



DEMI-JOURNÉE D'INFORMATION SCIENTIFIQUE SUR LES FOURRAGES

Jeudi, le 17 février 2005

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

COMPTES-RENDUS DES CONFÉRENCES
Victoriaville, Québec

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

AVANT-PROPOS

Les plantes fourragères sont au cœur de l'agriculture québécoise. Les techniques de production et de conservation des plantes fourragères évoluent constamment et doivent être adaptées aux nouvelles réalités économiques et environnementales. L'avenir du secteur des plantes fourragères et des autres secteurs agricoles qui utilisent les plantes fourragères dépend donc du développement de connaissances et de nouvelles technologies par les acteurs de la recherche et du développement. Ces derniers se réunissent chaque année pour partager leur savoir et leurs dernières découvertes avec les divers intervenants du secteur.

Nous sommes donc heureux de vous présenter les comptes-rendus des conférences de la treizième édition de la demi-journée d'information scientifique sur les fourrages organisée conjointement par le comité des plantes fourragères du CRAAQ et le Conseil québécois des plantes fourragères (CQPF). Depuis 1997, cette activité est organisée annuellement et vous est présentée sous forme d'une demi-journée qui fait suite à l'assemblée générale annuelle du CQPF. Au cours de cet après-midi, onze conférenciers vous présenteront de nouveaux résultats de recherche sur des sujets variés. Cette demi-journée se veut une occasion d'échange entre les représentants de l'industrie, les conseillers agricoles, les chercheurs, les producteurs ainsi que les autres intervenants intéressés à la production, le développement et la recherche en plantes fourragères au Québec. Vous trouverez dans le présent cahier des comptes-rendus qui résument ou complètent ce qui vous est présenté au cours de cet après-midi. Que cette journée soit remplie d'informations intéressantes vous permettant de continuer à valoriser les plantes fourragères au Québec.

Gilles Bélanger, président, et Gaëtan Tremblay, vice-président,
Comité Plantes Fourragères du CRAAQ.

TABLE DES MATIÈRES

1- Recherche en plantes fourragères au Québec. <u>Gilles Bélanger</u>	3
2- Profil de densité de l'ensilage en silo couloir. <u>Luc D'Amours</u> et Philippe Savoie	4
3- Résistance à la ventilation de balles de foin à haute densité. <u>René Morissette</u> et Philippe Savoie.....	12
4- Récolte et séchage des résidus de maïs pour la biomasse. <u>Philippe Savoie</u>	19
5- Fermentation de la fléole des prés en fonction du stade, de la teneur en matière sèche et de la méthode de récolte. <u>André Amyot</u>	27
6- Du lait... sans foin sec! <u>Denis Boutin</u> , Yvan Chouinard, Guy Allard et Doris Pellerin	31
7- Effet de différentes espèces de plantes fourragères sur la composition du lait de chèvre, incluant les acides gras oméga-3 et les acides linoléiques conjugués. <u>Audrey Doyon</u> , P. Yvan Chouinard, Gaëtan Tremblay, Dany Cinq-Mars et Jocelyne Delisle	35
8- La fertilisation en chlore cause une diminution de la différence alimentaire cations anions chez la fléole. Sophie Pelletier, <u>Gaëtan Tremblay</u> , Gilles Bélanger, Philippe Seguin, Raynald Drapeau, Réal Michaud, Annie Brégard et Guy Allard.....	42
9- Différence alimentaire cations anions de plantes fourragères suite à l'apport de sous-produits magnésiens. <u>Gaëtan Parent</u> ¹ , Gilles Bélanger ¹ , Jean Lafond ¹ , Noura Ziadi ¹ , J.-P. Deland ² et J. Laperrière.....	47
10- La fléole de climat frais: plus productive, plus énergétique et plus digestible. <u>Annick Bertrand</u> , Yves Castonguay, Gaëtan Tremblay et Gilles Bélanger	49
11- Autotoxicité de la luzerne: Impact sur les populations et rendements. <u>Philippe Seguin</u> ¹ et Craig C. Sheaffer	52

Recherche en plantes fourragères au Québec

Gilles Bélanger, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sainte-Foy.

La recherche en plantes fourragères au Québec est réalisée principalement au sein d'instituts de recherche (Agriculture et Agroalimentaire Canada, Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement) et de deux universités (Laval et McGill). Les sites expérimentaux de ces instituts et universités (Ste-Anne-de-Bellevue, Deschambault, St-Augustin, Lévis, Normandin et Rouyn-Noranda) permettent de couvrir la plupart des régions productrices de plantes fourragères au Québec. À cela, s'ajoutent des activités de recherche réalisées sur des sites privés.

Outre les questions de productivité qui demeurent importantes, les recherches en plantes fourragères s'orientent de plus en plus vers des problématiques environnementales ou de diversification des marchés. Les grands thèmes et l'orientation de la recherche en plantes fourragères au Québec sont ici brièvement présentés.

Les principaux axes de recherche en lien avec l'**environnement** sont :

- 1) La réduction des pertes azotées par les ruminants grâce au développement de cultivars ayant des caractéristiques protéiques et énergétiques plus favorables;
- 2) L'évaluation de l'impact des changements climatiques sur la persistance et la productivité des plantes fourragères ainsi que l'évaluation du potentiel de réduction des gaz à effet de serre grâce aux plantes fourragères;
- 3) L'amélioration de l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs, principalement l'azote et le phosphore; et
- 4) L'étude du devenir des transgènes de maïs ensilage.

Les recherches québécoises sur les **nouvelles utilisations** des plantes fourragères sont axées sur :

- 1) La production de phytoestrogènes par les légumineuses; et
- 2) L'utilisation des résidus de culture pour la production de biomasse.

L'amélioration de la **productivité** des plantes fourragères demeure toujours une thématique de recherche importante, laquelle se fait selon les axes suivants :

- 1) L'amélioration de la valeur nutritive (digestibilité et fibres) grâce à la sélection génétique, l'agronomie, et la modélisation et l'étude de nouveaux critères de valeur nutritive tels que les acides gras, la différence alimentaire cations - anions et la qualité protéique;
- 2) L'amélioration de la persistance des légumineuses par la sélection génétique incluant une approche intégrée multidisciplinaire (biologie moléculaire, biochimie et physiologie) et le développement de meilleures pratiques culturales;
- 3) L'étude de l'adaptation de nouvelles espèces fourragères (trèfle Kura, brome des prés et fétuque élevée); et
- 4) L'amélioration de la conservation des fourrages par l'étude des additifs, du séchage, de la gestion des ensilages et de la qualité de l'ensilage (acide butyrique) et du foin (moisisseurs).

Le développement de connaissances et de nouvelles technologies dans le secteur des plantes fourragères est essentiel pour faire face aux nombreux défis des années à venir que ce soit pour la qualité de l'environnement, la diversification des marchés et l'amélioration de la productivité. La recherche en plantes fourragères faite au Québec est d'excellente qualité et elle a su s'adapter aux nouveaux défis de l'agriculture.

Profil de densité de l'ensilage de maïs en silo couloir

Luc D'Amours¹ et Philippe Savoie²

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

²Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2560 boulevard Hochelaga, Sainte-Foy, Québec, Canada G1V 2J3.

INTRODUCTION

La densité de l'ensilage est très variable dans les silos couloir. Muck et Holmes (2000) ont rapporté des valeurs dans l'ensilage de maïs allant de 125 à 378 kg de matière sèche (MS)/m³ pour 81 silos commerciaux au Wisconsin. La densité moyenne était de 232 kg MS/m³. Une densité élevée est généralement souhaitable pour réduire les coûts d'entreposage par unité de MS et pour réduire les pertes par oxydation durant l'entreposage et la reprise.

Les études réalisées antérieurement ont corrélé la densité de l'ensilage avec plusieurs facteurs, notamment la teneur en eau de l'ensilage, la masse du tracteur de compactage, la pression des pneus, le temps de compactage, la hauteur d'ensilage, l'épaisseur et le nombre de couches (Savoie et al. 2004). La densité peut aussi varier selon la position de l'échantillon en hauteur, en largeur et en profondeur.

L'objectif principal de cette recherche était de caractériser le profil de densité de l'ensilage de maïs dans les silos couloir. Les facteurs considérés incluaient la masse du tracteur de compactage, les dimensions et la pression des pneus, le temps de compactage et d'étalement, le taux de récolte et les caractéristiques de celle-ci (longueur de hachage, teneur en eau et pourcentage de grain). Pour obtenir des données représentatives dans une variété de conditions, six fermes commerciales ont été sélectionnées. Finalement, une méthode pour mesurer adéquatement le profil de l'ensilage a été développée.

MÉTHODOLOGIE

Sélection des sites

Les six fermes sélectionnées provenaient de deux zones climatiques avec une différence d'environ 400 U.T.M. (unités thermiques maïs; Bootsma, 1999). Trois silos étaient situés en Beauce (région agricole de Chaudière-Appalaches, avec 2200 U.T.M.) et les trois autres silos dans la région de Nicolet (région agricole du Centre du Québec, avec 2600 U.T.M.). Les fermes utilisaient des silos couloir variant d'un volume théorique de 318 m³ (4,9 m de large par 21,3 m de long et 3,05 de haut) à 2560 m³ (15,2 m de large par 46,0 m de long et 3,66 de haut). Le tableau 1 décrit les six fermes par le nombre de vaches en lactation, la moyenne de production, la superficie en maïs ensilage et les dimensions du silo couloir ayant fait l'objet d'un suivi.

Tableau 1. Description des fermes laitières et des silos couloir ayant fait l'objet d'un suivi..

