées aléatoirement en quatre blocs de huit vaches (deux vaches par traitement par bloc; un des blocs comportait neuf vaches) au début de la deuxième moitié de leur lactation. Avant le début de la phase expérimentale, toutes les vaches ont été nourries avec une ration carencée en Se de manière à diminuer leur niveau sanguin de Se et ainsi obtenir un déficit marginal, tout en évitant un déficit sévère. Pour ce faire, une ration ne contenant aucun supplément de Se leur a été servie. Après en moyenne 77 jours de déplétion, les vaches ont été distribuées aléatoirement sur les quatre traitements présentés au tableau 2 pour une période de 42 jours.

Tableau 2. Description des traitements

Traitement	Ensilages	Supplément de Se
Témoin	À faible teneur en Se	Aucun
Se ajouté - inorganique	À faible teneur en Se	Se inorganique (sélénite de sodium)
Se ajouté - organique/levures	À faible teneur en Se	Se provenant de levures (Sel-Plex®)
Se ajouté - organique/fourrages	Enrichis en Se	Aucun

Les rations alimentaires ont été formulées afin d'être iso-énergétiques et iso-protéiques et de contenir une concentration de 0,1 ppm de Se pour le traitement témoin et 0,6 ppm de Se pour les traitements enrichis en Se. Des échantillons des rations ont été prélevés au cours de l'expérimentation puis analysés (Tableau 3); les teneurs en Se étaient supérieures à celles visées mais les traitements enrichis en Se ne différaient pas significativement entre eux. Seul le traitement témoin avait une concentration en Se significativement inférieure (0,12 ppm) aux autres (0,76 ppm).

Avant le début des traitements alimentaires (jours -3, -2 et -1), au milieu (jours 21 et 22) et à la fin de la période de traitements alimentaires (jours 40 à 42), les vaches ont été pesées, la prise alimentaire et la quantité de lait produite ont été mesurées, des échantillons des rations servies, des refus et de lait ont été collectés et des prises de sang ont été effectuées. Des collectes totales de fèces et d'urine ont aussi été effectuées à la fin de la période des traitements alimentaires (jours 40 à 42). Les analyses suivantes ont été réalisées dans les échantillons : *Rations, refus, fèces et urine* : ADF (sauf urine), NDF (sauf urine), N et teneurs en minéraux (Se, Ca, Mg, K, Cu, Zn, Mn); *Lait* : composition (% gras, % protéine, % lactose, cellules somatiques, urée), teneurs en minéraux (Se, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn), malonaldehyde; *Sang* : teneurs en minéraux (Se, Ca, Mg, Cu, Zn, Mn), thioredoxine réductase, glutathion peroxydase, malonaldehyde.

Tableau 3. Composition chimique des rations expérimentales.

Tableau 3. Composition chimique des rations expérimentales.					
	Se ajouté				
	Témoin	Inorganique	Organiques		SEM
			Levures	Fourrages	
ADF, % MS	25,1	24,8	25,0	24,8	1,13
NDF, % MS	35,6	36,6	36,2	35,7	1,28
PB, % MS	15,0	14,8	14,9	15,1	0,27
Ca, % MS	0,84	0,82	0,83	0,80	0,016
Mg, % MS	0,28	0,26	0,28	0,27	0,013
K, % MS	2,00	1,95	2,04	2,25	0,072
Cu, ppm	19,7	20,6	22,8	19,3	0,84
Zn, ppm	85,8	101,2	95,5	89,2	7,42
Mn, ppm	74,1	75,0	75,6	70,8	8,48
Se, ppm	0,1	0,7	0,8	0,8	0,06

Principaux résultats : L'impact du type de supplémentation en Se sur l'absorption de ce minéral et son transfert dans le lait et les tissus a d'abord été étudié. Cette recherche a permis de confirmer que les sources organiques de Se (levures et fourrages) sont mieux absorbées qu'une source inorganique (Tableau 4). En plus, le Se provenant d'un fourrage enrichi l'est encore plus que celui provenant d'une levure. Un autre résultat intéressant observé dans cette étude est que le Se en provenance des fourrages enrichis est moins uriné qu'avec les autres formes de supplémentation, ce qui se traduit par plus de Se retenu par les animaux pour le transfert dans le lait, le dépôt dans les muscles et les réserves corporelles. Le transfert du Se dans le lait, exprimé en % de la quantité absorbée, est similaire entre les traitements ce qui se traduit par une augmentation de la quantité de Se excrété dans le lait lorsqu'une source organique est utilisée. D'ailleurs, la concentration de Se dans le lait est supérieure avec les formes organiques de Se, et l'utilisation d'un fourrage enrichi en Se permet d'augmenter de manière plus importante la teneur en Se du lait que les levures (Tableau 5). Le Se restant dans l'animal (bilan) est également augmenté lorsque la supplémentation organique est sous forme de fourrages enrichis en Se (Tableau 4).

Tableau 4. Bilan en Se des vaches en fonction du type de supplémentation en Se.

Sélénium ¹	Témoin	Se ajouté			SEM	P (trt)	Contrastes		
		Inorg.	Organiques				Témoin vs Se ajouté	Inorg. vs Org.	Levure s vs Four.
			Levures	Four.					
Ingéré, µg/j	3,1	16,8	14,6	16,3	1,39	<0,001	<0,001	0,25	0,22
Excrété, % de l'ingéré	57,1	56,1	52,4	44,9	4,37	<0,01	0,05	0,02	0,04
Absorbé, % de l'ingéré	38,9	44,5	47,6	55,1	3,80	<0,001	<0,001	0,01	0,02
Uriné, % de l'absorbé	24,1	39,6	37,4	24,3	5,72	<0,001	<0,01	0,02	<0,01
Retenu, % de l'absorbé	75,9	60,4	63,8	75,7	5,89	<0,001	<0,01	0,01	<0,001
Lait, % de l'absorbé	21,3	8,4	19,4	14,3	7,59	0,47	0,38	0,24	0,61
Bilan, % de l'absorbé	17,8	48,4	42,1	59,5	10,49	<0,001	<0,001	0,69	0,02

¹Ingéré = Quantité d'offre × [Se] des offres - Quantité refus × [Se] des refus; Excrété = Quantité fèces × [Se] des fèces; Absorbé = Se ingéré - Se excrété; Uriné = Quantité d'urine × [Se] de l'urine; Retenu = Se absorbé - Se uriné; Lait = Quantité lait × [Se] du lait; Bilan = Se absorbé - Se uriné - Se du lait.

Cette étude a permis de démontrer qu'un fourrage fertilisé avec du Se est une bonne source de Se pour enrichir le lait (Tableau 5). En plus, toutes les vaches ayant reçu une supplémentation en Se (inorganique ou organique) avaient une concentration plus élevée en Se dans le sérum que celles sans supplémentation. Les sources organiques de Se ont permis une augmentation supérieure à la source inorganique. L'augmentation d'absorption du Se avec les fourrages enrichis par rapport à l'autre source organique s'est également traduit par une augmentation de la teneur en Se dans le sérum. Aucune différence significative n'a été notée pour la glutathion peroxidase (GSH-Px), la thioredoxine réductase, et le malonaldehyde dans le sang; enzymes ou marqueur de stress oxydatif qui pourraient être influencés par le Se alimentaire. Il est toutefois connu qu'il y a un décalage dans le temps entre la modification de la teneur en Se du sérum et celle des métabolites qui utilisent le Se. Ainsi, la durée de l'expérimentation était potentiellement trop courte pour noter des différences significatives à ce niveau.

Tableau 5. Concentration en Se et en certains marqueurs du statut antioxydant dans le lait et le sérum des vaches.

	Se ajouté				SEM	P (trt)	Contrastes		
	Témoin	Organiques		Four.			Témoin vs Se ajouté	Inorg. vs Org.	Levures vs Four.
		Inorg.	Levures						
Se du lait, µg/L	17,4	28,4	54,1	60,0	2,20	<0,001	<0,001	<0,001	0,02
Se du sérum, µg/L	53,8	80,2	89,0	103,1	5,2	<0,001	<0,001	<0,01	0,04
GSH-Px du sang total, U/L	38752	41771	40422	41417	2161	0,48	0,17	0,60	0,60
Thioredoxine réductase du plasma, U/L	0,65	2,53	0,62	1,06	1,034	0,11	0,10	0,11	0,27
Malonaldehyde du plasma, µmol/L	0,83	0,82	0,70	0,56	0,221	0,51	0,42	0,27	0,44
Malonaldehyde du lait, µmol/L	5,87	4,03	5,53	4,06	1,136	0,53	0,34	0,57	0,37

Les résultats obtenus dans cette expérience démontrent qu'une supplémentation en Se n'a pas d'effet significatif sur la consommation de matière sèche, la production laitière et la quantité de composantes du lait produite par les vaches (Tableau 6). Par contre, une supplémentation en Se était associée à une augmentation significative de la production laitière corrigée pour l'énergie (ECM). De plus, une supplémentation en Se diminue le nombre de cellules somatiques présentes dans le lait. Les suppléments organiques de Se ont causé une augmentation de la teneur en protéines du lait comparé au supplément inorganique. Finalement, la comparaison des traitements organiques démontre que la teneur en gras du lait a tendance à être plus élevée lorsque les vaches consomment des fourrages enrichis en Se.

Tableau 6. Prise alimentaire, production et composition du lait en fonction du type de supplémentation en Se.

	Se ajouté								
	Témoin	Inorg.	Organiques		SEM	P (trt)	Contrastes		
			Levures	Four.			Témoin vs Se ajouté	Inorg. vs Org.	Levures vs Four.
CVMS ¹ , kg/j	21,0	20,5	21,5	20,3	1,07	0,55	0,71	0,62	0,19
Lait, kg/j	26,7	28,2	26,8	27,2	1,01	0,32	0,34	0,14	0,72
ECM ² , kg/j	26,7	28,7	27,7	28,2	1,03	0,12	0,03	0,32	0,56
Gras, %	4,25	4,19	4,22	4,36	0,102	0,31	0,89	0,11	0,08
Gras, g/j	1111	1172	1133	1169	44,9	0,37	0,16	0,54	0,40
Protéine,%	3,52	3,44	3,58	3,51	0,069	0,04	0,84	0,01	0,15
Protéine g/j	921	948	941	940	43,0	0,85	0,41	0,79	0,99
Lactose, %	4,57	4,63	4,74	4,62	0,050	0,11	0,12	0,38	0,09
Lactose, g/j	1171	1317	1242	1263	60,2	0,12	0,05	0,21	0,74
CCS ³ , 000/mL	51	37	27	33	72,6	0,13	0,05	0,27	0,42

¹Consommation volontaire de matière sèche; ²Production laitière corrigée pour l'énergie; ³Compte de cellules somatiques.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet confirment les données de la littérature sur l'effet d'une supplémentation en Se chez la vache laitière ainsi que sur les différences entre les sources organiques et inorganiques de Se. L'originalité de l'étude provient des résultats obtenus pour la supplémentation provenant de l'utilisation de fourrages enrichis en Se. Ainsi, ce fourrage permet d'améliorer l'absorption et la rétention du Se par la vache (Tableau 4), son excrétion dans le lait et sa disponibilité (muscles, sang, organes, phanères et fœtus) à l'animal (Tableaux 4 et 5), et ce, sans modifier de manière majeure les performances animales (Tableau 6).

IMPACT ÉCONOMIQUE

Pour cette section du travail, des hypothèses de travail ont été élaborées en utilisant les données des essais aux champs (Tremblay et al., 2014), de la phase animale et de la littérature :

- 1- Les fourrages et les aliments utilisés dans les rations sur les fermes laitières québécoises ne répondent pas à eux seuls aux besoins en Se des vaches;
- 2- Une fertilisation en Se permet d'augmenter le teneur en Se des fourrages;
- 3- Une seule application printanière de Selcote® Ultra est nécessaire pour augmenter la concentration en Se des fourrages. Par contre, la concentration en Se du fourrage de deuxième coupe est plus faible que celle du fourrage de première coupe;
- 4- Une supplémentation en Se permet d'améliorer la santé des vaches laitières en diminuant la prévalence de plusieurs maladies (mammites, métrites, rétentions placentaires);
- 5- Le Se organique et le Se inorganique sont aussi efficaces pour prévenir les maladies (mammites, métrites rétentions placentaires);
- 6- Le Se organique est mieux absorbé par l'animal que le Se inorganique;
- 7- Les résultats de la phase animale ont été utilisés en considérant qu'une tendance à $P < 0,15$ mérite d'être considérée dans l'étude économique (normal pour ce type d'étude);
- 8- Comme les vaches étaient en fin de lactation, elles devraient avoir un système immunitaire moins inhibé, ce qui rend les résultats extrapolables à toute la lactation tout en étant conservateur;

- 9- Comme les vaches étaient primipares, une partie du Se absorbé sous forme d'acide aminé a pu être déposée dans les muscles pour la croissance. Les résultats pourraient s'extrapoler aux autres lactations tout en étant conservateur;
- 10- Les variations des teneurs en gras, en protéine et en lactose du lait ont été considérées pour évaluer les effets de traitements sur la valeur du lait;
- 11- Deux scénarios par rapport à l'utilisation du quota ont été considérés, soit conserver un troupeau constant ou un quota constant;
- 12- Concernant le niveau de fertilisation à appliquer, deux scénarios par rapport à la concentration finale en Se des fourrages ont été considérés. Le premier scénario vise à remplacer un ajout de 0,3 ppm dans la ration et le deuxième vise une concentration en Se total dans la ration de 0,6 ppm;
- 13- Une correction pour le taux d'absorption des différentes sources de Se a été considérée;
- 14- Le rendement moyen des fourrages retenu pour les fins de calcul a été de 6 T/ha.

Résultats obtenus Avec les données moyennes de l'étude, la dose de fertilisants à appliquer pour obtenir l'équivalent d'une supplémentation en Se inorganique à 0,3 ppm dans la ration variait entre 1,2 et 1,7 kg de Selcote® Ultra/ha (12 à 17 g de Se/ha) en fonction de la proportion de fourrages enrichis dans la ration (60 à 40 % de la ration, respectivement). Pour obtenir l'équivalent d'une supplémentation en minéral inorganique lorsqu'on vise 0,6 ppm de Se dans la ration, la dose à appliquer variait de 2,0 à 2,9 kg de Selcote® Ultra/ha (20 à 29 g de Se/ha) en fonction de la proportion de fourrages enrichis dans la ration (60 à 40 % de la ration, respectivement). Considérant l'effet résiduel de la fertilisation entre les années et l'application potentiellement moins bien contrôlée sur de grandes surfaces (calibration, chevauchement entre le passage, ...), il est préférable de promouvoir une application un peu en deçà des seuils mathématiques calculés dans cette étude. Le tableau suivant présente les principaux résultats de l'analyse économique suite à l'utilisation d'un budget partiel qui a été réalisé en utilisant un ajout de 0,3 ppm de Se (sur une base de Se inorganique) dans la ration, ce qui permet de respecter la réglementation pour la source inorganique et les levures.

Tableau 7. Marge supplémentaire annuelle pour un troupeau moyen du Québec avec 65 vaches suite à l'utilisation d'une supplémentation en Se, à l'utilisation d'une source organique plutôt qu'une source inorganique de Se, et à l'utilisation de fourrages enrichis en Se plutôt que de levures comme source organique.

Scénario	Troupeau constant	Quota constant
Ajout de Se ¹ , \$/an	4468	4468
Sources organiques vs. inorganique ² , \$/an	-3028	-1104
Fourrages plutôt que levures ³ , \$/an	1477 à 1562	449 à 533

¹ Prix moyen des trois sources de sélénium; ² Prix moyen pour les deux sources de sélénium organique; ³ Coût pour le fourrage ajusté en fonction de la quantité moyenne de fourrages enrichis utilisées dans la ration (60 à 40 % de la ration respectivement).

À l'échelle d'un troupeau moyen de 65 vaches, l'utilisation d'une supplémentation en Se est toujours rentable (environ 4500 \$ de plus). L'utilisation d'une source organique est toutefois plus dispendieuse (1104 \$ de plus avec le quota constant) que la source inorganique et, entre les deux sources de Se organiques, l'utilisation d'un fourrage enrichi est légèrement plus économique (environ 500 \$ de moins avec le quota constant) que l'utilisation de levures. Ce dernier point s'explique principalement par la différence au niveau du taux d'absorption du Se. Bien que la source inorganique soit moins dispendieuse, son plus faible taux d'absorption peut rendre son

utilisation moins efficace pendant les moments critiques du cycle de production des vaches. Avec la réglementation limitant la quantité de Se pouvant être ajoutée à 0,3 ppm, et considérant le potentiel plus toxique de la forme inorganique, il demeure opportun d'utiliser les sources organiques de Se malgré leurs coûts supplémentaires. Dans ce cas, le coût par vache entre les deux sources à l'étude est similaire, mais la marge pour le troupeau peut être légèrement supérieure avec le fourrage enrichi en Se.