Site #	Région	Nombre de vaches	Production laitière (kg/vache/an)	Superficie d'ensilage de maïs(ha)	Dimensions des silos		
					Largeur (m)	Longueur (m)	Hauteur (m)
1	Nicolet	40	8000	10	4,9	21,3	3,05
2	Beauce	230	9800	7	12,2	46,0	3,66
3	Beauce	200	8400	50	15,2	46,0	3,66
4	Beauce	70	9000	13	4,6	28,7	2,44
5	Nicolet	180	8000	32	11,0	52,4	2,44
6	Nicolet	70	8500	13	9,1	39,6	3,05

Cinq silos avaient un mur du fond. Le silo couloir au site #6 avait seulement deux murs latéraux en béton sans mur de fond. De plus, le silo #6 était partiellement rempli avec de l'herbe (environ une couche de 1 m sur toute la longueur) avant d'être rempli avec du maïs. Les cinq autres silos étaient seulement remplis d'ensilage de maïs.

Variables mesurées lors du remplissage

La méthodologie détaillée a été décrite par D'Amours et Savoie (2004a, b). En bref, la récolte et le remplissage des silos couloir se sont déroulés entre le 26 septembre et le 11 octobre 2003. Les variables mesurées incluaient la capacité de récolte, le temps d'étalement et le temps de compactage de chaque chargement, la densité initiale ou naturelle du fourrage haché avant le compactage mécanique, la teneur en eau, la longueur de hachage et le pourcentage de grain.

Variables mesurées lors de la reprise

Entre novembre 2003 et février 2004, chacun des six silos a été visité deux fois pour la prise d'échantillons. Lors d'une visite, 48 échantillons étaient prélevés dans la face de reprise selon le profil suivant: à 0,5 m du sol, à 0,5 m du sommet et à deux autres hauteurs intermédiaires équidistantes (figure 1); à deux positions latérales, soit près du mur et près du centre avec trois répétitions (colonnes) à chaque position latérale; et à deux profondeurs, soit 0 à 180 mm ou 180 à 360 mm de la face de reprise.

Les échantillons étaient prélevés à l'aide d'une tarière manuelle d'un diamètre de 73 mm et de longueur de 180 mm. Un manche allongé permettait de prélever un deuxième échantillon dans chaque trou à une profondeur qui atteignait 360 mm.

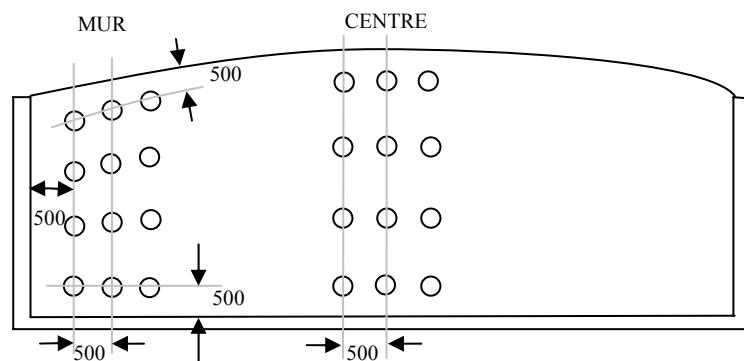


Figure 1. Patron d'échantillonnage de l'ensilage dans la face du silo (distances en mm). Un total de 48 échantillons est prélevé à chaque suivi (24 positions × 2 profondeurs, soit de 0 à 180 mm et de 180 à 360 mm).

Analyses statistiques

Les utilitaires du logiciel Excel ont été utilisés pour analyser les données de densité et de teneur en eau. L'analyse de la variance a été effectuée pour vérifier s'il existait des différences entre les trois facteurs de position. Un niveau de probabilité de 5 % a été choisi pour déterminer les différences significatives.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Remplissage et compactage des silos couloir

Les principaux paramètres enregistrés lors du remplissage des silos couloir sont présentés dans le tableau 2. En comparant les valeurs moyennes de chaque ferme, on constate que le taux de

récolte variait de 5 à 22 t MS/h et la teneur en eau variait de 56 à 77 %. La longueur moyenne de coupe du maïs ensilage variait de 8 à 14 mm. Le pourcentage de grain de la plante entière allait de 17 à 50 %.

Pour le compactage, quatre fermes utilisaient un seul tracteur tandis que deux fermes (sites #1 et #6) en utilisaient deux. La pression des pneus observée variait de 90 à 250 kPa. Les remorques utilisées pour transporter le matériel haché du champ au silo étaient déchargées directement entre les murs du silo ou bien sur la dalle à l'entrée du silo. Dans tous les cas, la phase d'étalement de l'ensilage était suivie d'une phase de compactage. Le temps moyen pour étaler l'ensilage variait de 0:00 à 8:33 min:s par chargement tandis que le temps de compaction variait de 1:30 à 13:36 min:s par chargement. Le temps total accordé à l'étalement et au compactage pour chaque chargement allait de 4:52 à 18:34 min:s pour les six sites.

Tableau 2. Principales données recueillies lors du remplissage et de la reprise des silos couloir.

Identification des sites	1	2	3	4	5	6
Dates de récolte	Sept, 30	Oct, 11	Oct, 7-8-10	Oct, 8	Sept, 26	Oct, 9
Teneur en eau (%)	61,8	67,5	71,0	76,8	61,9	55,8
Longueur de hachage (mm)	9,8	14,4	10,5	9,5	12,7	8,3
% de grain	49,5	28,2	25,9	17,0	41,0	41,1
Nombre de chargement / h	10,2	2,9	4,6	3,5	6,6	8,3
Capacité de récolte (t MS/h)	22,0	6,8	12,9	5,1	14,2	11,9
Nb. de tracteur(s) de compactage	2	1	1	1	1	2
Masses des tracteurs (kg)	7060	5760	9980	5630	6500	6770
Dimensions des pneus avant	16,9x28	13,6x28	16,9x30	14,9x28	13,6x24	14,9x28
Dimensions des pneus arrière	18,4x42	18,4x38	20,8x42	18,4x38	16,9x34	18,4x38
Pression des pneus av.- ar. (kPa)	172-90	131-90	221-175	241-152	172-131	248-159
Temps d'étalement (min:s/char.)	03:22	00:51	04:58	08:33	08:31	01:42
Temps de compactage (min:s/char.)	01:30	04:56	13:36	03:26	05:25	06:49
Équipement de reprise	Fraiseuse rotative	Chargeur	Chargeur	Chargeur	Frais. rotative	Silo-grab
Hauteur d'ensilage (1 ^{ère} date; m)	2,89	2,43	2,56	2,58	2,69	2,56
Hauteur d'ensilage (2 ^{ème} date; m)	3,13	3,29	3,26	2,73	2,85	2,75
Taux de reprise (mm/jr)	97	144	126	117	153	147

Densité naturelle du fourrage haché avant compactage

Durant la période de récolte, 75 échantillons ont été prélevés pour estimer la densité naturelle d'une couche mince d'ensilage de maïs (0,15, 0,30 ou 0,45 m d'épaisseur) avant la phase de compactage mécanique. Les valeurs individuelles de la densité initiale variaient de 42 et 119 kg MS/m³ avec une moyenne de 74 kg MS/m³. Il n'y avait pas de différence significative ($p = 0,74$) entre les trois récipients utilisés pour mesurer la densité initiale. Les densités moyennes étaient de 72, 74 et 76 kg MS/m³ pour les trois hauteurs soit 0,15, 0,30 et 0,45 m respectivement.

Néanmoins, il y avait une différence de la densité initiale de l'ensilage de maïs entre les sites ($p < 0,001$). Les valeurs moyennes étaient de 103, 57, 76, 60, 94 et 98 kg MS/m³, pour les six sites respectivement. Les variations pouvaient être expliquées par la longueur de hachage (LH, en mm) et le pourcentage de grain. La teneur en eau n'était pas une variable significative pour expliquer ces différences entre les sites. Le modèle suivant prédit la densité naturelle de l'ensilage de maïs ($\rho_{\text{naturelle}}$, kg MS/m³) avec un coefficient de détermination R^2 de 0,988.

$$\rho_{\text{naturelle}} = 75,6 + 1,34 * \% \text{Grain} - 3,79 * \text{LH} \quad (1)$$

Densité de l'ensilage compacté

Après le compactage mécanique et une période d'entreposage de 2 à 5 mois, 576 échantillons ont été prélevés aux six sites et aux deux dates (48 échantillons par site et par date). Étant donné qu'un quart des échantillons au site #6 étaient de l'ensilage d'herbe, ces 24 échantillons d'herbe ont été exclus de l'analyse. La teneur en eau des 552 échantillons d'ensilage de maïs restant variait de 52,9 à 81,6 % avec une moyenne de 66,1 %. La densité de MS de ces échantillons allait

de 115 à 361 kg MS/m³, avec une moyenne de 234 kg MS/m³. La distribution de la densité a été analysée en fonction des trois facteurs de position: profondeur par rapport à la face de l'ensilage, hauteur par rapport au sol et position latérale, c'est-à-dire près du mur ou près du centre. L'analyse a été effectuée pour les six sites et aux deux dates d'échantillonnage.

Densité en fonction de la profondeur horizontale à la face. Les résultats au tableau 3 montrent que la densité de MS en surface (0 à 180 mm de la face) était toujours inférieure à la densité mesurée en profondeur (180 à 360 mm de la face). La différence était statistiquement significative 6 fois sur 12. La densité en surface était de 4 à 16% inférieure à la densité en profondeur, selon les sites et les dates (en moyenne 9% inférieure). Ces variations s'expliquent en partie par les différents équipements de reprise et méthodes utilisées par l'opérateur.