CONCLUSIONS

Les résultats obtenus au cours de cette expérience confirment qu'une fertilisation en Se permet d'augmenter la concentration en Se des fourrages, d'améliorer le statut en Se des vaches et de produire un lait enrichi en Se. Ce projet a démontré qu'il est intéressant pour les producteurs laitiers de l'Est du Canada de fertiliser leurs fourrages en Se. Du point de vue animal, les résultats démontrent que les sources organiques en Se permettent un meilleur taux d'absorption de ce minéral et que les fourrages enrichis en Se améliorent davantage le taux d'absorption. Ce résultat se traduit par des teneurs plus élevées en Se dans le sang et dans le lait des vaches ayant consommées un fourrage enrichi en comparaison avec les autres sources testées. Utilisés à l'échelle d'un troupeau, les fourrages enrichis en Se pourraient contribuer à diminuer l'incidence des problèmes de santé, les coûts de vétérinaires et la réforme involontaire des vaches. Nous avons considéré ses contributions dans une analyse économique ce qui nous a permis de constater que l'utilisation de fourrages enrichis en Se est une alternative intéressante aussi du point de vue monétaire et se compare avantageusement aux produits organiques actuellement utilisés dans l'industrie. Autrement dit, les fourrages enrichis en Se représentent une alternative supplémentaire pour les producteurs laitiers de l'Est du Canada.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été financé par les Producteurs laitiers du Canada (PLC) et le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie (CRSNG) du Canada dans le cadre du programme « Subvention de recherche et développement coopérative – 2010-2013 ». Il fut appuyé par le Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD). Les auteurs tiennent à remercier sincèrement Danielle Mongrain et Mario Laterrière pour le travail en laboratoire.

LISTE DES OUVRAGES CITÉS

- Beck, M.A., P.C. Kolbeck, L.H. Rohr, Q. Shi, V.C. Morris et O.A. Levander. 1994. Benign human enterovirus becomes virulent in selenium-deficient mice. *J. Med. Virol.* 43:166-170.
- Clark, L.C., G.F. Combs Jr, B.W. Turnbull, E.H. Slate, D.K. Chalker, J. Chow, L.S. Davis, R.A. Glover, G.F. Graham, E.G. Gross, A. Kongrad, J.L. Leshner Jr, H.K. Park, B.B. Sanders Jr, C.L. Smith et J.R. Taylor. 1996. Effects of Se supplementation for cancer prevention in patients with carcinoma of the skin. A randomized controlled trial. Nutritional Prevention of Cancer Study Group. *JAMA.* 276:1957-1963.
- Ceballos, A., J. Sánchez, H. Stryhn, J.B. Montgomery, H.W. Barkema et J.J. Wichtel. 2009. Meta-analysis of the effect of oral Se supplementation on milk Se concentration in cattle. *J. Dairy Sci.* 92:324-342.
- Gerloff, B.J. 1992. Effect of selenium supplementation on dairy cattle. *J. Anim. Sci.* 70:3934-3940
- Tremblay, G., G. Bélanger, J. Lajeunesse, P.Y. Chouinard et E. Charbonneau. 2014. Un fourrage enrichi en sélénium pour les vaches laitières : aspects agronomiques. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages, CRAAQ, CQPF, 12 février, Victoriaville, Québec.

LES EFFETS DE L'AUGMENTATION DU CO₂ ET DE LA TEMPÉRATURE SUR LES MÉLANGES LUZERNE-FLÉOLE DES PRÉS CULTIVÉS EN *OPEN-TOP CHAMBERS*

JONATHAN MESSERLI^{1,2}, ANNICK BERTRAND¹, GILLES BÉLANGER¹, YVES CASTONGUAY¹, GAËTAN TREMBLAY¹, PHILIPPE SEGUIN²

¹Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 boulevard Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3. ²Department of Plant Science, Macdonald Campus, McGill University, Sainte-Anne-de-Bellevue, QC, H9X 3V9
Courriel: jonathan.messerli@mail.mcgill.ca

INTRODUCTION

La production de fourrages de qualité est l'un des facteurs clé contribuant au succès des productions laitières et bovines. Néanmoins, tout comme les autres espèces végétales, les plantes fourragères pérennes sont sensibles aux changements climatiques, qui altèrent graduellement les conditions de croissance actuelles. Ayant atteint un nouveau sommet de 400 ppm le printemps dernier (Monastersky, 2013), la concentration atmosphérique de CO₂ va continuer d'augmenter dans les prochaines années et pourrait atteindre de 700 à 1000 ppm d'ici la fin du siècle (Meehl et al., 2007). De plus, les prédictions actuelles pour le sud du Québec indiquent que d'ici 2050 la température devrait augmenter de 1.9 à 3.0 °C durant l'été et de 2.5 à 3.8 °C durant l'hiver. Le réchauffement climatique sera donc ressenti de façon plus marquée durant l'hiver, alors que les précipitations, qui devraient augmenter de 8.6 à 18.1 %, causeront une diminution du couvert de neige (Desjarlais et al., 2010).

Ces changements auront des effets marqués sur le rendement, la valeur nutritive et la survie à l'hiver des espèces fourragères cultivées au Québec (Bélangier et al., 2002; Piva et al., 2013; Jing et al., 2013). Les changements climatiques induisent généralement une diminution de la valeur nutritive, de l'endurcissement à l'automne, et de la tolérance au froid chez la luzerne (Bertrand et al., 2007 a et b). Pour la fléole des prés, l'augmentation du CO₂ et de la température n'ont pas d'effets clairs sur le rendement, mais diminuent la valeur nutritive. Il a toutefois été démontré que l'augmentation de la température a un effet positif sur le contenu en énergie (Piva et al., 2013).

Les changements climatiques pourraient également changer la dynamique des espèces au sein des mélanges fourragers. En effet, Poorter (1983) a démontré que la luzerne possède une plus forte réponse au CO₂ que les graminées en raison de sa capacité à diriger vers les nodules le carbone additionnel produit. Ceci a pour effet d'augmenter la fixation d'azote (Hungate, 1999), ainsi que la croissance souterraine par rapport à la croissance aérienne, ce qui pourrait accroître le potentiel de séquestration du carbone (MacDowal, 1982).

Ce projet vise à évaluer dans quelle mesure les augmentations du CO₂ et de la température influent sur le rendement, la valeur nutritive, l'accumulation des réserves et la persistance à moyen terme des mélanges luzerne-fléole des prés. En outre, la dynamique des espèces et le potentiel de séquestration du carbone seront évalués.



Figure 1. Site expérimental pour étudier les effets du CO₂ atmosphérique sur les mélanges luzerne-fléole des prés en *Open-Top Chambers*.

MÉTHODOLOGIE

Un site a été aménagé avec huit *Open-Top Chambers* (OTCs) au printemps 2013 à Québec (Figure 1) et un deuxième site identique sera installé en 2014 à Lacombe, en Alberta. Les OTCs consistent en de petites serres (1.2 m² de surface), installées en plein champ, et dans lesquelles peut être injecté du CO₂ (ou un autre gaz d'intérêt). Leur particularité réside dans le fait qu'elles n'ont pas de toit et qu'on peut ainsi s'approcher des conditions environnementales naturelles (pluie, humidité, température de l'air). De plus, ce système permet l'étude des plantes en conditions de CO₂ élevé à moindre coût. Puisque le CO₂ est plus lourd que l'air, il est contenu par les parois de la chambre, ce qui limite les quantités nécessaires pour obtenir une concentration élevée et stable. Celles-ci créent également un léger effet de serre, augmentant ainsi la température interne de la chambre de 0,5 à 1 °C, dépendamment de la période de l'année.

La concentration de CO₂ élevée utilisée à l'intérieur des chambres est de 600 ppm, ce qui correspond aux conditions de croissance que nous devrions rencontrer vers le milieu du siècle. Des mélanges luzerne-fléole des prés sont cultivés dans des OTCs avec CO₂ élevé (600 ppm) et ambiant (400 ppm). Huit OTCs (quatre pour chaque traitement) ont donc été construits et placés aléatoirement sur le site, en plus de quatre témoins (sans OTCs). La luzerne (cv Calypso) et la

fléole des prés (cv AC Alliance) ont été démarrées en serre, puis transplantées (18 juillet) dans les OTCs en mélange dans une proportion de 50% luzerne et 50% fléole, avec une répartition uniforme. En 2013, l'année d'implantation, une seule coupe (28 août) a été effectuée au cours de l'été. Cependant, en 2014 et 2015, trois coupes seront effectuées à intervalles réguliers au cours de chaque saison de croissance.

Lors de la coupe, nous avons mesuré la photosynthèse foliaire, le rendement en matière sèche et la concentration en sucres et en acides aminés sur les deux espèces, alors que la composition botanique ainsi que la valeur nutritive ont été mesurées sur le mélange.

Les réserves qui s'accumulent dans les collets à l'automne sont souvent liées à l'acclimatation au froid et à la survie à l'hiver des plantes pérennes. Afin d'évaluer l'effet du CO₂ sur l'accumulation des réserves des deux espèces, les collets ont été récoltés à la fin de l'automne et la concentration en sucres a été mesurée. De plus, la survie à l'hiver des plantes sera mesurée au printemps prochain en dénombrant les plants de chaque espèce.

RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

Les résultats obtenus lors de la première coupe de l'année d'implantation indiquent que le mélange luzerne-fléole des prés dans les chambres avec CO₂ élevé a produit 31% de plus de rendement (68 g MS) que dans les chambres à CO₂ ambiant (52 g MS) alors que le rendement des parcelles témoins (sans OTC) était intermédiaire (62 g MS).

La photosynthèse de la luzerne était de 16% plus élevée à 600 qu'à 400 ppm alors que celle de la fléole était similaire aux deux concentrations de CO₂. Ce résultat confirme nos observations antérieures démontrant que le CO₂ élevé a plus d'effet sur la physiologie de la luzerne que sur celle de la fléole. Pour les deux espèces, le sucrose est le seul sucre soluble dont la concentration a répondu de façon positive à l'augmentation du CO₂.

Une baisse de l'accumulation des réserves dans les collets de luzerne a été observée dans les chambres avec CO₂ élevé alors qu'il n'y a pas eu d'effet chez la fléole. L'augmentation de la concentration en CO₂ pourrait donc avoir un impact négatif sur la survie à l'hiver de la luzerne. Nous pourrions confirmer le lien entre l'accumulation des réserves et la survie à l'hiver de chacune des espèces au printemps, lors du dénombrement des plants.

La mise en place du même dispositif expérimental en Alberta l'été prochain va nous permettre d'évaluer l'impact des changements climatiques sur le rendement, la valeur nutritive et la persistance des mélanges fléole-luzerne dans deux zones climatiques contrastées du Canada.

LISTE DES OUVRAGES CITÉS

- Bélanger G., P. Rochette, Y. Castonguay, A. Bootsma, D. Mongrain, A.J. Ryan. 2002. Climate change and winter survival of perennial forage crops in eastern Canada. *Agronomy Journal*. 94:1120-1130.
- Bertrand A., D. Prévost, F.J. Bigras, Y. Castonguay. 2007a. Elevated atmospheric CO₂ and strain of rhizobium alter freezing tolerance and cold-induced molecular changes in alfalfa. *Annals of Botany*. 99:275-284.

- Bertrand A., D. Prévost, F.J. Bigras, R. Lalande, G.F. Tremblay, Y. Castonguay, G. Bélanger. 2007b. Alfalfa response to elevated atmospheric CO₂ varies with the symbiotic rhizobial strain. *Plant Soil*. 301:173-187.
- Desjarlais C., M. Allard, A. Blondlot, A. Bourque, D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larrivée, N. Lease, R. Roy, J.-P. Savard, R. Turcotte and C. Villeneuve. 2010. *Ouranos. Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Montréal. 128 p.
- Hungate B.A, P. Dijkstra, D.W. Johnson, R. Hinkle, B.G. Drake. 1999. Elevated CO₂ increases nitrogen fixation and decreases soil nitrogen mineralization in Florida scrub oak. *Global Change Biology*. 5:781-789.
- Jing Q., G. Bélanger, B. Qian, V. Baron. 2013. Timothy Yield and Nutritive Value under Climate Change in Canada. *Agronomy Journal*. 105(6):1683-1694.
- MacDowall F.D.H. 1982. Effects of light intensity and CO₂ concentration on the kinetics of 1st month growth and nitrogen fixation of alfalfa. *Canadian Journal of Botany*. 61:731-740.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A. J. Weaver and Z.-C. Zhao. 2007: Global Climate Projections. In Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Monastersky R. 2013. Global carbon dioxide levels near worrisome milestone. *Nature* 497:13-14.
- Piva A., A. Bertrand, G. Bélanger, Y. Castonguay, P. Séguin, 2013. Growth and Physiological Response of Timothy to Elevated Carbon Dioxide and Temperature under Contrasted Nitrogen Fertilization. *Crop Science*. 53:704-715.
- Poorter H. 1993. Interspecific variation in the growth response of plants to an elevated ambient CO₂ concentration. *Vegetatio*. 104/105: 77-97.

UNE ESPÈCE FOURRAGÈRE C'EST BIEN MAIS DEUX C'EST MIEUX

GILLES BÉLANGER¹, YVES CASTONGUAY¹ ET JULIE LAJEUNESSE²

^{1,2} Agriculture et Agroalimentaire Canada, ¹Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Québec, QC, G1V 2J3; ²Ferme de recherche, Normandin, QC, G8M 4K3. Courriel: gilles.belanger@agr.gc.ca

INTRODUCTION

Les associations d'espèces fourragères offrent plusieurs avantages sur les peuplements purs. Entre autres, elles sont généralement plus productives, offrent plus de compétition aux mauvaises herbes, et elles garantissent généralement un meilleur peuplement (CRAAQ 2005). Ces bénéfices des associations d'espèces fourragères ont été confirmés dans des études récentes réalisées au Canada (Sturludóttir et al. 2013; Thompson 2013). Même si la luzerne est souvent cultivée avec une graminée, les avantages d'y associer la fléole des prés ont été rarement quantifiés. De plus, l'effet des associations d'espèces fourragères, incluant celle de la luzerne et de la fléole des prés, sur la valeur nutritive est peu connu. Nous avons donc voulu préciser et quantifier les avantages d'associer la luzerne à la fléole des prés sur les plans du rendement fourrager, de la valeur nutritive et de la suppression des mauvaises herbes.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

L'étude s'est déroulée dans la région de Québec (1 700 degrés-jours, base de 5°C) sur deux cultivars de luzerne (Apica et Évolution) de même que les populations de ces deux cultivars après trois cycles de sélection pour la tolérance au froid. Ces cultivars et populations ont été cultivés avec ou sans la fléole des prés (AC Alliance). En peuplement pur, la luzerne a été semée à 12 kg/ha alors qu'elle a été semée à 9 kg/ha en présence de fléole des prés (7 kg/ha).

On a procédé à une récolte l'année du semis (2008), à trois récoltes chacune des deux années subséquentes, et à une récolte la troisième année après l'ensemencement. Dans les années qui ont suivi l'implantation, les première (16-17 juin) et deuxième récoltes (20 juillet) ont été faites au stade début floraison alors que la troisième récolte (24-25 août) a été faite 500 degrés-jours après la deuxième récolte. Aucune fertilisation azotée n'a été apportée alors que la fertilisation en P et K a été faite selon les recommandations.

On a mesuré le rendement en matière sèche (MS), la contribution des espèces semées au rendement et les attributs de valeur nutritive : digestibilité des fibres au détergent neutre (NDF) et de la MS, et teneurs en NDF, protéine brute et sucres solubles (Bélanger et al. 2014). Les cultivars et populations de luzerne ont eu peu d'effets et, donc, la présentation des résultats est axée sur la comparaison entre le peuplement pur de luzerne et l'association luzerne-fléole des prés.