Tableau 3. Densité de l'ensilage (kg MS/m³) à chaque site en surface (0 à 180 mm) et en profondeur (180 à 360 mm) pour les six sites et les deux dates (moyenne de 24 échantillons excepté pour le site #6, 18 échantillons).

Site #	Date 1				Date 2			
	Surface	Profondeur	Diff.(%)	Prob.	Surface	Profondeur	Diff.(%)	Prob.
1	253	288	12,2	0,002	254	293	13,3	<0,001
2	201	213	5,6	0,31	231	241	4,1	0,36
3	189	224	15,6	0,002	219	233	6,0	0,09
4	185	196	5,6	0,074	187	208	10,1	0,001
5	238	248	4,0	0,31	258	277	6,9	0,09
6	228	255	10,6	0,006	245	274	10,6	0,02
Moy.	216	237	8,9	-	232	254	8,5	-

Une face rugueuse ou perturbée présentera une densité plus faible en surface. Les résultats n'ont pas permis d'établir une relation entre l'équipement de reprise et les réductions de densités en surface. En effet, les sites #1 et #5 utilisaient des fraiseuses rotatives qui normalement laissent une face lisse comparativement aux chargeurs frontaux conventionnels utilisés aux sites #2, #3 et #4. Le site #5 avait le plus bas niveau de perturbation à la date 1 mais non à la date 2. Le niveau de perturbation dépend à la fois du type d'équipement de reprise et de la façon par laquelle il est utilisé.

Puisque la densité en profondeur était toujours supérieure à la densité en surface, la densité en profondeur était considérée plus représentative de l'ensemble du silo avant la reprise. Ainsi, seulement les valeurs de densité en profondeur entre 180 et 360 mm de la face verticale ont été utilisées pour comparer les autres facteurs de position (hauteur et position latérale).

Densité en fonction de la hauteur. Le tableau 4 indique que la densité pour les six sites était toujours plus faible à 0,5 m du sommet, c'est-à-dire à la position H₄. La densité moyenne à H₄ pour les deux dates était de 222 kg MS/m³. La densité augmentait graduellement avec la hauteur d'ensilage jusqu'à la position H₁ située à 0,5 m du plancher du silo où la moyenne pour les deux dates était de 267 kg MS/m³. La hauteur moyenne d'ensilage pour les six sites et les deux dates était de 2,8 m (tableau 2). En moyenne, pour les six sites, la densité MS augmentait de 9 % entre H₄ et H₃ (0,6 m plus bas), 15 % entre H₄ et H₂ (1,2 m plus bas) et 23 % entre H₄ et H₁ (1,8 m plus bas). L'analyse de variance comparant les densités aux quatre hauteurs indiquait des différences significatives 10 fois sur 12.

Dans tous les cas, la densité près du sommet (H₄) était la plus faible densité tandis que la densité près du plancher (H₁) était la plus haute. Dans certains cas, les densités aux positions intermédiaires (H₃ et H₂) ne suivaient pas le patron prévu. Ceci peut être dû à la variation de la séquence de compactage (plus ou moins de temps consacré à cause de bris, des pauses, etc.).

Cependant, les résultats montrent que la densité continuait à augmenter avec l'augmentation de la hauteur d'ensilage comme le suggère le modèle logarithmique utilisé par Savoie et al. (2004).

Tableau 4. Densité de l'ensilage (kg MS/m³) aux 4 hauteurs (moyenne de 6 échantillons, en profondeur seulement).

Site #	Date 1				Prob.	*Diff.(%)		
	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄		H ₃ -H ₄	H ₂ -H ₄	H ₁ -H ₄
1	306	293	302	253	<0,001	19,4	15,8	20,9
2	253	227	194	179	<0,001	8,4	26,8	41,3
3	255	229	210	203	0,004	3,4	12,8	25,6
4	216	193	190	186	<0,001	2,2	3,8	16,1
5	269	254	251	217	0,006	15,7	17,1	24,0
6	(‡)	275	251	240	0,03	4,6	14,6	
Moy.	260	245	233	213	-	8,9	15,1	25,6
Date 2								
1	319	289	292	275	0,001	6,2	5,1	16,0
2	265	242	238	221	0,34	7,7	9,5	19,9
3	245	237	235	213	0,06	10,3	11,3	15,0
4	225	222	198	186	0,001	6,5	19,4	21,0
5	310	292	264	242	<0,001	9,1	20,7	28,1
6	(‡)	299	279	245	0,005	13,9	22,0	
Moy.	273	264	251	230	-	8,9	14,7	20,0

*H₁, H₂, H₃ et H₄ sont respectivement 0,5m du sol, intermédiaire 1, intermédiaire 2 et 0,5 m du sommet.

(‡)L'échantillon à la hauteur H₁ a été prélevé dans une couche d'ensilage de foin disposée au bas du silo et recouvert d'ensilage de maïs.

Densité en fonction de la position latérale. Le tableau 5 montre que la densité était plus élevée au centre qu'au mur 11 fois sur 12. La différence était statistiquement significative 8 fois sur 12 (p < 0,05). Dans un cas cependant (site 4, date 1), la densité était plus élevée au mur qu'au centre. En moyenne pour les deux dates et les six sites, la densité était de 7 % plus élevée au centre que près du mur. Ceci reflète la tendance générale des opérateurs de tracteur de compactage à circuler plus fréquemment au centre que près des murs. Pour obtenir une densité uniforme sur toute la largeur du silo, l'opérateur devrait porter une attention accrue à répartir également le nombre de passages entre le mur et le centre du silo.

Tableau 5. Densité de l'ensilage (kg MS/m³) au mur et au centre (moyenne de 12 échantillons, en profondeur seulement ; 9 échantillons pour le site #6).

Site #	Date 1				Date 2			
	Mur	Centre	Diff.(%)	Prob.	Mur	Centre	Diff.(%)	Prob.
1	282	295	4,4	0,02	286	301	5,0	0,02
2	204	223	8,5	0,04	233	249	6,4	0,33
3	207	242	14,5	0,001	225	240	6,3	0,08
4	199	194	-2,6	0,02	201	215	6,5	0,04
5	233	263	11,4	0,004	259	294	11,9	<0,001
6	251	260	3,5	0,39	257	291	11,7	0,01
Moy.	229	246	6,6	-	244	265	8,0	-

Densité moyenne compactée

L'information sur la densité en trois dimensions peut être utile à cause de la relation entre la densité et la qualité de l'ensilage. Les densités plus faibles observées en surface, au sommet et près des murs de côté indiquent les endroits susceptibles de présenter des pertes élevées de MS. Ces informations peuvent aussi permettre d'améliorer les pratiques de confection et de reprise. Pour préparer un programme d'alimentation, les agriculteurs doivent aussi connaître la densité

moyenne de l'ensilage dans le silo et la capacité totale du silo couloir. L'analyse suivante traite de la densité moyenne de la section transversale du silo.

En faisant la moyenne des 24 échantillons prélevé en profondeur (180 à 360 mm de la face), les densités compactées pour la section transversale étaient de 288, 213, 224, 196, 248 et 255 kg MS/m³ pour la date 1 et 293, 241, 232, 208, 277 et 274 kg MS/m³ pour la date 2 dans les six sites, respectivement. Lorsqu'on a effectué la corrélation entre la densité de chaque site (moyenne des deux dates) avec les paramètres de récolte, le pourcentage de grain s'avérait être le facteur qui expliquait pratiquement toute la variation entre les sites ($R^2 = 0,992$). La teneur en eau a aussi été corrélée avec la densité de MS de l'ensilage de maïs. Cependant, le coefficient de détermination R^2 pour prédire la densité de MS en fonction de la teneur en eau était seulement de 0,74. L'équation (2) représente le modèle linéaire pour prédire la densité moyenne (ρ_{moy} , kg MS/m³) sur deux dates d'observation.

$$\rho_{moy} = 156 + 2,67 * \% \text{Grain} \quad (2)$$

La hauteur d'ensilage à la deuxième date était toujours plus élevée que la hauteur d'ensilage au premier suivi, pour tous les sites (tableau 2). De plus, la densité moyenne était plus élevée à la date 2 pour tous les sites. Étant donné que la hauteur d'ensilage varie sur la longueur d'un même silo, une correction pour la hauteur (H exprimée en m) a été intégrée dans le modèle. Les données expérimentales sont illustrées à la figure 2.

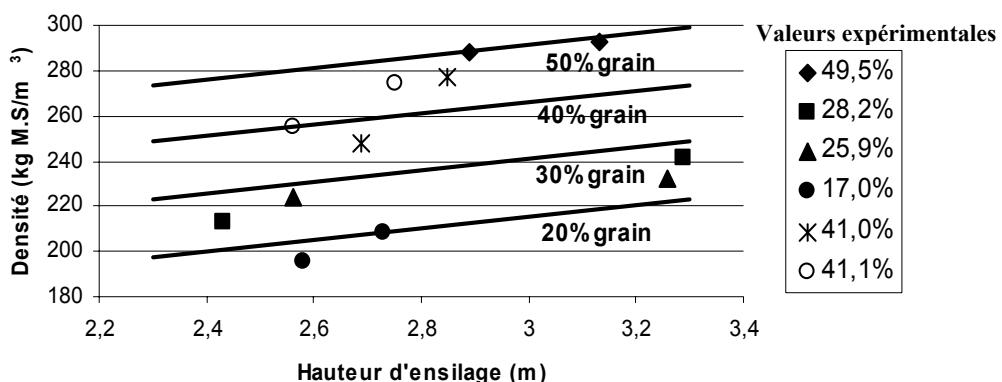


Figure 2. Densités de MS expérimentales de l'ensilage (moyenne de 24 échantillons par silo) comparées aux courbes de prédiction du modèle basé sur le pourcentage de grain (à la récolte) et la hauteur d'ensilage du silo.