RÉSULTATS

Ajouter la fléole des prés à la luzerne a augmenté le rendement annuel d'en moyenne 0,57 tonnes de MS par hectare et par année lors des deux années qui ont suivi le semis (Figure 1). Cet effet sur le rendement annuel est dû essentiellement à la hausse du rendement observée à la première récolte. La contribution des mauvaises herbes au rendement lors des trois récoltes des deux années suivant l'ensemencement était plus importante pour le peuplement pur de luzerne (16 à 47 %) que pour l'association luzerne-fléole des prés (12 à 36 %). Ces résultats confirment les avantages des associations d'espèces fourragères pour le rendement et la suppression des mauvaises herbes.

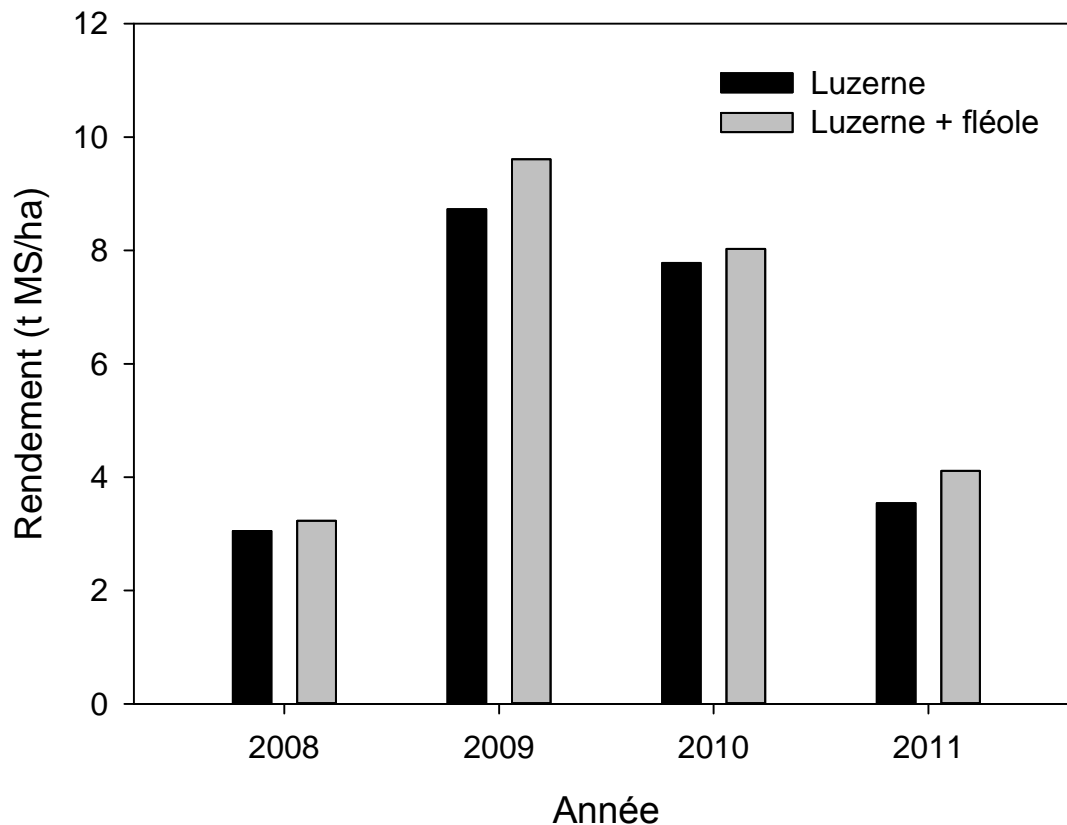


Figure 1. Rendement annuel de la luzerne en peuplement pur et de l'association luzerne-fléole des prés lors de l'année de l'implantation (2008, une coupe) et de trois années de production (2009 et 2010, 3 coupes par année; 2011, une coupe).

Associer la fléole des prés à la luzerne a augmenté la teneur et la digestibilité du NDF mais a eu peu d'effet sur la digestibilité de la MS du fourrage. De plus, l'association luzerne-fléole des prés a réduit la teneur en protéine brute et a eu tendance à augmenter la teneur en sucres solubles. Ainsi, l'association luzerne-fléole des prés avait un meilleur ratio entre les sucres solubles et la protéine brute que la luzerne en peuplement pur, ce qui pourrait favoriser une meilleure utilisation de la protéine par la vache laitière.

CONCLUSIONS

L'effet positif de l'association luzerne-fléole des prés sur le rendement ne s'est pas accompagné d'une moins grande digestibilité du fourrage, comme cela se produit habituellement avec une hausse du rendement. Ainsi, par rapport à un peuplement pur de luzerne, une association luzerne-fléole des prés permet d'augmenter le rendement d'environ 8%, de réduire de façon significative la présence de mauvaises herbes, et d'avoir un fourrage de digestibilité comparable tout en ayant un meilleur équilibre entre l'énergie et la protéine.

LISTE DES OUVRAGES CITÉS

- Bélanger G., Castonguay Y., Lajeunesse J. 2014. Benefits of mixing timothy with alfalfa for forage yield, nutritive value, and weed suppression in northern environments. *Canadian Journal of Plant Science* 94: 51-60.
- CRAAQ. 2005. Les plantes fourragères. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Québec, QC.
- Sturludóttir E., Brophy C., Bélanger G., Gustavsson A.M., Jørgensen M., Lunnan T., Helgadóttir Á. 2013. Benefits of mixing grasses and legumes for herbage yield and nutritive value in Northern Europe and Canada. *Grass and Forage Science* (sous presse).
- Thompson D. 2013. Yield and nutritive value of irrigated tall fescue compared with orchardgrass: In monocultures or mixed with alfalfa. *Canadian Journal of Plant Science* 93: 799-807.

NOUVELLE APPROCHE DE SÉLECTION ASSISTÉE PAR MARQUEURS DANS LE DÉVELOPPEMENT D'UNE LUZERNE PLUS RÉSISTANTE AUX MALADIES.

P. AUDY, R. DESGAGNÉS, A. CLAESSENS ET Y. CASTONGUAY.

Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de Développement sur les Sols et les Grandes Cultures, 2560 boulevard Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3
courriel : patrice.audy@agr.gc.ca

INTRODUCTION

Deux des plus importants facteurs responsables de la pérennité de la luzerne cultivée sous nos latitudes nordiques sont la résistance au froid et aux maladies racinaires. La compréhension de la génétique liée à ces deux caractères pourrait permettre des gains rapides et appréciables dans le développement de populations plus tolérantes à ces stress environnementaux et par conséquent, plus persistantes en champs.

Une des maladies prépondérante causant le dépérissement de nos luzernières au Québec est le pourridié phytophthoréen (PP) causé par *Phytophthora medicaginis* (Richard et Martin, 1991). Cet organisme pathogène est très actif sous les conditions froides et humides qui prévalent à l'automne et au printemps. L'utilisation de cultivars résistants au PP est la seule approche valable pour optimiser la persistance des luzernières. Cependant, les méthodes conventionnelles utilisées pour sélectionner les phénotypes résistants au PP sont longues et requièrent l'utilisation d'agents infectieux sous des conditions de confinement. Une approche alternative de sélection basée sur l'utilisation de marqueurs moléculaires pourrait faciliter significativement l'identification de plants de luzerne résistants et par conséquent, accélérer le développement de cultivars résistants.

Des travaux récents effectués au Centre de Recherche d'AAC à Québec ont démontré qu'il était possible d'améliorer de façon appréciable la résistance au froid chez des lignées commerciales de luzerne soumises à des cycles récurrents de sélection à basse température (Castonguay et al. 2009). Dans le cadre de notre étude, notre objectif était de : 1- Augmenter la tolérance au PP par sélection récurrente et; 2- Identifier des polymorphismes d'ADN associées à la tolérance au PP.

MÉTHODOLOGIE

Une sélection pour la tolérance au PP a été effectuée dans deux populations, ATF3 et CTF3, dérivées respectivement des cultivars Apica (A) et Caribou (C) après trois cycles de sélection récurrente pour augmenter leur tolérance au froid (TF). En utilisant une approche similaire, trois cycles de sélection ont été effectués en exposant 1500 plantules de chacun des deux backgrounds initiaux (ATF3 et CTF3) à une pression intense d'infection par le PP (Fig. 1). Cent (100) plantules, ayant survécu à l'infection et démontrant une repousse vigoureuse, ont été sélectionnées et inter-croisées à chacun des trois cycles pour générer les populations PP1 à PP3 progressivement améliorées pour leur tolérance à la maladie. Nous avons alors effectué une recherche de polymorphismes d'ADN associés à la tolérance au PP en comparant les résultats d'amplifications géniques aléatoires par la technique PCR "Sequence-Related Amplified Polymorphism" (SRAP) à partir de pools de 50 génotypes dans chaque population (2 populations originales TF3 et 6 populations améliorées PP1 à PP3). Les patrons polymorphiques des

génotypes individuels ont aussi été comparés afin de vérifier les variations dans la fréquence des marqueurs les plus prometteurs en fonction des cycles de sélection.



FIG. 1 Sélection de plantules de luzerne résistantes au PP

Les plantules du cultivar Apica (ATF3) ont été inoculées 7 jours après le semis avec un mélange de trois isolats de *P. medicaginis*. La photo montre les plantules qui ont survécu deux semaines après l'inoculation. Les cent (100) plantules les plus vigoureuses, et dont les racines ne montraient pas ou peu de symptômes de PP, ont été sélectionnées pour les analyses SRAP et pour les croisements dont la semence résultante constituait la prochaine population (PP1 à PP3). Une cassette témoin montre le cultivar Saranac sensible au PP (étiquette blanche) et le cultivar résistant Amerigraze (étiquette orange).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le test de sélection pour la tolérance au PP a permis l'identification de génotypes montrant une tolérance très élevée et le développement de populations améliorées pour ce caractère. La recherche de polymorphismes d'ADN à l'aide de la technique SRAP suggère la présence de régions du génome sous pression de sélection positive et négative en réponse à la sélection pour le PP. L'analyse subséquente de la fréquence génotypique des polymorphismes identifiés par l'analyse de pools d'échantillons d'ADN confirme le lien entre leur présence et l'augmentation de la tolérance au PP. Nos résultats démontrent que l'utilisation de populations sélectionnées de façon récurrente pour leur résistance aux PP, de concert avec une approche efficace d'exploration du génome, permet l'identification de polymorphismes d'ADN associés à la tolérance à cette

maladie. Des analyses en cours visent à établir l'existence de ces polymorphismes dans d'autres populations de luzerne en vue de développer des marqueurs moléculaires pour les programmes de sélection.

RÉFÉRENCES

Castonguay et al. (2009). An indoor screening method for improvement of freezing tolerance in alfalfa. *Crop Sci.* 49: 809–818

Richard, C. et Martin, J.-G. (1991). Pourriture phytophthoréenne de la luzerne au Québec : distribution géographique des symptômes et étude des facteurs édaphiques pouvant favoriser leur expression. *Phytoprotection* 72 : 87-95

PERFORMANCE ET FLEXIBILITÉ DES CHANTIERS DE RÉCOLTE DE FOIN SEC RÉCOLTÉ EN VRAC ET EN BALLES RONDES ENRUBANNÉES

JOCELYN MARCEAU

Ingénieur, Direction régionale de la Capitale-Nationale du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation

En Europe, nombre de fermes laitières ont adapté leurs façons de faire en vue d'utiliser du foin sec en vrac. Cette méthode fait une percée chez nous. Un projet d'implantation de la technique au Québec a été réalisé à la Ferme Hengil, située à Saint-Hilarion dans Charlevoix. Un séchoir solaire a été aménagé et évalué¹. De plus, la performance de récolte a aussi l'objet d'observations sur cette même ferme en comparant la performance des chantiers de récolte de foin sec récolté en vrac et en balles rondes enrubannées.

Pour faire du foin sec en balles au moyen d'un séchoir conventionnel, trois ou quatre jours de beau temps sont nécessaires pour le séchage au champ, de manière à obtenir un foin ayant moins de 25 % d'humidité (valeur cible à atteindre pour la conservation). Ces conditions sont cependant difficiles à satisfaire. Ce n'est pas sans raison que le foin pressé a été délaissé au profit des balles enrubannées. Il a été démontré qu'en adoptant la nouvelle méthode on peut engranger du foin en vrac dont la teneur en eau varie de 35 à 45 %. Le séchage au champ du foin en vrac ne prend alors que de 36 à 48 heures.

Cette méthode assure une certaine souplesse et améliore également la qualité, mais il faut veiller à ce que les travaux de récolte soient efficaces.

PERFORMANCE DE RÉCOLTE

À l'été 2012, à la Ferme Hengil, la méthode de la récolte du foin en vrac a été analysée et comparée à celle de la fabrication de balles rondes enrubannées. Rappelons que la ferme a adopté la méthode du foin en vrac au moment de la deuxième coupe, à la fin de l'été. Elle avait effectué la première coupe comme à l'habitude, en produisant des balles rondes enrubannées. Il est donc possible de comparer le rendement des deux méthodes.

¹ Jocelyn Marceau, « Faire du foin sec de qualité – une méthode testée dans Charlevoix », *L'écho fourrager*, 2013, n° 1.

L'équipement utilisé comprenait les éléments suivants :

	Marque	Caractéristiques
Faucheuse	Kverneland	10 pi – 6 po avec éparpilleur
Râteau	Hesston	13 pi – 6 po
Faneuse	Pöttinger	4 toupies (fane 2 largeurs de faucheuse – 20 pi)
Presse	New Holland 640 Silage Special	Alimenteur de 6 pi – diamètre de 56 po
Autochargeuse	Pöttinger Europrofit 50	50 m ³ – 31,3 m ³ réel
Griffe	Stepa Palfinger HDK 8012	500 kg à 11,6 m

Précisons que la faucheuse et l'autochargeuse étaient tractées à l'aide d'un Case Maxxum 115 Value (95 CV à la prise de force). Quant au râteau et à la faneuse, ils étaient tractés au moyen d'un 60 CV.

Pour simplifier l'interprétation des résultats, toutes les données des opérations (temps) ont été recueillies séparément, même si certaines de ces opérations étaient réalisées simultanément. Par exemple, le temps de chargement du foin en vrac et celui du transfert du foin à la cellule ont été additionnés, bien que les deux opérations se sont déroulées en même temps. Il en a été ainsi pour les balles : pressage, transport et enrobage avaient lieu concurremment. Les données recueillies ont d'ailleurs été comparées aux valeurs officielles du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ).

Le rendement a été beaucoup plus faible à la première coupe qu'à la deuxième coupe en raison de la sécheresse qui a caractérisé le début de la saison 2012 et qui explique l'écart de rendement entre les balles rondes (1 238 kg MS/ha à la première coupe) et le foin en vrac (2 702 kg MS/ha à la deuxième coupe).

Rendement – Balles rondes

Les données du CRAAQ (2009) servent de références pour la récolte en balles rondes. Les données recueillies à la Ferme Hengil sont presque identiques à celles du CRAAQ (0,62 ha/h contre 0,61 ha/h). Les données liées aux opérations de pressage, de transport et d'enrobage dépassent légèrement les valeurs de référence. Le faible rendement en foin a fait en sorte que le pressage, le transport et l'enrobage ont été rapides. Par contre, le râtelage a été plus lent que la normale, si bien que cela a compensé pour l'ensemble des opérations, d'où un rendement de 0,61 ha/h.

	Balles rondes enrubannées Ferme Hengil	Balles rondes enrubannées CRAAQ (2009)*	Vrac Ferme Hengil
Surface (ha)	32,6		29,4
Matière sèche (MS) estimée** (tonne)	40,4		79,4
Fournées (nombre)	5		3
Distance pondérée (km)	0,93		0,84
Fauche (ha/h)	2,61	2,68	2,62
Râtelage (ha/h)	1,97	3,31	2,43
Pressage (ha/h)	2,75	2,10	
Transport et enrobage (ha/h)	2,86	2,10	
Chargement et transport (ha/h)			2,78
Déchargement (ha/h)			2,95
Toutes les opérations (ha/h)	0,62	0,61	0,64
Tonne par heure (tonne/h)	0,76		1,72

* Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, « Foin et ensilage en balles rondes » et « Frais de récolte, de conservation et de reprise – base 200 tonnes », AGDEX 732/821x, Références économiques, 2009.

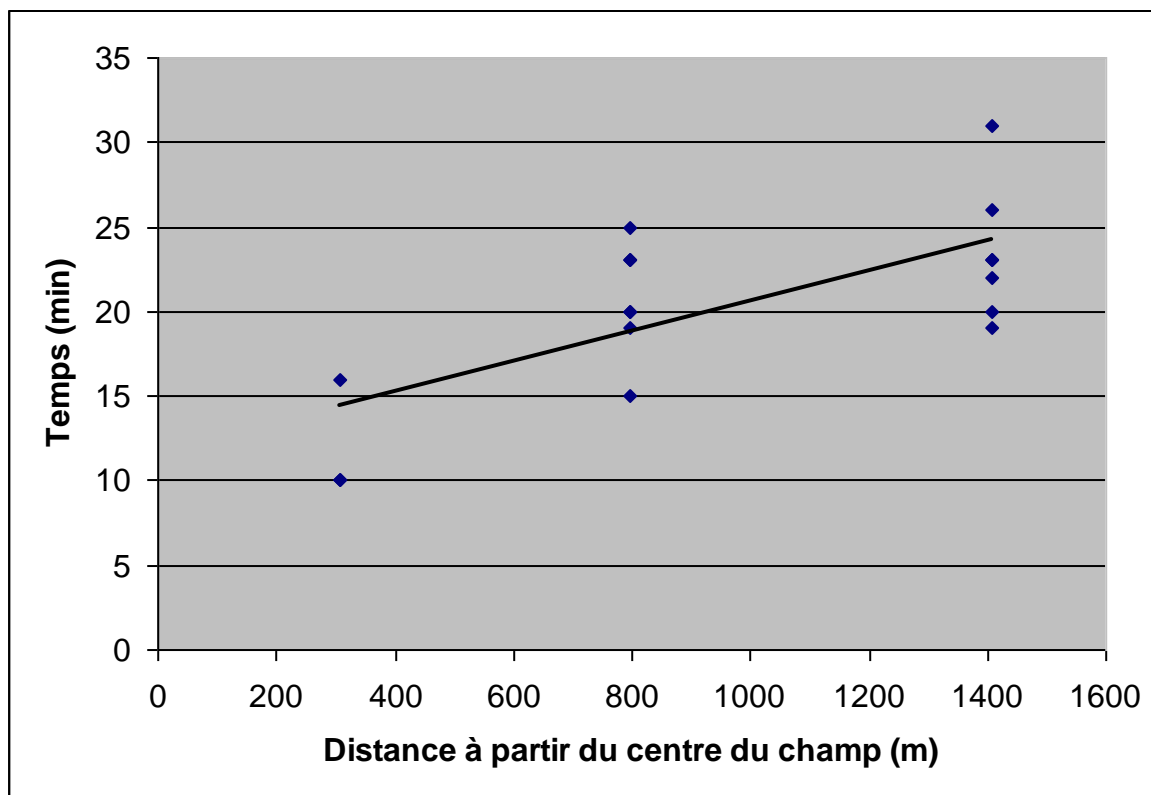
** La MS estimée correspondait à 323 kg de MS par balle² et, pour l'autochargeuse, à 2 147 kg par chargement).

Rendement – Foin en vrac

Si on examine attentivement le rendement total pour le foin en vrac, celui qu'a obtenu l'entreprise de Charlevoix est légèrement supérieur de 5 % aux valeurs du CRAAQ pour les balles rondes (0,64 ha/h contre 0,61 ha/h) et de 3 % par rapport aux balles rondes à la Ferme Hengil (0,64 ha/h contre 0,62 ha/h). Pour ce qui est de la masse récoltée, l'écart est toutefois beaucoup plus notable et atteint 126 % (1,72 tonne MS/h contre 0,76 tonne MS/h). C'est un net avantage pour le vrac.

De plus, il est évident que les rendements s'amélioreront lorsque les opérateurs auront acquis plus d'expérience dans la manipulation de l'autochargeuse, notamment pour le déchargement et le transfert au moyen de la griffe. Le temps nécessaire au chargement varie de 14 à 25 minutes, selon la distance du champ. Pour effectuer le déchargement à l'aide de la griffe, le temps moyen était de 17 minutes. Si l'on suppose qu'un champ soit situé à 700 m du débarcadère, le temps de chargement s'élève aussi à 17 minutes. Avec deux opérateurs, il est donc possible de procéder à 3,5 chargements à l'heure pour obtenir un total de 7,5 tonnes de MS.

² Logiciel UL, Évaluation de la valorisation des fourrages : balles de foin sec, 4 sur 4,66 pi de diamètre.

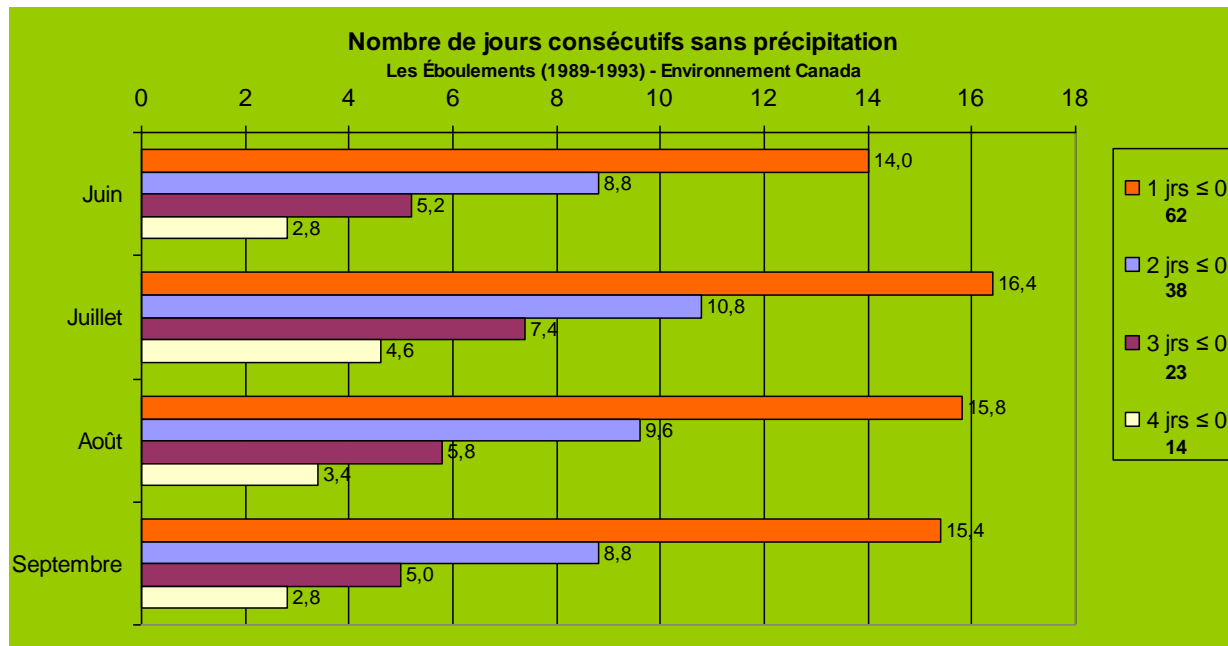


Temps nécessaire pour effectuer un cycle complet de chargement au moyen de l'autochargeuse Pöttinger Europrofit 50. Cela comprend le chargement, le transport et le déchargement dans le débarcadère. Les distances utilisées ont été pondérées à une seule valeur journalière (distance moyenne pour une journée de récolte).

Flexibilité de la récolte

Ce sont les conditions météorologiques qui ont principalement poussé les producteurs à délaissé le foin sec en balles. Faire du foin sec selon la méthode traditionnelle nécessite de façon générale trois jours consécutifs de beau temps, voire quatre jours dans le cas des légumineuses. Adopter la méthode du foin sec en vrac réduit cette période continue de beau temps à 36 à 48 heures, soit le temps nécessaire à l'enrangement du fourrage.

La figure suivante rend compte des statistiques relatives aux possibilités d'avoir un, deux, trois ou quatre jours consécutifs de beau temps dans la région de Charlevoix. Ainsi, au cours d'un été, de juin à octobre, il y aurait 62 jours de beau temps sur l'ensemble de ce territoire. Toutefois, on dénombre seulement 23 ou 14 fenêtres de 3 ou 4 jours consécutifs de beau temps pour faire les travaux des foins traditionnels. Opter pour le foin en vrac permet de réduire le temps de séchage au champ à 2 jours seulement, de sorte que, dans cette région, il y aurait 38 occasions de faire les foins, par rapport à un maximum de 23 ou de 14 occasions pour la méthode traditionnelle. Cela atténue considérablement le stress pour le producteur qui, auparavant, devait prendre la décision de faucher trois ou quatre jours avant. Grâce à la méthode du foin en vrac, on tient compte simplement de la journée en cours et du lendemain et, en règle générale, les météorologistes prédisent beaucoup plus précisément les conditions météorologiques à très court terme.



Séquence de journées sans pluie propice à la réalisation de travaux des foins. L'analyse porte sur les données météorologiques de 1989 à 1993 aux Éboulements, au Québec.

CONCLUSION

Selon les observations faites à la Ferme Hengil, la vitesse de la récolte de foin sec représente un avantage par rapport à la fabrication de balles rondes enrubannées. La mécanisation facilite la tâche des opérateurs, grâce à l'autochargeuse et à la griffe. Idéalement, il faut deux opérateurs, mais il est possible pour une seule personne d'effectuer les travaux des foins de manière efficace. Cette méthode comporte aussi plus de souplesse que les méthodes traditionnelles, puisqu'elle permet d'engranger du fourrage dont la teneur en eau varie de 35 à 45 %. Enfin, le « stress météorologique », auquel les producteurs agricoles étaient exposés auparavant, est considérablement réduit, puisque les foins se font en moins de 48 heures. Bref, la vitesse et la flexibilité de la récolte du foin en vrac sont deux facteurs déterminants pour favoriser le retour du foin sec dans les fermes du Québec.



Autochargeuse Pöttinger de 50 m³ utilisée à la Ferme Hengil
<http://www.youtube.com/watch?v=3AW9CO3ISXc&feature=youtu.be>



Manutention à l'aide de la griffe à foin Stepa Palfinger HDK 8012
<https://www.youtube.com/watch?v=Svsts39Xdrw>

DÉTERMINATION DE LA LONGUEUR ET CARACTÉRISATION DE LA FORME DES PARTICULES DE FOURRAGES HACHÉS PAR L'ANALYSE D'IMAGES

MARC-ANTOINE AUDY-DUBÉ¹, PHILIPPE SAVOIE^{2,1}, FRANÇOIS THIBODEAU² ET RENÉ MORISSETTE²

¹Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Québec, QC, G1V 0A6

²Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), 2560 boul. Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3

Courriels : marc-antoine.audy-dube.1@ulaval.ca ; philippe.savoie@fsaa.ulaval.ca

RÉSUMÉ

Les fourrages hachés représentent une portion importante des aliments pour les productions laitières, bovines et ovines, notamment. Traditionnellement, la longueur des particules est estimée de façon approximative par tamisage mécanique ou par référence sans mesure à l'ajustement théorique des récolteuses. Des mesures plus précises peuvent fournir, à long terme, de précieux renseignements sur les comportements physiologiques de la plante durant la fermentation en ensilage et sur les comportements métaboliques des animaux durant la mastication, l'ingestion, la rumination et la digestion des aliments. À l'automne 2013, du maïs ensilage a été récolté avec une fourragère ajustée à trois longueurs de hachage théoriques (LHT) relativement longues : 12,7, 25,4 et 29,6 mm. Les échantillons de fourrages hachés ont été tamisés mécaniquement puis photographiés. Un algorithme MATLAB® a été utilisé pour traiter les photos et déterminer la géométrie des particules individuelles. La mesure des particules par analyse d'images montre que le tamisage mécanique sous-estime la longueur réelle de 29% en moyenne pour la médiane (50% de masse cumulée) et de 62% pour la longueur étalon des fibres longues requises dans les rations laitières (85% de la masse cumulée). De plus, l'analyse d'images combinée avec des algorithmes de calcul peut fournir des mesures précises de largeur, épaisseur, surface, surface massique, ainsi qu'une estimation de la forme des particules selon l'irrégularité et l'élongation.

Mots-clés : fourrage, hachage, analyse d'images, tamisage, géométrie

INTRODUCTION

La taille et la forme des particules de fourrages hachés peuvent influencer l'efficacité alimentaire, la santé et la productivité des vaches laitières (Kononoff et al. 2003, Yansari et al. 2004). Une bonne connaissance des caractéristiques chimiques et physiques des rations permet de mieux satisfaire les besoins nutritionnels. D'une part, les longues particules augmentent la teneur en fibres, stimulent la production de salive et augmentent le pH dans le rumen ainsi que le taux de gras dans le lait. D'autre part, une trop grande proportion de longues particules peut limiter la digestibilité et affecter la valeur énergétique des rations. Shaver (1990) a d'ailleurs suggéré qu'environ 15% des particules de fourrages hachés, sur une base massique, devraient être plus longues que 38 mm.

La longueur des particules hachées influence aussi l'énergie requise à la récolte et la qualité de conservation en ensilage, tel que rapporté par Savoie et al. (2013a). Ainsi, une longueur optimale

est recherchée afin d'obtenir un fourrage bien haché, bien conservé et bien utilisé en production animale. La méthode conventionnelle de mesure de la longueur des particules de fourrage hachées est par tamisage mécanique, une méthode normalisée depuis plus de 35 ans (Finner et al. 1978; ASABE 2013). Cependant, plusieurs lacunes de cette méthode ont été identifiées par Igathinathane et al. (2011) qui ont utilisé l'analyse d'images pour obtenir des mesures exactes par particule individuelle. Savoie et al. (2013a, b) ont d'ailleurs montré que, pour la luzerne et le maïs hachés finement entre 5 et 11 mm de longueur de hachage théorique (LHT), le tamisage sous-estimait la longueur en moyenne de 31%. De plus, l'analyse d'images fournit des informations détaillées au niveau de la surface des particules, ce qui permet d'estimer non seulement la longueur, mais aussi une largeur moyenne. Avec une mesure additionnelle de pesée, il est possible d'estimer l'épaisseur, le volume et la surface massique, c'est-à-dire par unité de masse des particules.

La présente étude rapporte de nouvelles données de tamisage et d'analyse d'images appliquées à des particules hachées grossièrement, entre 13 et 30 mm de LHT. Le premier objectif est de démontrer que l'analyse d'images peut être appliquée à diverses plages de longueur de particules. On peut ainsi obtenir des informations détaillées sur la longueur, la largeur, l'épaisseur, la surface et la surface massique qui peuvent éventuellement aider à expliquer les phénomènes de conservation et d'utilisation des fourrages. Le second objectif est de proposer une analyse approfondie de la forme des particules hachées, qui peuvent varier de surfaces simples (cercle, carré, rectangle) à des formes complexes (ellipse allongée, étoile, polygone effiloché). L'analyse d'images fournit des données micrométriques (pixel par pixel) du contour des particules. Avec des méthodes d'analyse numériques avancées comme la méthode du *Normalized Multiscale Bending Energy* (NMBE) (Costa et Cesar 2009), on peut alors caractériser la forme des particules en diverses classes, en fonction des facteurs d'irrégularité et d'élongation, notamment.

MÉTHODOLOGIE

Récolte des fourrages

La récolte du maïs fourrager a été effectuée à la ferme expérimentale de Deschambault (Québec, Canada) en octobre 2013. La fourragère utilisée, de type traîné (New Holland FP 240), a été opérée avec six couteaux sur le tambour hacheur et ajustée avec trois engrenages selon la charte du manufacturier (12, 26 et 30 dents). Ces ajustements donnaient des longueurs de hachage théoriques (LHT) de 3/8, 3/4 et 7/8 po à 1000 tours par minute (TPM). Cependant, pour obtenir des longueurs encore plus grandes, le régime de la prise de force a été abaissé à 750 TPM, ce qui donne des LHT de 1/2, 1 et 7/6 po (12,7, 25,4 et 29,6 mm).

Conservation des fourrages et traitement initial par tamisage mécanique

Des échantillons de 10 kg de maïs fourrager à chaque LHT ont été entreposés dans un réfrigérateur à 4 °C. Pour chaque LHT, trois sous-échantillons de 100 g ont été pesés et mis à l'étuve à 103 °C pendant 24 h pour mesurer la teneur en eau (TEE) initiale selon la norme de l'ASABE (2013b). Lorsque le fourrage était initialement très humide, il était préalablement aéré et séché afin d'atteindre une TEE d'environ 60 % avant le tamisage mécanique, conformément à la norme de l'ASABE (2013a).