Le modèle de prédiction de la densité moyenne compactée corrigé pour la hauteur (ρ_{moy-H} , kg MS/m³) présenté à la figure 2 possède un R^2 de 0,972 et s'écrit :

$$\rho_{moy-H} = 87,7 + 2,55 * \% \text{Grain} + 25,5 * H \quad (3)$$

En plus du pourcentage de grain et la teneur en eau, beaucoup d'autres paramètres ont été enregistrés comme la longueur de coupe, le poids des tracteurs de compaction, la pression des pneus et le temps pour l'étalement et le compactage de l'ensilage par chargement. Comme le démontre les modèles discutés précédemment, ces autres paramètres ne sont pas nécessaires pour expliquer les variations de la densité moyenne du maïs ensilage dans les silos couloir de chaque

site. À eux seuls, le pourcentage de grain et la hauteur d'ensilage explique avec une très bonne précision la densité moyenne observée dans la plage de expérimentale (196 à 293 kg MS/m³).

Les autres paramètres variaient entre 8,3 et 14,4 mm pour la longueur de hachage, entre 3610 et 9980 kg pour la masse des tracteurs, entre 90 et 250 kPa pour la pression des pneus et entre 4 min 52 s et 18 min 34 s pour le temps total d'étalement et de compactage par chargement (Tableau 2). Deux sites utilisaient deux tracteurs de compactage tandis que les quatre autres n'en utilisaient qu'un. On peut exprimer un paramètre représentant l'intensité de compactage sur chaque site en multipliant la masse totale des tracteurs par le temps de compactage et divisé par le nombre de tonnes d'ensilage compacté. Avec les données du tableau 2, ce facteur de compactage donne: 0,52, 1,32, 0,61, 0,90, 0,43 et 0,90 t*h de compactage par tonne d'ensilage compactée aux six sites, respectivement. La densité moyenne était de 291, 227, 228, 202, 263 et 265 kg MS/m³ aux six sites, respectivement. Dans la plage de données expérimentales, il n'y avait pas relation logique entre la densité observée et ce facteur de compactage.

Dans la présente étude, le paramètre le plus important pour augmenter la densité de l'ensilage de maïs entreposé en silo couloir était le pourcentage de grain. Le second facteur d'importance était la hauteur d'ensilage. Le pourcentage de grain dépend du cultivar et des facteurs climatiques durant la saison de croissance. Une bonne sélection de cultivar est donc cruciale si une grande densité et une haute valeur nutritive de l'ensilage de maïs est désirée.

Validation du modèle de prédiction. Une troisième série d'échantillons a été prélevée aux mêmes sites en mai 2004. Les densités moyennes basées sur les 24 échantillons en profondeur étaient de 291, 261, 257, 172, 266 et 274 kg MS/m³, aux six sites respectivement. Les hauteurs moyennes d'ensilage étaient de 3,35, 3,81, 3,30, 1,83, 2,44 et 2,13 m aux six sites respectivement. Les pourcentages de grain mesurés dans l'ensilage (fermentée) étaient de 37,7, 27,4, 18,4, 14,7, 33,4 et 35,2 aux six sites respectivement. Il est à noter que le pourcentage de grain mesuré sur l'ensilage une fois fermentée était toujours inférieur à celui mesuré à la récolte (27,8 et 33,8 % en moyenne, respectivement). La proportion moins élevée de grain mesurée dans l'ensilage était probablement causée par la disparition d'une partie de l'amidon causée par les réactions physiques et chimiques durant les phases d'oxydation et de fermentation.

Lorsque les valeurs du troisième suivi ont été utilisées pour valider le modèle mathématique (équation 3), les densités prédites étaient sous-estimées en moyenne de 2,9 % (plage d'erreur de -9,9 à +3,1 %). Ainsi, l'équation de prédiction (3) devrait seulement être utilisée avec des valeurs de pourcentage de grain mesuré à la récolte et non après la fermentation.

CONCLUSIONS

1. La densité de MS de l'ensilage de maïs en silo couloir variait selon la position de l'échantillon. Les échantillons prélevés en profondeur (180 à 360 mm de la face verticale) étaient toujours plus denses que ceux prélevés en surface (0 à 180 mm de la face), de 9 % en moyenne. Les échantillons prélevés à 0,5 m du sommet étaient toujours moins denses que ceux prélevés à 0,5 m du plancher, de 23 % en moyenne pour des silos de hauteur totale moyenne de 2,8 m. Les échantillons prélevés près du centre étaient généralement plus denses que ceux près du mur (11 fois sur 12), de 7 % en moyenne.

2. Un patron d'échantillonnage de 24 trous sur la face transversale illustre la variation de la densité des silos couloir. La moyenne de la densité en profondeur (180 à 360 mm de la face) est considérée comme une bonne représentation de l'ensilage dans une section transversale du silo, avant la perturbation par les équipements de reprise. Les moyennes des densités en profondeur aux six sites et aux deux dates de mesure étaient hautement corrélées avec le

pourcentage de grain et la hauteur d'ensilage ($R^2 = 0,972$). Le modèle linéaire développé prédisait très bien la densité moyenne de l'ensilage qui variait de 196 à 293 kg MS/m³ tandis que le pourcentage de grain variait de 17 à 50 % et la hauteur d'ensilage de 2,4 à 3,3 m dans la présente expérience.

3. Le pourcentage de grain à la récolte était le facteur le plus important pour augmenter la densité de MS de l'ensilage dans les silos couloir. Une bonne sélection du cultivar de maïs ensilage selon la zone climatique permettra d'obtenir une récolte de maïs avec une haute proportion de grain et ainsi un ensilage de haute densité à l'entreposage.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les nombreux collaborateurs pour identifier les fermes et fournir l'équipement nécessaire pour la pesée des remorques et des tracteurs : Jeannot Rodrigue, MAPAQ Lac Etchemin, Sylviane Jinchereau, MAPAQ Sainte-Marie de Beauce, Denis Ruel, Alain Fournier et Michel Beaumier, MAPAQ Nicolet. Mario Laterrière, Agriculture et Agroalimentaire Canada de Sainte-Foy, et Jean-François Poirier, étudiant, ont participé à la récolte et à l'analyse de données. Nous remercions aussi les six agriculteurs qui ont accepté de participer à la recherche.

RÉFÉRENCES

- Bootsma, A. 1999. Average Crop Heat Units available for corn and soybean production in Eastern Canada. http://sis.agr.gc.ca/cansis/nsdb/climate/crop_heat/intro.html.
- D'Amours, L. et P. Savoie. 2004a. Mesure de la masse volumique du fourrage dans les silos couloir. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages, Victoriaville, le 11 février. Pages 17-24. Conseil québécois des plantes fourragères, Sainte-Foy, Québec. <http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/documents/Compte-rendu-2004.pdf>
- D'Amours, L. and P. Savoie. 2004b. Density profile of corn silage in bunker silos. ASAE Paper No. 041136. Presented at the ASAE/CSAE Annual International Meeting in Ottawa, Ontario, August 1-4. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Muck, R.E., B.J. Holmes. 2000. Factors affecting bunker silo densities. *Applied Engineering in Agriculture* 16(6) : 613-619.
- Savoie, P., R.E. Muck and B.J. Holmes. 2004. Laboratory assessment of bunker silo density, part II: whole-plant corn. *Applied Engineering in Agriculture* 20(2): 165-171.

Perte de charge en fonction de la vitesse de l'air à travers des balles de foin de diverses densités

René Morissette¹ et Philippe Savoie^{1,2}

¹Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Sainte-Foy, QC (rmoris@grr.ulaval.ca); ²Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 boul. Hochelaga, Sainte-Foy, QC

RÉSUMÉ

La perte de charge de l'air à travers des balles de foin de fléole a été mesurée en fonction de sept niveaux de densité (entre 98 et 240 kg MS/m²), de quatre hauteurs de foin (entre 0,45 et 1,80 m) et de trois teneurs en eau (entre 18 et 10%). Pour chaque combinaison, huit niveaux de vitesses d'air étaient évalués grâce à un ventilateur à vitesse variable (entre 0,08 et 1,06 m/s pour l'ensemble des essais). Les pertes de charges mesurées (ΔP) ont varié entre 78 et 2785 Pa. La hauteur n'avait pas d'effet significatif lorsque la perte de charge était exprimée par unité de hauteur de foin (valeurs de $\Delta P/H$ entre 104 et 5274 Pa/m). La teneur en eau n'avait pas non plus d'effet significatif sur la perte de charge. La comparaison de quatre modèles de perte de charge en fonction de la vitesse de l'air (V) a fait ressortir une équation de puissance de la forme $\Delta P/H = \alpha V^\beta$. Le paramètre α était fonction de la densité en matière sèche au carré tandis que β était une constante. Ces résultats devraient servir à la conception de systèmes de ventilation et de séchage pour les balles de foin à haute densité.

INTRODUCTION

Traditionnellement, la densité des petites balles de foin se situe entre 100 et 150 kg de matière sèche (MS)/m³ et elle est qualifiée de faible à moyenne densité. Les grosses balles rectangulaires atteignent des densités plus élevées, de 175 à 250 kg MS/m³. La conservation sèche des balles à haute densité est plus difficile que celle des balles à basse densité car la circulation de l'air est réduite et le risque de développement de moisissure y est plus élevé. Cette étude fait partie intégrante d'un projet visant à modéliser et optimiser le séchage artificiel de balles de foin de haute densité. Présentement, il existe peu de documentation quant au design de systèmes de ventilation et de séchage pour ce type de foin. Pour cette raison, une expérience a été réalisée dans le but de modéliser la perte de charge à travers une masse de foin en fonction de sa hauteur, de sa densité et de la vitesse d'écoulement de l'air.