Trois sous-échantillons de 1,5 kg étaient prélevés pour chacune des trois LHT pour le tamisage mécanique (9 tamisages au total). Pour le tamisage des particules de maïs à l'automne 2013, on a

utilisé six tamis superposés des plus grands trous, pratiquement carrés, aux plus petits trous. Les diagonales des trous étaient : 32,51, 25,37, 16,69, 8,57, 5,12 et 1,81 mm, respectivement. Le plateau de fond (la « panne ») était placé sous celui aux plus petits trous (1,81 mm). Dans les résultats, les tamis utilisés sont numérotés (de #1 à #6) selon l'ordre de diagonale décroissante. Après tamisage (deux minutes de vibration, selon la norme), le matériel se trouvant dans chacun des tamis était pesé avec une balance de précision $\pm 0,1$ g. Pour les 9 tamisages, trois sous-échantillons étaient prélevés par tamis à des fins de prise de photo et d'analyse d'images. Aucun échantillon n'était prélevé dans la panne car ce matériel était trop fin pour une manipulation des fibres individuelles et l'analyse d'images. Il y avait donc un total de 162 photos analysées pour les particules de maïs (1 type de fourrage x 3 LHT x 3 tamisages x 6 tamis x 3 photos).

Acquisition des images

La procédure de prise de photo des particules de fourrages durant cette deuxième année de récolte, à l'automne 2013, était semblable à celle décrite pour les fourrages récoltés durant l'année précédente, à l'automne 2012 (Savoie et al. 2013a, b), notamment au niveau du type d'appareil photo et des distances entre la surface de disposition des particules et l'obturateur.

Cependant, la surface de contraste, à l'origine un carton blanc, a été changée par un matériel phosphorescent (Glow-in-the-dark-vinyl, model 0820, Avery Dennison Corp., Pasadena, CA). Cette nouvelle surface, de la grandeur d'une feuille de format A4, offre d'excellents contrastes entre les particules et le fond lorsque la pièce est dans l'obscurité, indépendamment de la couleur et de la complexité des particules. Le montage expérimental était installé dans une pièce sans fenêtre permettant d'obtenir une obscurité quasi totale. Deux lampes halogènes de 50 W ont remplacé les ampoules incandescentes de 100 W utilisées l'année précédente, au même emplacement à 0,5 m au-dessus de la surface où sont étalées les particules. Entre chaque prise de photos, les lampes halogènes éclairent la surface pendant deux minutes assurant ainsi une recharge constante pour toutes les photos. Finalement, avant de prendre chaque photo de particules, une photo d'une règle millimétrée est prise (avec les lumières allumées) afin d'établir le ratio de la longueur réelle occupée par chaque pixel sur la surface (mise à l'échelle). Immédiatement après les deux minutes de recharge de la surface phosphorescente, les deux lampes de 50 W sont éteintes puis les particules d'un échantillon sont dispersées sur la surface. Les deux lampes de recharge restent fermées sans quoi l'ombre des particules serait considérée comme faisant partie la particule. Les particules individuelles ne doivent pas se superposer afin d'être considérées comme des particules différentes par le logiciel d'analyse d'images.

Description de la procédure d'analyse d'images

Dans un premier temps, chaque image est importée dans le logiciel MATLAB® qui fait une numérisation de toute la surface. Chaque pixel a une valeur de gris entre 0 (noir) et 255 (blanc). Afin d'améliorer l'image, des filtres éliminent le bruit et les imperfections, rehaussant ainsi les contrastes. Toute la surface est alors transformée en pixels binaires, noirs (particule) ou blancs (surface sans particule). La mise à l'échelle est faite en connaissant la largeur réelle d'une photo (mesurée) et le nombre de pixels en largeur de photo. Dans cette étude, la résolution linéaire d'un pixel était de 0,093 mm. Pour chaque particule photographiée, le logiciel calcule d'abord trois paramètres : l'aire, le périmètre et la longueur vectorielle (la plus grande distance entre deux points sur la périphérie, Figure 1). Les très petites particules peuvent parfois s'agglomérer en tas de poussière. Pour éviter de les compter, seulement les particules avec une surface minimale de 300 pixels (2,6 mm²) étaient considérées.

La mesure de la forme de chaque particule a été établie à partir de la méthode du NMBE (Costa et Cesar, 2009). Deux facteurs sont quantifiés : l'irrégularité et l'élongation. La Figure 2 illustre ces deux facteurs avec des formes contrastées. Enfin, les données de chaque particule sont exportées dans le logiciel Excel où on complète le traitement exhaustif par photo et pour l'ensemble des particules de tous les plateaux d'un même fourrage. Pour chaque particule, on exporte vers Excel cinq paramètres : la longueur vectorielle, l'aire, le périmètre, le facteur d'irrégularité et le facteur d'élongation.

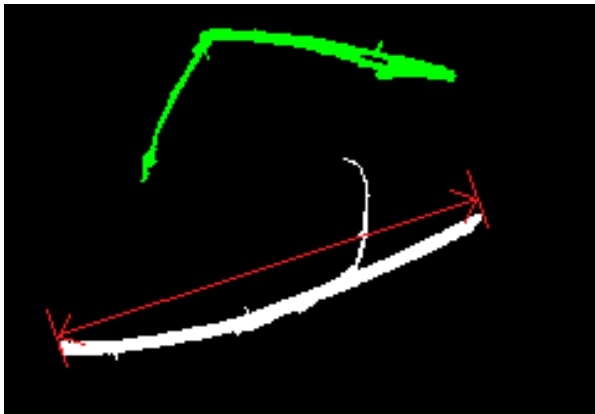


Figure 1. Exemple de particules numérisées et mesure de longueur vectorielle (ligne fléchée).

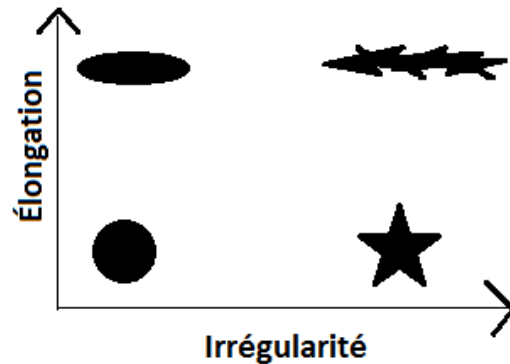


Figure 2. Échelles relatives d'irrégularité et d'élongation pour classer les particules.

Détermination de la troisième dimension et d'autres mesures

L'analyse d'images fournit les détails en deux dimensions. La détermination de la troisième dimension, l'épaisseur de chaque particule, repose sur deux hypothèses : 1) la masse volumique des fourrages est considérée constante (estimée à 730 kg de matière sèche/m³, selon Savoie et al. 2013a); 2) l'épaisseur des particules d'une même photo est considérée constante (car il est pratiquement impossible de peser chaque particule individuelle).

Suite à la prise de photos, les 162 échantillons ont été mis à l'étuve pendant 72 heures à 60 °C (ASABE 2012b) pour ensuite être pesés avec une balance de précision $\pm 0,1$ mg (Mettler Toledo, NewClassic MF, MS204S). Ainsi, pour une photo donnée, on connaît la masse totale (m_t) de toutes les particules. On fait la somme de l'aire de chaque particule (A_i). À partir de la masse volumique moyenne ρ , on obtient l'épaisseur moyenne ($e_{moy.}$) par le calcul suivant :

$$e_{moy.} = \frac{m_t}{\rho \cdot \sum A_i} \quad \text{Équation (1)}$$

L'épaisseur étant considérée constante pour toutes les particules d'une même photo, il est alors possible d'attribuer une masse à chaque particule (m_i) :

$$m_i = m_t * \frac{A_i}{\sum A_i} \quad \text{Équation (2)}$$

Puisque l'analyse d'images fournit le périmètre de chaque particule (P_i), on peut alors déterminer la surface massique (S_m), c'est-à-dire la surface externe divisée par la masse. La surface totale externe de chaque particule suppose une extrusion polyédrique d'épaisseur constante.

$$S_m = \frac{e_{moy.} * P_i + 2 * A_i}{m_i} \quad \text{Équation (3)}$$

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Mesure par tamisage mécanique

Le tamisage mécanique permet d'estimer la distribution d'une longueur en fonction de la masse cumulée. Pour les trois LHT (12,7, 25,4 et 29,6 mm), on a observé des longueurs médianes, à 50% de masse cumulée, de 12,2, 17,7 et 19,2 mm, respectivement (Tableau 1). Les longueurs qui représentaient 85% de la masse cumulée étaient de 20,1, 24,6 et 24,6 mm, respectivement. Selon ces mesures, aucune de ces trois LHT ne contiendrait la masse minimum de 15% de particules supérieures à 38 mm, suggérée par Shaver (1990) pour éviter les problèmes métaboliques durant l'alimentation des vaches laitières. On verra plus loin toutefois que le tamisage mécanique sous-estime la longueur réelle des particules.

Mesure par analyse d'images

L'analyse d'images permet d'obtenir la longueur et la surface exactes de chaque particule. Dans un premier temps, la distribution des longueurs de particules peuvent être exprimées pour chaque tamis (exemple à la Figure 1). Ensuite les distributions de chaque tamis sont intégrées selon une procédure qui tient compte de la répartition de la masse, expliquée par Savoie et al (2013a, b).

Les Figures 2, 3 et 4 montrent les distributions exactes, selon la procédure d'analyse d'images, et les points générés par le tamisage mécanique pour chacun des tamis, aux trois LHT du maïs. On note que les longueurs estimées dans les plateaux sont toujours inférieures aux longueurs réelles mesurées par analyse d'images. Le Tableau 1 montre les longueurs estimées à 50 et 85% de masse cumulée ainsi que les différences relatives entre les deux méthodes pour les trois LHT. La mesure par tamisage mécanique sous-estime en moyenne de 28,8% la longueur réelle des particules à 50% de masse cumulée et de 61,5% à 85% de masse cumulée. Les longueurs mesurées par analyse d'images à 50% de masse cumulée se rapprochent des longueurs de hachage théoriques (LHT). Le traitement statistique par analyse de variance (ANOVA) avec un plan en blocs complet, considérant les trois LHT comme des blocs, confirme que la mesure par tamisage mécanique sous-estime significativement ($\alpha = 0,05$) la longueur réelle des particules, telle que mesurée par l'analyse d'images.

Tableau 1. Longueurs et différence relative (sous-estimation) entre le tamisage mécanique et l'analyse d'images pour 50% et 85% de masse cumulée, selon trois LHT de maïs fourrager.

LHT	Longueur à 50% de masse cumulée			Longueur à 85% de masse cumulée		
	Tamisage mécanique	Analyse d'images	Sous-Estimation	Tamisage mécanique	Analyse d'images	Sous-Estimation
(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(mm)	(%)
12,7	12,2	14,4	18,0	20,1	33,1	64,7
25,4	17,7	23,8	34,5	24,6	40,9	66,3
29,6	19,2	25,7	33,9	24,6	37,8	53,7
	Moyenne		28,8	Moyenne		61,5

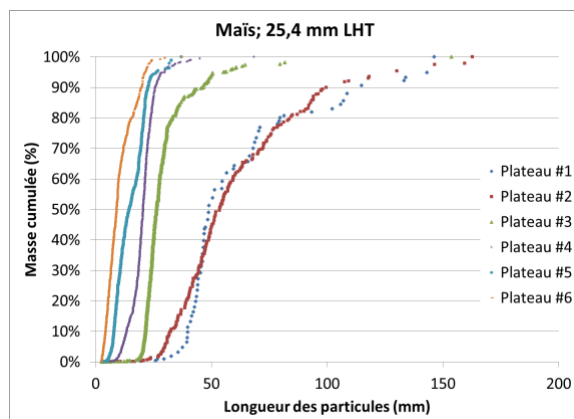


Figure 1. Exemple de distribution massique cumulée selon la longueur pour les différents plateaux (LHT de 25,4 mm).

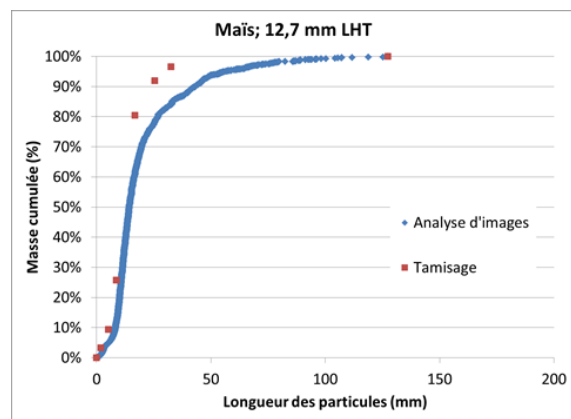


Figure 2. Distribution massique cumulée en fonction de la longueur, par tamisage et analyse d'images (LHT de 12,7 mm).

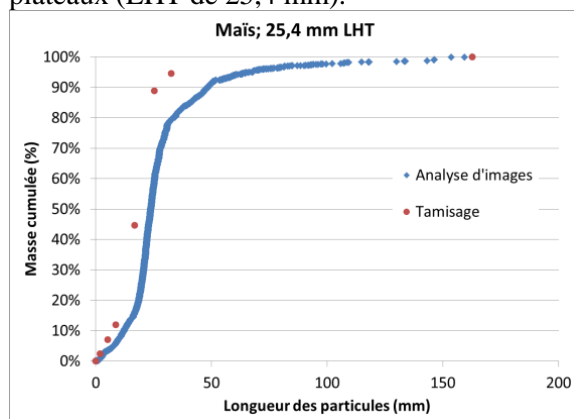


Figure 3. Distribution massique cumulée en fonction de la longueur, par tamisage et analyse d'images (LHT de 25,4 mm).

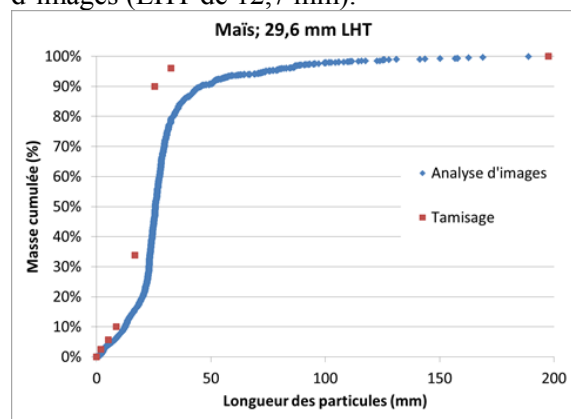


Figure 4. Distribution massique cumulée en fonction de la longueur, par tamisage et analyse d'images (LHT de 29,6 mm).

Les tableaux 2, 3 et 4 montrent les différentes variables mesurées pour chaque tamis et pour chaque LHT. Chaque valeur dans ces tableaux est une moyenne de 9 mesures (3 tamisages par LHT et 3 sous-échantillons pris dans chaque tamis). On note des valeurs plus élevées de la longueur, de l'aire et de l'épaisseur pour les particules des plateaux supérieurs et pour les LHT plus grandes. La longueur et l'aire pondérée par la masse sont plus grandes que celles basées uniquement sur le nombre de particules. Cela s'explique par la forte proportion de petites particules de faible masse dans les échantillons photographiés. Or, puisque les rations fournies aux animaux sont mesurées en unité de masse, il est préférable de considérer les valeurs pondérées par la masse. Enfin, la surface massique plus faible dans les plateaux supérieurs s'explique par la présence de particules plus grossières.

Tableau 2. Variables géométriques mesurées par analyse d'images pour les différents plateaux.
LHT de 12,7 mm.

Plateau	Nb particules	Longueur			Longueur pondérée par la masse		Aire		Aire pondérée par la masse		Masse par image	Épaisseur	Surface massique
		(mm)			(mm)		(mm ²)		(mm ²)		(g)	(mm)	(mm ² /g)
	Moy.	Moy.	E.T.	Max	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.		Moy.
1	7	49,4	29,3	127,3	58,4	25,6	695,2	519,3	1077,0	430,9	6,089	1,8	1987
2	18	45,5	26,0	111,7	53,9	19,3	429,4	332,5	685,2	259,8	6,784	1,2	2818
3	46	31,3	17,8	118,8	40,7	21,7	180,1	148,2	301,7	193,2	2,036	0,4	8820
4	91	14,7	5,6	65,2	16,7	7,2	63,0	37,7	85,5	49,7	1,051	0,3	11943
5	122	9,7	2,6	25,0	10,5	3,1	22,9	12,9	30,1	19,0	0,470	0,2	13583
6	119	6,4	2,6	20,9	7,8	3,3	8,9	8,2	16,5	21,4	0,160	0,2	15903

Tableau 3. Variables géométriques mesurées par analyse d'images pour les différents plateaux.
LHT de 25,4 mm.

Plateau	Nb particules	Longueur			Longueur pondérée par la masse		Aire		Aire pondérée par la masse		Masse par image	Épaisseur	Surface massique
		(mm)			(mm)		(mm ²)		(mm ²)		(g)	(mm)	(mm ² /g)
	Moy.	Moy.	E.T.	Max	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.		Moy.
1	8	51,8	34,4	146,2	65,0	31,8	782,3	553,0	1167,9	503,7	10,100	2,3	1647
2	23	53,7	27,1	162,7	63,1	30,9	463,7	320,2	683,7	421,8	3,415	0,5	6765
3	49	27,0	11,6	153,7	31,4	19,2	170,7	109,6	240,9	176,2	2,255	0,4	8059
4	75	18,8	6,2	68,4	20,7	6,3	76,1	43,9	101,3	47,4	1,296	0,3	9785
5	83	12,7	5,4	37,1	15,5	6,5	30,3	26,3	53,2	55,4	0,405	0,2	13999
6	107	6,8	4,4	37,1	10,2	5,9	12,4	12,3	24,5	21,2	0,201	0,2	15472

Tableau 4. Variables géométriques mesurées par analyse d'images pour les différents plateaux.
LHT de 29,6 mm.

Plateau	Nb particules	Longueur			Longueur pondérée par la masse		Aire		Aire pondérée par la masse		Masse par image	Épaisseur	Surface massique
		(mm)			(mm)		(mm ²)		(mm ²)		(g)	(mm)	(mm ² /g)
	Moy.	Moy.	E.T.	Max	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.	E.T.	Moy.		Moy.
1	12	65,2	42,9	197,6	91,4	47,3	684,7	697,9	1389,5	1087,5	6,698	1,1	2961
2	23	53,8	27,1	162,8	63,5	31,3	469,7	332,4	703,8	420,2	2,784	0,4	8354
3	51	27,5	9,7	125,1	30,2	11,5	180,2	99,2	234,7	106,8	2,694	0,4	7491
4	76	18,5	6,2	49,3	20,5	6,2	73,2	43,4	98,9	52,6	1,699	0,4	7563
5	82	12,5	6,0	45,1	15,0	6,7	31,6	20,6	44,9	26,9	0,500	0,3	11854
6	108	5,0	2,6	25,6	6,7	4,1	7,4	6,5	13,0	16,0	0,128	0,2	15171

Caractérisation de la forme des particules

En utilisant la méthode du NMBE (*Normalized Multiscale Bending Energy*), il est possible de caractériser la forme des particules selon deux facteurs, l'irrégularité et l'élongation. Comme pour la mesure de la longueur des particules, les résultats sont illustrés sous la forme de courbes massiques cumulées par plateau. La Figure 5 montre un exemple quant à l'irrégularité des particules pour chacun des tamis à une LHT de 25,4 mm. D'après ce graphique, on voit que les particules dans le plateau 2 (aux trous relativement grossiers, courbe à droite) sont de forme plus irrégulière alors que les particules du plateau 6 (aux trous relativement petits, courbe à gauche)

ont une forme plus circulaire. La Figure 6 montre, toujours pour une LHT de 25,4 mm, la distribution massique des particules en fonction de leur élongation. Sur ce graphique, les particules contenues dans le plateau 1 (aux trous grossiers, courbe à gauche) sont plus compactes (cubiques ou sphériques), alors que dans les plateaux 2 et 5 (aux trous de longueur variable, courbes à droite), les particules ont une forme plus allongée (qui ressemble à l'ellipse).

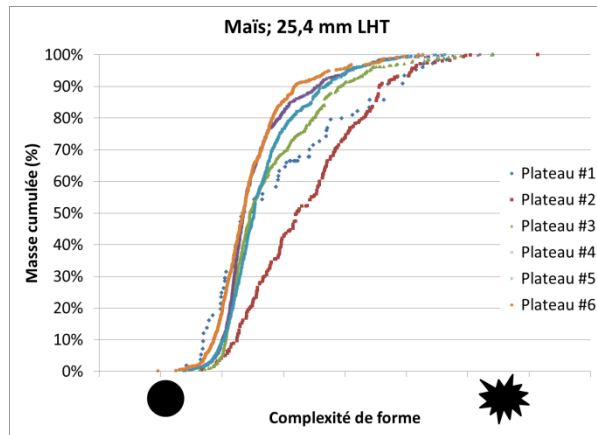


Figure 5. Distribution massique des particules en fonction de leur irrégularité pour les différents plateaux, LHT de 25,4 mm.

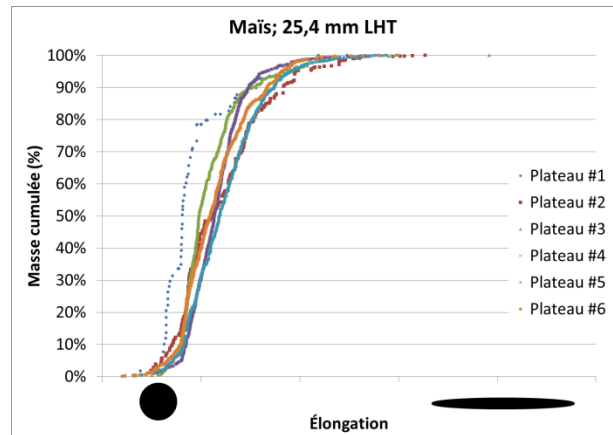


Figure 6. Distribution massique des particules en fonction de leur élongation pour les différents plateaux, LHT de 25,4 mm.

CONCLUSION

L'analyse d'images fournit des données très détaillées sur la géométrie des particules de fourrages hachées, y compris la longueur, le volume, l'épaisseur et la masse surfacique. En intégrant à l'algorithme des méthodes mathématiques plus sophistiquées, l'analyse d'images permet aussi une caractérisation quantitative de la forme des particules selon la régularité et l'élongation. Ces données sont relativement détaillées par rapport aux connaissances actuelles sur la fermentation des ensilages, l'ingestion des fourrages et la digestion des rations. Par contre, la technique peut éventuellement être implantée dans les laboratoires d'analyse de fourrages et servir à l'avenir à diagnostiquer des problèmes de conservation des fourrages ou des troubles digestifs chez les animaux. Ces informations complémentaires sur les particules pourront également servir aux fabricants de fourragères pour intégrer des algorithmes d'optimisation de la longueur de hachage en temps réel durant la récolte.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Agriculture et Agroalimentaire Canada pour son soutien dans la réalisation de cette étude via les fonds du Prix du mérite scientifique. Ils remercient également le personnel du CRSAD (Centre de recherche en sciences animales de Deschambault), en particulier Mme Annie Dumas et M. Jean Sauvageau, pour leur excellente collaboration à ce projet.

LISTE DES OUVRAGES CITÉS

- ASABE. 2013a. Method of Determining and Expressing Particle Size of Chopped Forage Materials by Screening. Standard S424.1. 3 pages. ASABE, St. Joseph, MI.
- ASABE. 2013b. Moisture Measurement – Forage. ANSI/ASABE Standard S358.2. 1 page. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI.
- Costa L. da F., L., Cesar., R. M. 2009. Shape classification and analysis. Theory and practice. Second edition. CRC Press, Taylor and Francis Group. Boca Raton, FL, USA. 612 pages.
- Finner, M., Hardzinski, J., Pagel, L. 1978. Evaluating particle length of chopped forages. ASAE technical paper no. 78-1047. 7 pages. For presentation at the summer meeting American Society of Agricultural Engineers. Logan, Utah, June 27-30, 1978. ASAE: St. Joseph, MI.
- Igathinathane, C., Ulusoy, U., Pordesimo, L. O. 2011. Machine Vision Based Particle Size Distribution of Particulate Minerals and its Experimental Verification. ASABE Paper 1110656. 19 pages. Presented at the Amer. Soc. of Agric. and Biological Engineers' Annual International Meeting, Louisville, Kentucky, August 7-10, 2011. ASABE: St. Joseph, MI.
- Kononoff, P. J., A. J. Heinrichs and D. R. Buckmaster. 2003. Modification of Penn State forage and total mixed ration particle separator and the effects of moisture content on its measurements. Journal of Dairy Science 86:1858-1863.
- Savoie, P., M.-A. Audy-Dubé, C. St-Arnaud et R. Morissette. 2013a. Mesure des particules de fourrages en trois dimensions. Demi journée d'information scientifique sur les fourrages, Victoriaville, le 14 février. Pages 37 à 46. CQPF-CRAAQ. <http://www.agrireseau.qc.ca/>
- Savoie, P., M.-A. Audy-Dubé, G. Pilon and R. Morissette. 2013b. Chopped forage particle size analysis in one, two and three dimensions. ASABE Paper 131620148. 14 pages. Presented at the American Society of Agricultural and Biological Engineers' Annual International Meeting, Kansas City, MO, July 21-24, 2013. ASABE: St. Joseph, MI.
- Savoie, P., Pilon, G., Mani, S. 2013c. Particle size measurement by static and dynamic image analysis for processed woody biomass crops. ASABE Paper 131578073. 13 pages. Presented at the American Society of Agricultural and Biological Engineers' Annual International Meeting, Kansas City, MO, July 21-24, 2013. ASABE: St. Joseph, MI.
- Shaver, R. 1990. Forage particle length in dairy rations. Proc. from the Dairy Feeding Systems Symposium. Publication NRAES-38. Pages 58-64. Cooperative Extension, Ithaca, NY.
- Yansari, T., A., Valizadeth, R., Naserian, A., Christensen, D. A., Yu, P., Shahroodi, E. Nov. 2004. Effects of Alfalfa Particle Size and Specific Gravity on Chewing Activity, Digestibility, and Performance of Holstein Dairy Cows. J. Dairy Sci. 87(11): 3912-3924.

CAPACITÉ AU CHAMP, CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE ET ÉMISSION DE GAZ À EFFET DE SERRE DURANT LA FENAISSON

RENÉ MORISSETTE¹, PHILIPPE SAVOIE¹

¹Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 boulevard Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3

Courriel : rene.morissette@agr.gc.ca

RÉSUMÉ

La récolte du foin en petites balles rectangulaires demeure une activité importante pour plusieurs fermes d'élevage et pour le foin de commerce. La planification des opérations de récolte et de manutention est importante pour obtenir un fourrage de qualité qui se conserve bien. Les étapes de récolte habituelles sont la fauche, le conditionnement, le râtelage, le pressage, le ramassage et la manutention en entrepôt. Chaque opération génère une quantité de gaz à effet de serre (GES) liée à la consommation de carburant. Durant l'été 2012, 19 champs en seconde coupe ayant une superficie moyenne de 2,27 ha (43,17 ha au total) ont été suivis pour recueillir des données sur le temps d'exécution, la consommation de carburant et le rendement en matière sèche (MS). Les résultats démontrent que pour un rendement moyen de 2,5 t MS/ha (144 balles/ha, 18 kg MS/balle), les opérations de fauche et de pressage génèrent une plus grande quantité de GES par tonne de foin récolté (8,8 et 5,4 kg CO₂ équivalent par t MS, respectivement) comparativement au transport et à la manutention en entreposage (0,8 et 1,0 kg CO₂e, respectivement). Pour l'ensemble des opérations, 26,4 kg CO₂e/t MS sont émis, soit l'équivalent d'une consommation de 9,8 litres de diesel. Des scénarios d'optimisation ont démontré qu'il est possible de réduire ce niveau d'émission jusqu'à 17,5 kg CO₂e/t MS en utilisant de l'équipement plus approprié et en combinant certaines opérations.

Mots-clés : foin, pressage, macérateur, énergie, gaz à effet de serre, capacité de récolte

INTRODUCTION

La planification d'un chantier de récolte de foin est importante pour s'assurer du succès des opérations et obtenir un fourrage de qualité. De même, les équipements de fenaison choisis pour la fauche, le conditionnement, le fanage, le râtelage et le pressage, ainsi que les tracteurs associés, influencent l'énergie consommée et l'émission de gaz à effet de serre (GES). Dyer et Desjardins (2005) ont développé un modèle d'estimation des GES pour la production de foin en balles à partir d'un modèle général (Dyer and Desjardins, 2003). Leur modèle *Forage harvesting Energy, Emissions and Power estimating* (FEPE) estime les émissions à 41,4 kg CO₂e/ha pour un rendement de foin moyen au Québec de 816 kg/ha (à 15 % de teneur en eau). Cette estimation inclut les opérations de fauchage avec conditionnement, de râtelage, de pressage et de ramassage. Au niveau de la capacité au champ, Gupta et al. (1990a et 1990b) ont analysé trois systèmes de récolte basés sur le rendement en fourrage et les superficies récoltées. Selon ces auteurs, 20 ha en foin est considéré comme un petit système, 20 à 50 ha comme un moyen système et plus de 50 ha comme un grand système. Pour chaque système, le choix de la machinerie et des pratiques de récolte est important afin de rencontrer des indicateurs de capacité. La sélection de la machinerie

pour un système donné doit tenir compte du coût de production du foin et du retour sur l'investissement.

Une expérience a été réalisée à l'été 2012 au Québec afin de recueillir des données sur la séquence et la capacité des opérations de machinerie, la consommation de carburant et le rendement en matière sèche pour la production de petites balles de foin de graminées destinées au commerce. Les capacités et niveaux d'émission sont comparés aux données de référence.

MÉTHODOLOGIE

Description du site expérimental

Le suivi des récoltes a été effectué sur une ferme commerciale à Neuville, QC. Les prairies étaient principalement composées de fléole, de brome, de dactyle et de luzerne dans des proportions différentes pour chaque champ. La figure 1 présente le plan de ferme et le Tableau 3 (section Résultats et discussion) énumère les superficies des champs récoltés pour le suivi. Sur les 58,61 ha disponibles en prairie sur la ferme, 43,17 ha ont été suivis pendant la 2^e coupe entre le 30 juillet et le 17 septembre 2012, répartis en 19 champs. Le plus petit champ suivi avait une superficie de 0,23 ha (no. 10) et le plus grand 4,74 ha (no. 28). En moyenne, les champs suivis avaient une superficie de 2,27 ha. Certains grands champs ont été subdivisés pour une meilleure planification des récoltes (par exemple, le champ 22 qui devient 22A et 22B).

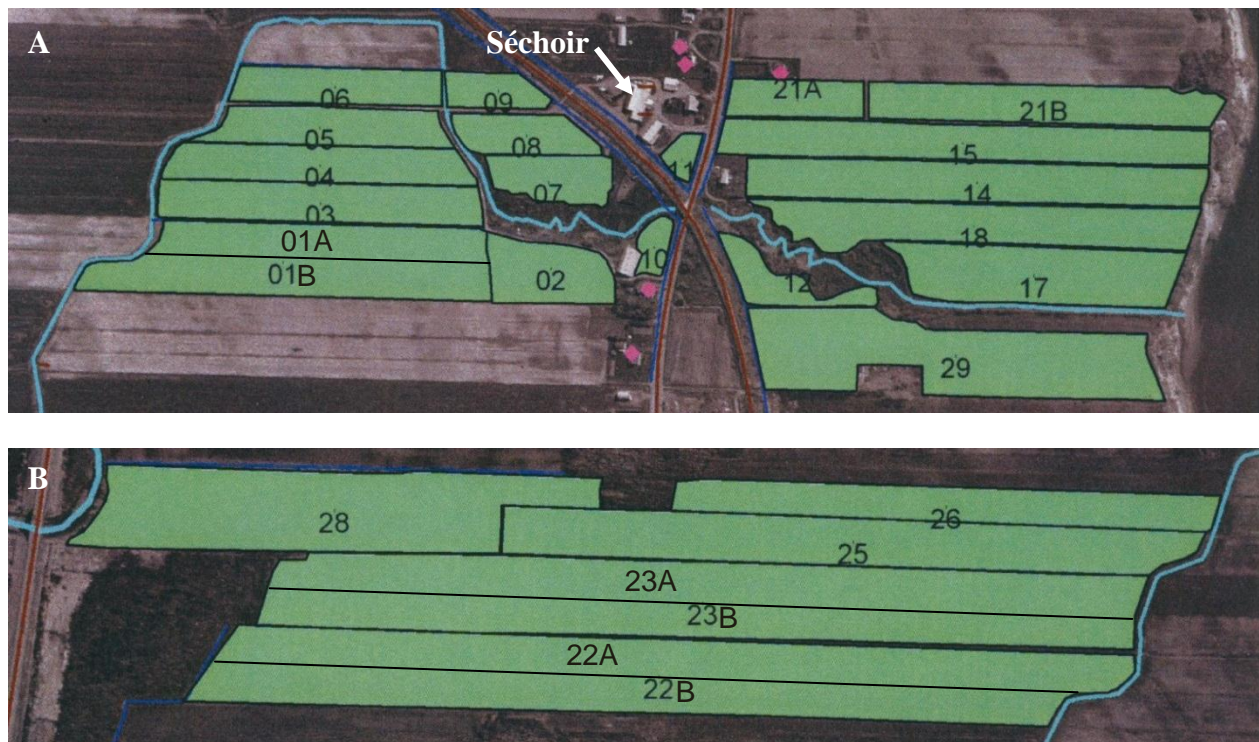


Figure 1. Plan des champs de foin récoltés à Neuville (carte sud (A), carte nord (B)).