REVUE DE LITTÉRATURE

La perte de charge pour des produits agricoles communs, comme les semences et les grains, est bien documentée (ASAE, 1999a). La résistance à l'écoulement de l'air est généralement définie comme la perte de charge par unité d'épaisseur du produit (Pa/m). La principale variable qui influence la perte de charge est le débit volumique d'air par unité de surface (m³/m²•s); elle est équivalente à la vitesse moyenne à travers le produit (m/s). D'autres variables, notamment les caractéristiques physiques et physiologiques du produit (densité, teneur en eau, orientation des particules, espèce, maturité), peuvent aussi influencer la résistance à l'écoulement de l'air (Anderson et al, 1998).

Plusieurs équations décrivant la perte de charge ont été développées. L'ASAE (1999a) a adopté une équation non linéaire (équation 1) avec des paramètres α et β caractérisant le matériel.

Cette équation s'est avérée précise pour plusieurs types de produits dont l'orge, l'avoine, le maïs et le soya sur une grande plage de vitesses (ASAE, 1999a). Shedd (1946) a utilisé une équation de puissance (équation 2) pour prédire la résistance à l'écoulement de l'air dans un foin de luzerne en vrac à faible densité (60 kg MS/m³) et à faible vitesse (entre 0,05 et 0,10 m/s). D'autre part, Ergun (1952) a observé que la perte de charge résultait des pertes d'énergie cinétique et visqueuse du fluide occasionnées par le matériel. Bakker-Arkema et al. (1969) ont modifié l'équation d'Ergun (équation 3) pour modéliser la perte de charge à travers différents produits biologiques tels des noyaux de cerises. Les paramètres de l'équation étaient fonction de la viscosité de l'air et de la densité du matériel. Le modèle exponentiel (équation 4) a été adapté de Descôteaux et Savoie (2003) qui ont étudié la perte de charge à travers un foin de fléole de moyenne densité (153 kg DM/m³).

OBJECTIFS

1. Déterminer l'effet de la densité, de la hauteur et de la teneur en eau du foin sur la perte de charge.
2. Déterminer la perte de charge par unité de hauteur de foin en fonction de la vitesse de l'air.
3. Évaluer les 4 équations suivantes:
 - 3.1 Équation de l'ASAE (1999a):

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{\alpha V^2}{\ln(1 + \beta V)} \quad (1)$$

- 3.2 Équation de puissance (Shedd, 1946):

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha V^\beta \quad (2)$$

- 3.3 Équation d'Ergun (Ergun, 1952):

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha_1 V + \alpha_2 V^2 \quad (3)$$

- 3.4 Équation exponentielle:

$$\frac{\Delta P}{H} = \alpha (\exp(\beta V) - 1) \quad (4)$$

où ΔP = perte de charge (Pa)
 H = hauteur de la colonne de foin (m)
 V = vitesse de l'air (m/s)
 α et β = paramètres dépendants des propriétés du foin.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Une presse à petites balles de foin stationnaire a été ajustée pour obtenir huit niveaux de densité entre 90 et 240 kg MS/m³. Sept niveaux de densité moyenne ont été retenus pour les essais (98, 121, 160, 164, 182, 207 et 240 kg MS/m³). À chaque niveau de densité (aussi appelé profil), on disposait de quatre balles compactées de 0,81 m de longueur par une section standard (0,35 m par 0,45 m). La teneur en eau initiale était d'environ 18% sur une base humide à l'exception des deux niveaux de faible densité qui étaient à 14%. Pour chaque profil, trois niveaux de teneur en eau (18%, 14% et 10%) ont été expérimentés sauf pour les deux profils à basse densité (14% et 10% seulement). Les balles étaient placées de côté dans la chambre de séchage (le côté de 0,45 m était de face). Pour chaque hauteur (0,45, 0,90, 1,35 et 1,80 m) d'une densité donnée, 8 niveaux de perte de charge d'air étaient obtenus en faisant varier la vitesse d'air à l'aide d'un variateur de

fréquence sur le moteur. Après chaque expérience (un niveau de densité), huit échantillons étaient prélevés de chaque balle et mis à l'étuve à 60°C pendant 72 h pour mesurer la teneur en eau selon la norme S358.2 (ASAE, 1999b).

LES SÉCHOIRS

Deux séchoirs identiques ont servi à réaliser cette expérience (figure 1). La chambre de séchage, qui contenait la colonne de foin, fonctionnait sous pression négative. L'air était aspiré du haut vers le bas de la colonne de foin par un ventilateur centrifuge (New York Blower, modèle Compact GI 105). Le débit du ventilateur à opération normale était de 3,4 m³/min à une pression statique de 2,2 kPa. Un contrôleur de vitesse variable (AC Tech) actionnait le moteur électrique de 1,5 kW (Leeson) relié au ventilateur par une courroie d'entraînement.

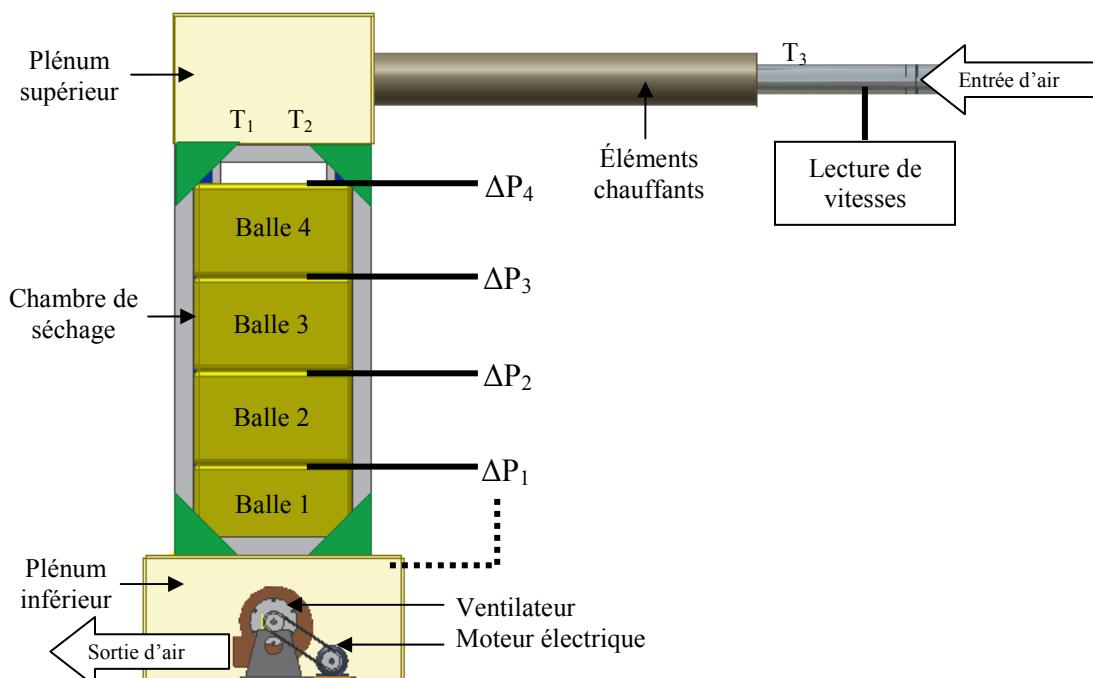


Figure 1. Schéma du séchoir.

Les séchoirs ont été construits afin de minimiser les infiltrations d'air et les pertes de chaleur. La section entre les éléments chauffants et la chambre de séchage a été isolée avec de la mousse et de la laine de roche ininflammables. Les parois de la chambre de séchage étaient faits de polyéthylène transparent très résistant (0,15 mm d'épaisseur) de façon à mouler les balles adéquatement quand la chambre était sous vacuum. Les balles reposaient sur un grillage de métal par dessus le plenum inférieur connecté au ventilateur. Cinq éléments chauffants étaient placés dans la conduite d'entrée de 152 mm de diamètre. Ces éléments généraient 250, 500, 750, 1000 et 1500 W, respectivement. Différentes combinaisons d'éléments permettaient de couvrir une gamme de puissance entre 0 et 4000 W par incrément de 250 W. Les moteurs et éléments chauffants étaient contrôlés par un programme LabVIEW (National Instrument). Des thermistors étaient disposés dans le plenum supérieur pour lire la température effective de séchage. La température moyenne était comparée à la température de consigne (normalement de 60°C) qui contrôlait le chauffage à l'aide d'un programme PID intégré à LabVIEW.

Les tests de perte de charge ont tous été effectués avec le séchoir no. 2 et de l'air ambiant (sans apport de chaleur). Les balles étaient séchées seulement pour modifier le niveau de teneur en eau. Lors du séchage, chaque séchoir contenait deux balles. La position des balles était changée après la première moitié du processus. Le séchage prenait fin lorsque le niveau de teneur en eau désiré était atteint. En général, 2 heures suffisaient pour faire passer deux petites balles de foin de 18% à 14% de teneur en eau avec une vitesse d'air d'environ 0,25 m/s.

MESURE DE LA VITESSE D'AIR ET DE LA PERTE DE CHARGE

La vitesse d'air à travers les balles était mesurée à l'aide d'un anémomètre à fil chaud (TSI VelociCheck, modèle 8330). La précision de l'anémomètre était la plus haute valeur entre $\pm 0,025$ m/s ou 5% de la lecture. La vitesse était calculée sur une moyenne de 10 points d'une section circulaire de la conduite d'entrée d'air. Un manomètre en U était utilisé pour mesurer la perte de charge à travers la colonne de foin. Sa précision était de ± 1 mm de colonne d'eau (± 10 Pa).

Analyse de données

Une analyse préliminaire des données était effectuée à l'aide de graphiques représentant la perte de charge (Pa) en fonction de la vitesse pour chaque hauteur de foin. Une analyse statistique approfondie a été effectuée à l'aide du logiciel SAS (2003). Les niveaux de signification des variables sur la prédiction de la perte de charge ont été déterminés à l'aide de la procédure GLM de SAS. Les coefficients des équations de prédiction ont été déterminés avec les procédures REG (équations 1, 2 et 3) et NLIN (équation 4) de SAS.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le tableau 1 illustre les plages de vitesses, pertes de charge et gradients de pression mesurés pour les sept niveaux de densité de foin. Il est à noté que le profil 4 n'a pu être expérimenté qu'avec trois balles au lieu de quatre.

L'analyse statistique montrait que pour une même vitesse d'air, la perte de charge augmentait de façon presque linéaire lorsqu'une balle était ajoutée à la colonne de foin. Il est donc possible de représenter la perte de charge par unité de hauteur, c'est-à-dire le gradient de pression (Pa/m).

La variation de perte de charge due à la teneur en eau du foin n'était pas significative pour les 7 profils étudiés. Ainsi, les modèles de perte de charge peuvent être basés sur la densité en matière sèche (DMS) seulement. Les divers niveaux de teneur en eau sont donc considérés comme des répétitions.

Tableau 1. Gammes de vitesses, de pertes de charge et de gradients de pression pour chaque niveau de densité expérimentés.

Profil	Densité moyenne testée (kg MS/m ³)	Vitesses (m/s)	Pertes de charge (Pa)	Gradients de pression (Pa/m)
2	240	0,08 - 0,68	225 - 2785	147 - 5274
3	207	0,13 - 0,47	235 - 1981	305 - 3509
4	182	0,14 - 0,80	186 - 2569	189 - 4402
5	164	0,17 - 0,59	108 - 1373	202 - 2005
6	160	0,16 - 0,83	186 - 2550	212 - 3574
7	121	0,23 - 1,05	88 - 1922	117 - 1763
8	98	0,21 - 1,06	78 - 1824	104 - 1866

La figure 2 illustre l'ensemble des données de gradient de pression en fonction de la vitesse pour les divers niveaux de densité sur un graphique log-log. De façon générale, lorsque la densité en matière sèche augmente, la résistance au passage de l'air augmente. Ces données ont servi à estimer les paramètres des quatre modèles de prédiction.

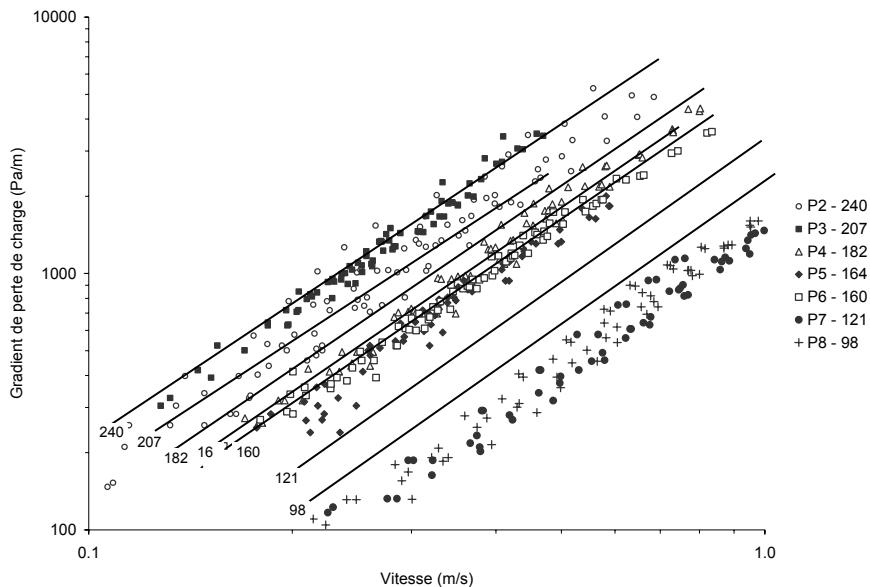


Figure 2. Gradient de perte de charge en fonction de la vitesse d'air pour différents niveaux de densité (entre 98 et 240 kg MS/m³). Les courbes superposées sont basées sur le modèle de puissance.

LE MODÈLE DE L'ASAE

Les paramètres α et β de l'équation de l'ASAE, de type non linéaire, se sont avérés plutôt difficiles à estimer étant donné le peu de sensibilité de $\Delta P/L$ lorsque β variait. Ainsi, il a été convenu de fixer β comme étant a) égal à la DMS ou b) égale à 150 (moyenne approximative des DMS). Dans la littérature, Anderson (1998) fixa β car ce paramètre ne semblait pas être influencé par les variables à l'étude (à savoir la densité, et le type de traitement). Avec ces hypothèses, il était possible de traiter l'équation comme un modèle linéaire sans ordonnée à l'origine. Le cas où β était égal à 150 donna de meilleurs résultats. Plusieurs modèles de régression ont été évalués sur le paramètre α en tenant compte de tous les niveaux de densité. Les modèles suivants ont été testés: $\alpha = a_1 \times DMS$, $\alpha = a_1 \times DMS + a_2 \times DMS^2$, et $\alpha = a_1 \times DMS^2$ où a_1 et a_2 sont des paramètres spécifiques à α . La meilleure estimation de α est donnée par $\alpha = 1,06061 \times DMS^2$. La forme finale du modèle de l'ASAE est donnée par l'équation 5 ($R^2_{\text{ajusté}} = 0,8057$).

$$\frac{\Delta P}{H} = 1,06061 \times DMS^2 \left(\frac{V^2}{\ln(1+150V)} \right) \quad (5)$$

LE MODÈLE DE PUISSANCE

Après linéarisation de l'équation originale, les paramètres ont été estimés par la procédure REG pour chaque niveau de densité. Le paramètre α était fonction de la densité au carré. Par contre, le paramètre β ne semblait pas être influencé par la densité du foin. La moyenne des β était 1,84, une constante pour l'équation. Le modèle de puissance s'ajustant le mieux aux données est exprimé par l'équation 6 ($R^2_{\text{ajusté}} = 0,7926$).

$$\frac{\Delta P}{H} = 0,22214 \times DMS^2 \times V^{1,84} \quad (6)$$

LE MODÈLE D'ERGUN

Les paramètres de l'équation d'Ergun (1952) ont été estimés à l'aide de la procédure REG pour chaque niveau de densité. Par après, la valeur des paramètres α et β a été modélisée en fonction de la densité au carré. L'équation décrivant le modèle final d'Ergun est définie par l'équation 7 (R^2 ajusté = 0,7848):

$$\frac{\Delta P}{H} = 0,01869 \times DMS^2 \times V + 0,21209 \times DMS^2 \times V^2 \quad (7)$$

LE MODÈLE EXPONENTIEL

Les paramètres de l'équation exponentielle ont été estimés à l'aide de la procédure NLIN pour chaque niveau de densité. Cette procédure a nécessité plusieurs ajustements dont une bonne estimation initiale des paramètres. Dans le cas du modèle exponentiel, α et β étaient fonction de la densité. L'équation décrivant le modèle final exponentiel est donnée par l'équation 8 (R^2 ajusté = 0,7365). En comparant les données expérimentales aux valeurs prédictes pour le modèle exponentiel, il existait une nette surestimation du gradient de pression dans les extrémités de la gamme de vitesse couverte.

$$\frac{\Delta P}{H} = 3,51312 \times DMS (\exp(0,01548 \times DMS \times V) - 1) \quad (8)$$

COMPARAISON DES MODÈLES FINAUX

Le modèle de l'ASAE, le modèle de puissance et le modèle d'Ergun ont estimé convenablement les gradients de perte de charge pour les niveaux de densité entre 160 et 240 kg MS/m³. Cependant, ces trois modèles surestimaient le gradient de perte de charge pour les niveaux de densité inférieurs, soit 98 et 121 kg MS/m³. Lorsqu'on a comparé les résultats des régressions des quatre modèles pour chaque niveau de densité, le modèle de l'ASAE était meilleur dans deux cas, celui de puissance dans quatre cas et celui d'Ergun dans un cas. Le modèle exponentiel ne représentait pas bien les données expérimentales à tous les niveaux de densité.

L'analyse des modèles finaux s'effectue par comparaison de l'erreur type et du R^2 ajustés d'une régression linéaire sans ordonnée à l'origine des valeurs expérimentales en fonction des valeurs prédictes du gradient de perte de charge. Le tableau 2 résume les critères d'ajustements des 4 modèles à l'essai.

Tableau 2. Résumé des critères d'ajustement des modèles à l'essai.