Opérations de récolte et description de la machinerie

Dans cette étude, l'herbe a été coupée entre 6h00 et 9h00 avec une faucheuse traînée (Vicon, Kverneland, Norvège) d'une largeur de 2,82 m et équipée d'un conditionneur à rouleaux. Le chevauchement moyen entre les passages était de 0,23 m, ce qui résulte en une largeur effective

de 2,59 m. Les andains formés avaient une largeur moyenne de 1,35 m, soit 52 % de couverture du sol. La hauteur de coupe a été ajustée à 10 cm.

Entre 1 et 4 h après la fauche, un surconditionnement était effectué à l'aide d'un macérateur (Macerator 6610, Agland Industries, Saint-Tite, QC) comportant 2 paires de rouleaux : une paire en caoutchouc suivie d'une paire en acier cannelé tournant à des vitesses différentes. Le macérateur conditionnait un andain à la fois. L'ajustement de pression des rouleaux du macérateur était maintenu à 35 psi (240 kPa) pour ceux en caoutchouc et à 6 psi (40 kPa) pour ceux en acier. L'espacement entre les rouleaux du même type était de 0,8 mm. Un passage de faneur (Krone KWT 8.82/8, Spelle, Allemagne) était ensuite effectué entre 2 et 3 h après le macérateur. La largeur nominale du faneur était de 8,76 m et le chevauchement entre les passages était d'environ 1 m, pour une largeur effective de 7,8 m (trois andains à la fois). Le lendemain, un second passage de faneur était fait en matinée, après le retrait de la rosée entre 8h00 et 10h00.

Le râtelage (Fella 425, Feucht, Allemagne) était fait en début d'après-midi. La largeur de travail du râteau était de 3,4 m et les andains étaient généralement doublés, donnant ainsi un espacement centre-à-centre des andains de 7,2 m. Vers le milieu de l'après-midi, l'opération de pressage débutait. La presse à petites balles (New Holland 570, New Holland, PA, États-Unis) était équipée d'un groupeur de balles (Syst-M Cardinal, St-Benoît de Mirabel, QC) permettant de faire des paquets de 18 balles. Afin de minimiser le temps de ramassage des balles, le groupeur pouvait accumuler deux paquets avant de les déposer à un endroit stratégique (en bout de champ ou au milieu avec tous les autres paquets). Les paquets étaient chargés à l'aide d'un grappin (Syst-M Cardinal) sur des remorques à foin standards dont trois d'entre elles pouvaient contenir jusqu'à 10 paquets et une contenait 15 paquets. La dernière étape consistait à amener le foin à l'entrepôt ventilé (séchoir solaire situé à moins de 1,5 km des champs) et à le décharger sur un plancher ajouré. Une description complète du séchoir solaire est présentée par Morissette et Savoie (2011).

Le Tableau 1 présente les caractéristiques techniques des tracteurs utilisés avec les machines de fenaison : un John Deere 5065M, un Case 110 MAXXUM, un Deutz-Fahr 7085, un International 844S et un International 624. Le Tableau 2 rapporte les coefficients d'émissions (GES) tirés d'Environnement Canada (2013) pour chaque tracteur selon le type de catalyseur : perfectionné, efficacité modérée ou sans dispositif. La classification a été attribuée à chaque tracteur en fonction de ses caractéristiques. Avec la consommation du tracteur, il sera possible de déterminer la quantité de CO₂ équivalent (CO₂e) pour chaque opération sur une base horaire, par ha et par tonne de foin (MS) produite. L'équation 1 permet de calculer la quantité de CO₂ équivalent avec les coefficients d'émission (g/L) du Tableau 2. Eurostat (2013) rapporte que les facteurs d'équivalence CO₂ pour le méthane (CH₄) et pour le dioxyde d'azote (N₂O) sont de 25 et 310 respectivement.

$$CO_2e (g) = Diesel (L) \times (coef CO_2 + 25 \times coef CH_4 + 310 \times coef N_2O) \quad \text{Équation 1}$$

COLLECTE DES DONNÉES

Les superficies des champs ont été relevées sur le plan de ferme disponible (Figure 1). Lorsqu'un champ devait être subdivisé pour des raisons logistiques, les nouvelles parcelles ont été mesurées à l'aide d'une roue à mesurer. Des données d'opération pour chaque étape de récolte ont été consignées par les opérateurs dans un registre. Les données recueillies sont la date, l'heure de début, de fin et les pauses (durée) de chaque opération (fauche, macérateur, fanage, râtelage, pressage, ramassage et transport des balles, manutention en entrepôt), la consommation de diesel à l'aide d'un compteur volumétrique (FIL 807CMK, précision 1/10 litre), le tracteur utilisé, le champ récolté, le nombre de balles produites dans le champ, la masse d'au moins une remorque remplie de balles (à l'aide de 4 balances à roue modèle CAS RW-S 10000 x 5 lbs, NJ, États-Unis), le nombre de balle sur la remorque pesée et la masse à vide de cette remorque. De plus, 5 échantillons d'au moins 200 g de foin devaient être prélevés aléatoirement dans le champ lors du pressage afin de déterminer la teneur en eau des balles, et par calcul la matière sèche totale récoltée. Le prélèvement de ces échantillons devait être réparti sur la durée du pressage afin d'obtenir une moyenne valide. Les échantillons de foin ont été mis dans des sacs de papier, pesés et placés à l'étuve à 103°C pendant 24 h selon la méthode de l'ASABE (2013).

Tableau 1. Tracteurs utilisés pour les opérations de fenaison.

Modèle	Puissance (PTO)	Moteur	Traction	Utilisation principale
John Deere 5065M	65 hp (56 hp) 48,5 kW (42,4 kW)	5 cyl. Powertech 030 3 L diesel	4RM ou 2RM	Fanage
Case IH MAXXUM 110	110 hp (95 hp) 82 kW (70,8 kW)	6 cyl. Cummins 5,9 L diesel	4RM	Fauche et pressage
Deutz-Fahr 7085	85 hp (72 hp) 63,4 kW (53,9 kW)	4 cyl. 4 L diesel, refroidi à l'air	4RM	Macérateur, manutention des grappins (champs et entrepôt)
International 844S	87 hp (73 hp) 69,4 kW (54,4 kW)	4 cyl. IH D-268 4,4 L diesel	2RM	Transport et manutention des balles, fanage (occasionnel)
International 624	58 hp 43,3 kW	2 cyl. IH D-206 3,4 L diesel	2RM	Râtelage

Tableau 2. Coefficients d'émission pour les véhicules lourds à moteur diesel.

Modèle de tracteur	Année	Classe de catalyseur	Coefficient d'émission (g/L)		
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O
John Deere 5065M	2011	Dispositif perfectionné	2663	0,11	0,151
Case IH MAXXUM 110	1999	Dispositif perfectionné	2663	0,11	0,151
Deutz-Fahr 7085	1986 (est.)	Dispositif à efficacité modérée	2663	0,14	0,082
International 844S	1975 (est.)	Sans dispositif	2663	0,15	0,075
International 624	1970 (est.)	Sans dispositif	2663	0,15	0,075

Source : Environnement Canada (2013)

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Résumé des récoltes

Le Tableau 3 montre la date, la superficie, la masse moyenne des balles, la teneur en eau lors du pressage et la masse totale récoltée par champ. La masse moyenne des petites balles lors du pressage était de 21,2 kg à une teneur en eau de 15 %. Les teneurs en eau variaient entre 11,9 et 18,3 %. En moyenne, le nombre de balles récoltées par champ était de 328. Le rendement variait beaucoup selon les champs et le stade de maturité de l'herbe : entre 1443 et 4025 kg MS/ha avec une moyenne de 2505 kg MS/ha (ou 118 balles de 18 kg MS/ha). En général, une période d'environ 40 jours s'était écoulée entre la première et la seconde coupe et ce pour tous les champs.

Tableau 3. Dates, superficies et rendement des champs récoltés en deuxième coupe.

Champ	Date 2012-	Superficie récoltée (ha)	Masse d'une balle (kg)	TEE (%)	Balles récoltées	Masse récoltées		
						(kg)	(kg MS)	(kg MS/ha)
12	07-31	0,62	23,1	13,7	58	1337	1154	1861
15	07-31	1,66	21,0	12,1	174	3659	3215	1937
21A	07-31	0,80	19,9	12,1	135	2686	2361	2951
21B	07-31	1,88	20,1	11,9	179	3606	3177	1690
6	08-19	1,05	21,6	17,3	176	3796	3138	2989
9	08-20	0,47	20,1	14,5	92	1850	1582	3367
10	08-20	0,23	21,6	14,5	18	388	332	1443
29	08-21	3,76	18,3	16,0	423	7725	6489	1726
17	08-22	2,17	21,5	13,4	253	5452	4719	2175
18	08-22	2,40	20,4	12,5	363	7415	6489	2704
5	08-23	1,21	20,9	16,8	196	4097	3407	2815
25	08-23	4,35	20,4	15,6	497	10156	8576	1972
26	08-25	2,53	21,5	16,3	354	7622	6379	2521
1A	09-11	1,90	22,2	18,3	265	5879	4804	2528
23A	09-11	4,39	22,2	14,6	626	13887	11860	2705
4	09-12	1,58	21,1	18,0	213	4498	3689	2335
23B	09-12	3,37	21,1	14,6	525	11087	9469	2811
22A	09-13	4,40	22,1	16,1	954	21087	17689	4025
22B	09-14	4,40	21,8	16,1	732	15925	13360	3040
Moyenne		2,27	21,1	15,0	328	6955	5889	2505
Maximum		4,40	22,18	18,3	954	21087	17689	4025
Minimum		0,23	18,26	11,9	18	388	332	1443
Somme		43,17			6233	132153	111890	

Afin d'extraire un portrait type de la capacité de récolte, de la consommation énergétique et des émissions de GES pour chaque opération, il est utile de regrouper les données par période de récolte. Le **Tableau 4** présente un exemple de données recueillies lors des opérations. Dans ce cas, les champs 17 et 18 furent récoltés consécutivement, c'est-à-dire que chaque même opération se poursuivait dans le second champ. Suivant ce mode de récolte, le plein de carburant des

tracteurs était effectué seulement au début et à la fin de l'opération pour les 2 champs. La consommation totale par opération a donc été répartie sur le temps consacré pour chaque champ.

Tableau 4. Exemple de cahier de charge pour les champs 17 et 18 récoltés consécutivement.

Date 2012-	Heure début	Heure fin	Pause (min)	Temps (min)	Opération	Tracteur	Champ	Superficie (ha)	Diesel (L) ¹
08-21	05:49	07:08		79	Fauche	Case	18	2,40	
08-21	07:08	08:09		61	Fauche	Case	17	2,17	25,9
08-21	08:41	10:21	33	67	Macérateur	Deutz	18	2,40	
08-21	10:22	11:28	3	63	Macérateur	Deutz	17	2,17	17,1
08-21	12:21	12:50		29	Fanage 1	JD	18	2,40	
08-21	12:50	13:14		24	Fanage 1	JD	17	2,17	7,9
08-22	09:21	10:04		43	Fanage 2	JD	18	2,40	
08-22	10:04	10:39		35	Fanage 2	JD	17	2,17	6,0
08-22	11:16	12:53	7	90	Râtelage	624	18	2,40	
08-22	13:33	14:48		75	Râtelage	624	17	2,17	8,0
08-22	14:58	16:15		77	Pressage	Case	18	2,40	
08-22	16:20	17:20		60	Pressage	Case	17	2,17	16,5
08-22	15:19	16:33		74	Transport	844	18	2,40	
08-22	16:35	17:34		59	Transport	844	17	2,17	4,2
08-22	16:15	19:45	20	190	Manutention	Deutz	17, 18	4,57	4,0

¹La quantité de diesel utilisée est pour une même opération, pour les 2 champs.

Capacité, consommation énergétique et GES

Afin d'obtenir une vue globale des opérations de récolte, l'ensemble des données a été regroupé et présenté sous forme de moyenne pour chaque opération. Le **Tableau 5** résume les capacités, la consommation de diesel et les émissions pour chaque opération de fenaison. Chaque opération du chantier de foin type avait une capacité moyenne de 2,88 ha/h (ou 7,38 t MS/h) et une consommation de diesel moyenne de 1,26 L/t MS produite. L'opération ayant la plus faible capacité est le râtelage (1,62 ha/h) fait avec l'Inter 624 (43 kW). Toutefois, sa consommation de carburant était relativement faible (2,74 L/t MS). La fauche et le pressage, nécessitant un plus gros tracteur (Case 110, 82 kW), ont aussi une faible capacité (1,80 et 2,00 ha/h respectivement) mais ils consomment plus de carburant soit 3,25 et 1,99 L/t MS respectivement. Les émissions de CO₂e sont donc faibles pour le râtelage (2,32 kg CO₂e/t MS) et élevées pour la fauche et le pressage (8,77 et 5,37 kg CO₂e/t MS respectivement). Les opérations ayant la plus faible consommation de diesel sont le transport (0,28 L/t MS, qui inclut le ramassage au champ) et la manutention en entreposage (0,39 L/t MS). Il est important de préciser que l'entrepôt était à proximité des champs (maximum 1,5 km de distance). Au total, sur l'ensemble des opérations, la consommation de carburant était de 9,76 L/t MS. Un total de 26,37 kg CO₂e/t MS a été émis pour l'ensemble des opérations (ou 62,3 kg CO₂e/ha). La somme des émissions par unité de superficie des valeurs moyennes obtenues lors du suivi pour les opérations de fauche, râtelage, pressage et transport est de 40,7 kg CO₂e/ha. Ce niveau est comparable avec celui rapporté par Dyer et Desjardins (2005), soit 41,4 kg CO₂e/ha.

Si on compare les opérations de conditionnement (macérateur et faneur), on remarque la faible capacité du macérateur vis-à-vis le faneur (2,0 vs 4,6 ha/h). De plus, la consommation de cette opération est pratiquement le double (dans un cas le triple) du faneur (1,66 vs 0,79 et 0,55 L/t MS) car le macérateur couvre le tiers de la largeur du faneur. Toutefois, le coût énergétique de cette opération est favorablement compensé par la réduction temps de séchage au champ. Morissette et Savoie (2012) ont démontré que l'herbe fauchée à 8h30 le jour 1 et conditionnée seulement 2 fois au faneur avait une TEE d'environ 28 % à 16h30 le jour 2. Dans le cadre du présent suivi, 18 chantiers de foin sur 19 ont été complétés en deux jours (fauche matinale le jour 1 et pressage en fin d'après-midi le jour 2). Après un passage de macérateur et deux opérations de fanage, la TEE au pressage était en moyenne à 15 %. Cette faible TEE obtenue seulement après deux jours permet de conserver le rendement et la valeur nutritive du fourrage au moment de la récolte (MacDonald et Clark, 1987). De plus, la ventilation en entrepôt assure une conservation adéquate à moyen et long terme.