Modèle	R^2 ajusté	Erreur type
1. ASAE	0,8057	379,13
2. Puissance	0,7926	391,77
3. Ergun	0,7848	399,21
4. Exponentiel	0,7365	442,13

En considérant l'ajustement du modèle spécifique à chaque niveau de densité et à l'ajustement global sur les toutes les valeurs expérimentales, le modèle de puissance (équation 6) permet d'obtenir la meilleure estimation du gradient de pression dans une gamme de densités se situant entre 98 et 240 kg DM/m³ et à des vitesses d'air allant de 0,08 à 1,06 m/s. Cependant, le modèle

de puissance, tout comme les modèles de l'ASAE et d'Ergun, surestime considérablement le gradient de pression pour les profils à basse densité (98 et 121 kg MS/m³) comme le présente la figure 2. Pour cette raison, le modèle (équation 6) s'avère plus juste dans la gamme de densités allant de 160 et 240 kg MS/m³. Pour des densités inférieures à 160 kg MS/m³, le modèle surestime les pertes de charge expérimentale. Un modèle distinct pour les plus basses densités pourrait être développé en allant chercher un nombre accru de données expérimentales.

CONCLUSION

La relation entre la perte de charge par unité de hauteur de foin et la vitesse de l'air était linéaire lorsque reportée sur un graphique log-log. Outre la vitesse de l'air, le seul autre facteur ayant un effet significatif sur la perte de charge était la densité en matière sèche. La teneur en eau entre 10 et 18% n'avait pas d'effet significatif sur la perte de charge. La perte de charge était proportionnelle au carré de la densité en matière sèche. Parmi quatre équations évaluées, l'équation de puissance (équation 2) donnait la meilleure estimation du gradient de perte de charge pour 4 niveaux de densité sur 7 niveaux évalués, et arrivait 2^e pour la prédiction de perte de charge globale en fonction de la vitesse d'air et de la densité du foin. Le modèle de l'ASAE donnait la meilleure estimation du gradient de perte de charge pour 2 niveaux de densité sur 7, et arrivait 1^{er} pour la prédiction de perte de charge globale. Le modèle d'Ergun donnait aussi des résultats acceptables tandis que l'équation exponentielle ne représentait pas le phénomène adéquatement. Il est recommandé d'utiliser les modèles de puissance ou le modèle de l'ASAE seulement dans la plage de densité entre 160 et 240 kg MS/m³ car les modèles surestimaient la perte de charge aux densités inférieures à 160 kg MS/m³. D'autre part, il serait approprié de répéter l'expérience de façon à vérifier l'effet de la teneur en eau et à obtenir plus de mesures de pertes de charge pour de basses densités.

RÉFÉRENCES

- Anderson, D.S., Abubakar, Y., Young, J.H., Johnson, W.H. 1998. Pressure vs airflow characteristics through fresh intact and cut-strip tobacco. *Transactions of the ASAE*. Vol. 41(6): 1747-1753.
- ASAE. 1999a. Resistance to airflow of grain, seeds, other agricultural products, and perforated metal sheet. ASAE D272.3. Standards, 46th Edition, *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, MI, USA.
- ASAE. 1999b. Moisture measurement – forages. ASAE S358.2. Standards, 46th Edition. *American Society of Agricultural Engineers*, St-Joseph, MI, USA.
- Bakker-Arkema, F.W., Patterson, R.J., Bickert, W.G. 1969. Static pressure-airflow relationships in packed beds of granular biological materials such as cherry pits. *Transactions of the ASAE* 12(1):134-136, 140.
- Descôteaux, S., Savoie, P. 2003. Artificial drying of big square bale hay. *International conference on crop harvesting and processing*. ASAE publication 701P1103e.
- Ergun, S. 1952. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress* 48(2):89-94.
- SAS. 2003. SAS Onlinedoc V8. *SAS/STAT User's Guide*. SAS Institute Inc.
- Shedd, C.K. 1946. Resistance of hay to air flow and its relation to design of barn hay-curing equipment. *Agricultural Engineering* 27(4):169-170.

Récolte et séchage des résidus de maïs pour la biomasse

Philippe Savoie

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

Introduction

Le maïs-grain est une importante culture au Canada (tableau 1). Il est semé sur environ 1,2 million d'hectares par année au Canada, dont plus du tiers au Québec (Statistiques Canada, 2005 ; FPCCQ, 2005). La production totale de grain au cours des six dernières années était de 8,65 millions de tonnes en moyenne par an au Canada avec une productivité par unité de surface de 7 t/ha. Au cours des six dernières années, l'Ontario a fourni 63% de la production et le Québec 34%, tandis que le reste (3%) provenait principalement du Manitoba. Depuis deux ans (2003 et 2004), la part du Québec s'est accrue à 38% tandis que celle de l'Ontario a baissé à 60%. La productivité moyenne au Québec dépasse 8 t/ha depuis deux ans.

Tableau 1. Production de maïs-grain au Canada et estimation des résidus potentiels.

Année	Superficie (million ha)	Production (million t)	Productivité unitaire (t/ha)	Résidus estimés (t/ha)	Résidus récoltables (t/ha)
1999	1,17	9,16	7,86	6,43	3,21
2000	1,21	6,95	5,77	4,72	2,36
2001	1,29	8,39	6,48	5,30	2,65
2002	1,30	9,00	6,93	5,67	2,83
2003	1,27	9,59	7,58	6,20	3,10
2004	1,19	8,84	7,46	6,10	3,05
Moyenne	1,24	8,65	7,01	5,74	2,87

En plus de produire du grain, le maïs est reconnu pour fournir une abondante biomasse végétale formée de tiges, de rafles, de feuilles et de spathes. Récemment, divers chercheurs, notamment aux États-Unis, ont quantifié la masse de ces fractions par rapport à la masse du grain (Edens et al., 2002 au Tennessee; Shinners et al., 2003a au Wisconsin). Les premiers ont estimé que les résidus de maïs représentaient environ 50% de la masse totale de la plante tandis que les deuxièmes ont estimé ce ratio à 43% lors du battage du grain qui est plus tardif au Wisconsin qu'au Tennessee. Dans le tableau 1, on a utilisé un ratio de 45% pour estimer les résidus de maïs qui seraient ainsi de l'ordre de 7 millions de tonnes par an au Canada (7,01 t de grain/ha x 1,24 Mha x 45%/55%). Les résidus de maïs au Québec seraient de l'ordre de 2,7 Mt/an.

Présentement, ces résidus ne sont guère valorisés autrement qu'en les laissant se décomposer au sol après le battage du grain. Sheehan et al. (2002) ont développé un modèle pour prédire la dégradation et l'érosion des sols causées par un prélèvement des résidus de maïs aux États-Unis. Ils ont estimé qu'on pouvait prélever 40% des résidus dans les champs avec labour conventionnel et 60% des résidus dans les champs sans labour («*minimum tillage*») tout en respectant la limite de perte de sol tolérable selon les normes du Natural Resources Conservation Service du USDA. Au tableau 1, on a estimé que les résidus récoltables au Canada seraient 50%

des résidus totaux. On dispose donc d'environ 3,5 Mt/an de résidus de maïs récoltables au Canada (environ 1,35 Mt/an au Québec).

Les utilisations potentielles des résidus de maïs sont nombreuses : 1) comme aliment fibreux pour le bétail, habituellement après un enrichissement à l'ammoniac; 2) pour l'énergie par combustion; 3) pour la production de biocarburants après l'hydrolyse de la fibre en sucres et la fermentation de ces sucres en éthanol; 4) comme fibre courte pour les panneaux de particules agglomérées; 5) comme fibre longue pour les panneaux de bois orienté (OSB). Certaines applications, comme la bioénergie et les particules de bois, requièrent un résidu de maïs assez sec avec une teneur en eau d'environ 12%.

Les résidus de maïs peuvent contenir un niveau d'humidité très variable lors du battage du grain, entre 15 et 75% de teneur en eau selon la saison et la géographie (Edens et al. 2002; Shinners et al. 2003a). C'est pourquoi on doit envisager des combinaisons de diverses techniques de séchage au champ après le battage et de séchage artificiel après le ramassage pour obtenir un résidu de maïs de qualité satisfaisante comme biomasse sèche.

La présente communication rapporte des travaux de recherche qui se sont déroulés en deux étapes. La première étape consistait à examiner divers scénarios de récolte des résidus de maïs et d'en estimer le coût. Elle a été réalisée en collaboration avec le professeur Shinners au Wisconsin. On trouvera des résultats plus détaillés dans Shinners et al. (2003b). La deuxième étape a consisté à sécher artificiellement de grosses balles rectangulaires de résidus de maïs. Elle a été faite au Québec et les détails sont rapportés dans Savoie et Descôteaux (2004). Les pages qui suivent présentent les principaux résultats de ces deux études.

Récolte des résidus de maïs

Plusieurs scénarios peuvent être envisagés pour la récolte des résidus de maïs. Une première procédure consiste à traiter les résidus avec une déchiqueteuse après le battage du grain (figure 1), de râtelier ces résidus après quelques jours de séchage (figure 2) et de ramasser les andains soit avec une presse, soit avec une fourragère (figures 3 et 4).



Figure 1. Opération de déchiquetage des résidus de maïs après la récolte du grain.



Figure 2. Opération de râtelage des résidus de maïs après une période de séchage au champ.

L'équipement pour appliquer cette séquence d'opérations est déjà disponible. Toutefois cela représente trois passages au champ après le battage, souvent dans des circonstances difficiles tant pour l'opération de la machinerie au champ (sols boueux en novembre) que pour le séchage des résidus au champ à cause du climat froid et relativement humide.

Idéalement, on pourrait modifier la moissonneuse-batteuse pour qu'elle récolte en un seul passage le grain et les résidus dans deux trémies ou remorques distinctes. Une modification

proposée consiste à arracher les épis et les envoyer vers le batteur et à dévier toutes les tiges et autres résidus vers le côté du nez cueilleur de maïs. Un cylindre hacheur avec souffleur transforme les résidus en particules fines qui sont projetées dans un camion circulant à côté de la moissonneuse-batteuse (figure 5).