Certaines opérations ont une consommation stable sur une base horaire, comme la fauche (11,08 \pm 1,53 L/h) et le pressage (9,31 \pm 0,79 L/h). Toutefois, lorsque la consommation est rapportée sur une base de matière sèche, la variabilité augmente lorsque les rendements en fourrages varient d'un champ à l'autre. Pour la fauche et les 2 opérations de fanage, la consommation sur une base sèche est de 3,25 \pm 2,77 L/t MS, 0,79 \pm 0,79 L/t MS et 0,55 \pm 0,50 L/t MS respectivement. On constate aussi une variabilité considérable lors du râtelage (0,86 \pm 0,34 L/t MS) qui s'explique par la faible largeur de travail de l'équipement (3,4 m). En effet, lorsque le rendement au champ est faible, le râteau doit effectuer plusieurs passages supplémentaires pour former des andains acceptables. Toutefois, ce travail supplémentaire est pertinent afin de réduire la distance parcourue par la presse et le temps total de pressage.

Tableau 5. Moyenne (et écart-type) de la capacité, de la consommation de diesel et d'émission de CO₂e par opération.

	Capacité		Consommation		Émissions
	ha/h	t MS/h	L/h	L/t MS	kg CO ₂ e/t MS
Fauche	1,80 (0,59)	4,58 (1,88)	11,08 (1,53)	3,25 (2,77)	8,77 (7,46)
Macérateur	2,00 (0,57)	5,04 (1,72)	7,25 (1,00)	1,66 (0,78)	4,50 (2,10)
Fanage 1	4,63 (1,61)	11,68 (4,65)	7,13 (3,29)	0,79 (0,79)	2,12 (2,13)
Fanage 2	4,67 (1,51)	12,01 (5,83)	5,10 (2,91)	0,55 (0,50)	1,47 (1,36)
Râtelage	1,62 (0,41)	4,12 (1,63)	3,17 (0,89)	0,86 (0,34)	2,32 (0,91)
Pressage	1,91 (0,76)	4,97 (1,14)	9,31 (0,79)	1,99 (0,53)	5,37 (1,42)
Transport	3,64 (1,86)	9,21 (4,50)	2,30 (0,94)	0,28 (0,12)	0,76 (0,31)
Manutention	2,89 (1,06)	7,78 (2,46)	2,94 (1,18)	0,39 (0,13)	1,04 (0,34)
Moyenne	2,88	7,38	6,19	1,26	3,42
Maximum	4,67	12,01	11,08	3,25	8,77
Minimum	1,62	4,12	2,30	0,28	0,76
Somme				9,76	26,37

La Figure 2 exprime les émissions de GES par tonne de MS récoltée (kg CO₂e/t MS) pour chaque opération et à deux niveaux de rendement moyen. Le niveau de 1758 kg MS/ha (1,8 t MS/ha) est la moyenne des champs 12, 21B et 29 tandis que le niveau de 2993 kg MS/ha (3,0 t MS/ha)

est la moyenne des champs 6, 21A et 22B. Les champs pour chaque niveau avaient des rendements comparables (± 100 kg MS/ha de la moyenne). Tel qu'attendu, les émissions par t MS sont généralement supérieures lorsque le rendement est faible. Cela est vrai pour les opérations de fauche, de conditionnement et de pressage. Les émissions sont sensiblement les mêmes peu importe le rendement pour le transport et la manutention (entreposage) des balles (en moyenne 0,95 et 1,1 kg CO₂e/t MS respectivement), ce qui est logique car ces opérations ne sont pas directement liées à la superficie récoltée. Les plus grandes différences relatives entre les émissions des deux niveaux de rendement sont pour le râtelage (60 % de réduction par rapport au faible rendement) et pour la fauche (55 %). Les émissions pour le macérateur, le fanage et le pressage varient entre 6 et 53 %. La somme des émissions sont de 34,2 et 20,3 kg CO₂e/t MS pour les rendements faibles et élevés respectivement.

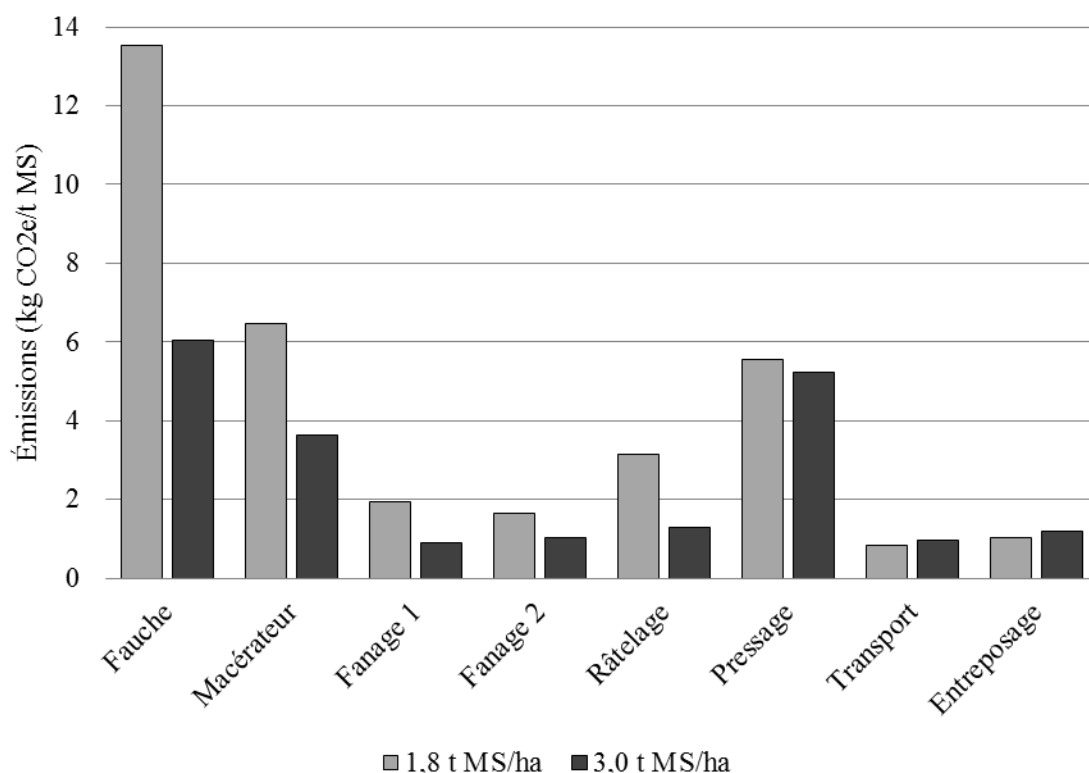


Figure 2. Émissions de GES pour chaque opération en fonction du rendement de fourrage à deux niveaux observés au champ.

Amélioration de la capacité de production et du bilan de GES

Il est possible d'améliorer la capacité de production et le bilan de GES en modifiant les pratiques de récolte. Les options analysées proposent l'utilisation d'une faucheuse plus large, l'utilisation d'un faneur au lieu du macérateur, le retrait d'un passage de faneur et l'utilisation d'un râtelier à plus grande portée. L'analyse ne tient pas compte du coût de ces équipements. On suppose que les mêmes tracteurs sont utilisés et que leur consommation pour une opération donnée ne varie pas significativement. L'analyse utilise comme référence les résultats obtenus lors du suivi de l'été 2012 et est basée sur les largeurs d'opération (Tableau 6). Le Tableau 7 rapporte les indicateurs de capacités pour trois plages de superficies récoltées tel que proposé par Gupta et al. (1990b) pour les opérations de fauchage, râtelage, pressage et transport.

Scénario 1 : Utilisation d'une faucheuse traînée plus large à 3,6 m (3,46 m effectif). La capacité (ha/h) augmentera car il y aura moins de passage par unité de surface. De même, le macérateur trouvera sa capacité augmentée du même facteur.

Scénario 2 : Utilisation des toupies optionnelles sur le macérateur. Il est possible d'ajouter des toupies sur le châssis arrière du macérateur afin de répartir le foin directement à la sortie de la machine. Ce scénario permettrait de retirer le passage de faneur normalement fait peu de temps après.

Scénario 3 : Utilisation d'un râteau de plus grande capacité. Certains modèles commerciaux à 2 toupies ont une largeur de travail jusqu'à 6,2 m. Par conséquent, la presse augmenterait sa capacité en effectuant moins de passages par unité de surface. La vitesse de la presse pourrait toutefois être légèrement plus basse mais l'effet n'est pas pris en compte ici.

Scénario 4 : Combinaison des scénarios 1, 2 et 3.

Tableau 6. Largeur effective des machines de fenaison pour différents scénarios d'optimisation.

	Référence	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
	(m)				
Fauche	2,6	3,46	2,6	2,6	3,46
Macérateur	2,6	3,46	2,6	2,6	3,46
Fanage 1	7,8	7,8	Aucun	7,8	Aucun
Fanage 2	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
Râtelage	3,4	3,4	3,4	6,2	6,2
Pressage ¹	6,8	6,8	6,8	12,4	12,4
Transport ²	1	1	1	1	1
Manutention ²	1	1	1	1	1

¹Les andains sont doublés par le râteau.

²Facteur de 1 car cette opération est indépendante de la largeur d'opération.

Tableau 7. Indicateurs de capacité pour 3 plages de superficies récoltées en foin en balle.

	Petite (< 20 ha)	Moyenne (20-50 ha)	Grande (> 50 ha)
Fauche (ha/h)	1	2	3
Râtelage (ha/h)	2	3	4
Pressage (t MS/h)	3	6	9
Transport (t MS/h)	4	4	8

Source : Gupta et al. (1990b)

Le Tableau 8 résume les résultats d'optimisation pour les 4 scénarios et la classification par rapport aux capacités de référence des superficies de récolte. La ferme suivie avait 59 ha en production (dont 43 ha suivies lors de l'expérience), ce qui la classe dans la catégorie Grande superficie (> 50 ha). Toutefois, selon les données moyennes du suivi de référence, la ferme se classe dans la catégorie Petite pour le râtelage, Moyenne pour ce qui est de la fauche et du pressage, et Grande pour le transport. Avec la modification apportée au scénario 1, la capacité de la fauche et du macérateur augmente (2,4 et 2,7 ha/h respectivement). Toutefois, la classification ne change pas. Le scénario 2 n'apporte aucun changement quant à la capacité de production du système. Pour le scénario 3, les capacités sont presque doublées pour le râtelage (3,0 vs 1,6 ha/h) et le pressage (9,1 vs 5,0 t MS/h). Les opérations de râtelage et de pressage sont maintenant

classées dans la catégorie Moyenne et Grande capacité. Finalement, le scénario 4, qui combine les 3 premiers scénarios, permet d'améliorer la capacité de presque toutes les opérations.

Tableau 8. Résultats des scénarios d'optimisation avec classification par rapport aux capacités de référence des systèmes du Tableau 7 (P : Petit, M : Moyen et G : Grand).

	Référence	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
Fauche (ha/h)	1,8 (M)	2,4 (M)	1,8 (M)	1,8 (M)	2,4 (M)
Macérateur (ha/h)	2,0	2,7	2,0	2,0	2,7
Fanage 1 (ha/h)	4,6	4,6	-	4,6	-
Fanage 2 (ha/h)	4,7	4,7	4,7	4,7	4,7
Râtelage (ha/h)	1,6 (P)	1,6 (P)	1,6 (P)	3,0 (M)	3,0 (M)
Pressage (t MS/h)	5,0 (M)	5,0 (M)	5,0 (M)	9,1 (G)	9,1 (G)
Transport (t MS/h)	9,3 (G)	9,3 (G)	9,3 (G)	9,3 (G)	9,3 (G)
Manutention (t MS/h)	7,2	7,2	7,2	7,2	7,2

L'analyse de sensibilité des GES (Tableau 9) montre que pour le scénario 1, l'utilisation d'une faucheuse de 3,46 m de largeur effective permet de réduire de 12 % les émissions de GES par rapport à une faucheuse de 2,6 m (référence). Le scénario 2 montre une diminution de 8 % si seulement 1 passage de faneur est effectué (avec l'option de faneur sur le macérateur). Toutefois, il est possible que la teneur en eau du foin lors du pressage soit un peu plus élevée mais éventuellement acceptable si les balles sont séchées artificiellement par la suite. Le scénario 3 montre que l'augmentation de la capacité au râtelage permet de réduire les émissions (13 %). Finalement, en combinant les 3 scénarios, une diminution globale de 34% des GES peut être obtenue soit 17,5 kg CO₂e/t MS comparativement à 26,4 kg CO₂e/t MS (référence).

Tableau 9. Émissions de GES pour chaque opération en fonction du scénario d'optimisation.

	Référence	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
	(kg CO ₂ e/t MS)				
Fauche	8,8	6,6	8,8	8,8	6,6
Macérateur	4,5	3,4	4,5	4,5	3,4
Fanage 1	2,1	2,1	0,0	2,1	0,0
Fanage 2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Râtelage	2,3	2,3	2,3	1,3	1,3
Pressage	5,4	5,4	5,4	2,9	2,9
Transport	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Entreposage	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Somme	26,4	23,1	24,3	22,9	17,5
Variation	0%	-12%	-8%	-13%	-34%

CONCLUSION

Le suivi des opérations de fenaison pour la production de foin en petites balles a permis de mesurer les temps d'opération et la consommation de carburant des tracteurs. L'analyse des données montre une plus grande production de GES sur une base de matière sèche produite pour les opérations de fauche et de pressage. Les émissions sont modérées pour la macération, le fanage et le râtelage. Elles sont faibles pour le transport et l'entreposage. Les données recueillies

montrent que le rendement en fourrages a peu d'influence sur le niveau d'émission de GES pour certaines opérations (fanage, transport et entreposage) et plus d'influence pour d'autres (fauche, macérateur, râtelage et pressage). Au total, il faut en moyenne 9,8 litres de diesel pour produire une tonne de MS, ce qui génère près de 26,4 kg CO₂e. Il est possible de réduire le niveau de GES jusqu'à 34 % en utilisant de l'équipement plus large et en combinant des opérations lorsque c'est approprié, toujours dans les limites des tracteurs disponibles.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les Producteurs de Lait du Canada (PLC) pour le support financier dans le cadre de la Grappe laitière, phase I (2010-2013). Ils remercient également MM. Richard Matte, Robert Matte et Paul Matte (Ferme du Viaduc à Neuville) pour leur excellente collaboration.

LISTE DES OUVRAGES CITÉS

ASABE. 2013. Moisture Measurement – Forage. ANSI/ASABE Standard S358.3. 1 page. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI.

Dyer, J.A. et R.L. Desjardins. 2003. Simulated farm fieldwork, energy consumption and related greenhouse gas emissions in Canada. *Biosystems Engineering*. 85(4): 503-513.

Dyer, J.A. et R.L. Desjardins. 2005. Analysis of Trends in CO₂ Emissions from Fossil Fuel Use for Farm Fieldwork Related to Harvesting Annual Crops and Hay, Changing Tillage Practices and Reduced Summerfallow in Canada. *Journal of Sustainable Agriculture*. 25(3): 141-155.

Environnement Canada (2013). <http://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=Fr&n=AC2B7641-1>. Tableau 12. Accédé le 15 janvier 2013.

Eurostat. 2013. <http://epp.eurostat.ec.europa.eu>. Accédé le 15 janvier 2013

Gupta, M.L., T.A. McMahon, R.H. Macmillan et D.W. Bennett. 1990a. Simulation of hay-making systems: Part 1 – Development of the model. *Agricultural Systems*, 34(4): 277-299

Gupta, M.L., T.A. McMahon, R.H. Macmillan et D.W. Bennett. 1990b. Simulation of hay-making systems: Part 2 – Application of the model. *Agricultural Systems*, 34(4): 301-318

MacDonald, A.D. et E. Ann Clark. 1987. Water and field quality loss during field drying of hay. *Advances in Agronomy*. Vol 41, pp. 407-437.

Morissette, R. et P. Savoie. 2011. Le séchage artificiel du foin avec l'énergie solaire et la biomasse. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages, Victoriaville, le 15 février. Pages 32 à 41. CQPF-CRAAQ. Disponible sur le site: <http://www.agrireseau.qc.ca/>

Morissette, R. et P. Savoie. 2012. Resources for Hay and Forage on Dairy Farms: Effect of Windrow Handling Sequence on Field Drying. 9 pages. Paper No. 121338020. Présenté à l'ASABE Annual International Meeting, Dallas, TX, United-States, July 29-August 1. ASABE St-Joseph, MI.

LE CONSEIL QUÉBÉCOIS DES PLANTES FOURRAGÈRES (CQPF) REMERCIE LES
MEMBRES CORPORATIFS QUI ONT APPORTÉ UN APPUI IMPORTANT EN 2013 À TITRE
DE GRAND PARTENAIRE ET MEMBRE PLATINE.

GRANDS PARTENAIRES



PARTENAIRES PLATINE