Figure 3. Ramassage des andains de résidus de maïs avec une presse à balles rondes.



Figure 4. Ramassage des andains de résidus de maïs avec une fourragère automotrice.

Une autre modification proposée consiste à acheminer les résidus à l'arrière de la moissonneuse-batteuse et de comprimer les résidus, sans les hacher, sous forme de grosses balles (figure 6). Cette dernière configuration requiert une machine très lourde et aura normalement une capacité plus faible que la précédente parce qu'une proportion plus importante de la masse végétale doit passer à travers les mécanismes de battage et vannage dans la batteuse. Ces deux configurations ont l'avantage de ne représenter qu'un seul passage au champ pour la récolte simultanée du grain et des résidus de maïs. Toutefois, les résidus ne peuvent pas sécher au champ et doivent être séchés artificiellement.



Figure 5. Moissonneuse-batteuse modifiée pour récolter simultanément le maïs-grain et les résidus hachés en seul passage.



Figure 6. Moissonneuse-batteuse modifiée pour récolter simultanément le maïs-grain et les résidus sous forme non-hachée en balles.

Au total, 16 configurations de machines de récolte de résidus de maïs ont été considérées. Les estimations économiques ont été faites à partir des prix au Wisconsin en 2003. Les hypothèses détaillées et les calculs intermédiaires sont expliqués dans Shinners et al. (2003b). Au tableau 2, on présente les principales combinaisons d'équipement retenues et les coûts estimés pour la

récolte, l'entreposage, la manutention et le transport. Le coût total pour des résidus séchés au champ puis récoltés en balles était de 42 \$/t (base sèche) si les balles étaient entreposées à l'extérieur et 47 \$/t avec l'entreposage à l'intérieur. Les principales différences étaient le niveau de pertes d'entreposage (7% à l'intérieur, 15% à l'extérieur) et l'investissement pour l'entreposage (65 \$/m² à l'intérieur et 5 \$/m² à l'extérieur). Dans les conditions du Wisconsin, il était donc plus économique de ne pas mettre les balles sèches à l'abri. Quand les balles étaient entreposées humides et enrubannées, le coût total de récolte, d'entreposage et de transport était de 45 \$/t. D'une part, les pertes d'entreposage (5%) de même que les pertes au champ étaient plus faibles qu'avec des balles complètement séchées au champ. D'autres part, il fallait ajouter un film plastique de protection et des coûts de transport plus élevés (la teneur en eau était en moyenne de 20% dans les balles sèches et 50% dans les balles humides).

La récolte des résidus de maïs sous forme hachée et humide était moins chère (31 à 36 \$/t) que sous forme de balle (42 à 47 \$/t). Le développement d'une batteuse avec un système de hachage des tiges intégré (figure 5) semble très prometteur avec le coût total le moins élevé (31 \$/t). Les systèmes de récolte de résidus hachés avec deux ou trois passages au champ sont légèrement plus cher (34 à 36 \$/t). Le système à un passage avec presse n'est pas rapporté au tableau 2 ; il coûtait environ 10 \$ de plus par tonne sèche que le système à un passage avec hachage à cause du ralentissement de la batteuse et du coût plus élevé de transport de balles humides par rapport à des particules hachées.

Tableau 2. Coût de récolte, entreposage, manutention et transport de résidus de maïs selon la méthode de récolte et de conservation (\$ U.S. par t MS : Source : Shinners et al. 2003b).

Récolte et transport du champ à l'entrepôt	Chargement, entreposage et déchargement	Transport vers l'usine de conversion	Total
			Coût des opérations (\$ U.S./t MS)
Balles sèches			
Entreposées à l'intérieur	30,90	15,40	47,40
Entreposées à l'extérieur	30,90	10,00	42,00
Balles humides			
Enrubannées	28,50	14,60	45,20
Hachés et humides			
Un passage	14,20	14,50	30,80
Deux passages	17,40	14,50	34,00
Trois passages	19,00	14,50	35,60

Il est plus simple de récolter les résidus sous forme humide que sous forme sèche parce qu'on élimine la période de fanage au champ. Les coûts sont les plus faibles pour la récolte simultanée au battage avec le hachage (un passage). L'utilisation finale des résidus dictera toutefois si des résidus humides et hachés conviennent.

Séchage artificiel des résidus de maïs

Compte tenu que les résidus de maïs peuvent être trop humides pour certaines utilisations, même après un fanage au champ, on a envisagé le séchage artificiel. Des résidus de maïs ont été récoltés à la fin d'octobre et au début de novembre 2003 près de Nicolet au Québec après le battage du grain. Les résidus ont séché partiellement au champ pendant une période variant de deux à cinq jours. Toutes les balles ont été récoltées sous forme de grosses balles rectangulaires de

dimensions de 0,89 m de hauteur, 0,81 m de largeur et 1,52 m de longueur. Les balles étaient enrubannées et transportées à Normandin où est situé un séchoir expérimental de grosses balles. Dans un contexte commercial, les balles ne seraient pas enrubannées mais envoyées directement au séchoir. Pour cette expérience, l'enrubannage avait pour but de protéger les balles de résidus humides contre l'oxydation et le développement de moisissures. Entre la récolte et le moment du séchage, il s'est écoulé environ trois semaines.

Un séchoir expérimental développé à l'origine pour le séchage artificiel de grosses balles rectangulaires de foin a été adapté pour les balles de résidus de maïs. La figure 7 illustre le séchoir avec des balles placées entre deux plénums. Une caractéristique unique de ce séchoir est sa bi-directionnalité. L'air chaud peut être tiré du haut vers le bas ou du bas vers le haut grâce à un jeu de valves dans les conduites d'air. L'air est chauffé avec un brûleur au gaz propane et est tiré dans le plenum du haut ou dans le plenum du bas selon la direction souhaitée. Après avoir circulé à travers les balles, l'air humide est tiré vers le ventilateur qui crée une succion (pression négative) dans le séchoir. Un système de re-circulation permet de retourner une partie de l'air humide vers le séchoir et d'évacuer le reste de l'air humide à l'extérieur. Le compartiment de séchage est scellé grâce à une jupe de polyéthylène qui entoure les balles et qui est fixée sur toute la périphérie des plénums du haut et du bas. La succion crée une excellente adhérence entre le film plastique et les balles. Le brûleur a une puissance de 102 kW (350 000 BTU/h) et le ventilateur une puissance de 11,2 kW. On peut trouver une description plus détaillée du séchoir et des résultats concernant le séchage du foin dans la communication de Descôteaux et Savoie (2004).

Une légère modification des balles de résidus de maïs par rapport aux balles de foin était leur placement à cause d'une longueur plus courte (1,52 m versus 2,44 m pour les balles de foin). Alors que six balles de foin étaient placées sur le plancher, on plaçait neuf balles de résidus de maïs sur le même plancher (figure 8). Cela faisait plus de joints, mais les balles étaient poussées les unes contre les autres de façon à minimiser les fuites d'air durant l'écoulement.

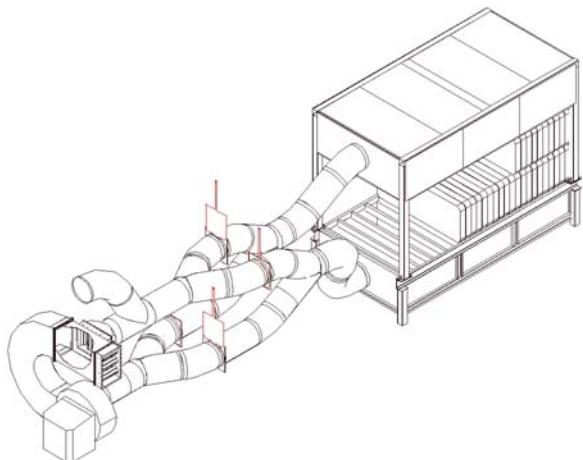


Figure 7. Schéma du séchoir bidirectionnel utilisé pour sécher les balles de résidus de maïs.

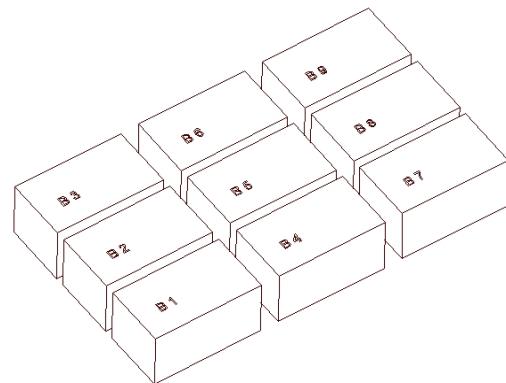


Figure 8. Position des balles placées sur une couche dans le séchoir (0,89 m de haut par 2,44 m de large par 4,57 m de long).

Un premier essai de séchage avec neuf balles de résidus de maïs a été réalisé du 17 au 19 novembre. Les balles ont séché pendant 40 h sans re-circulation d'air à une température d'entrée de 40°C, puis pendant 12 h avec re-circulation de 89% de l'air humide à une température d'entrée

de 67°C. Le débit d'air était inversé à toutes les 8 h durant les 40 premières heures et chaque balle était pesée lors de l'inversion du débit (cela exigeait une interruption de séchage d'environ une heure pour les manipulations et pesées). La figure 9 illustre le séchage moyen de ces neuf balles. Les balles humides pesaient au départ en moyenne 282 kg chacune et 152 kg à la fin de la période de 52 h de séchage. La densité des balles variait entre 87 et 137 kg de matière sèche/m³, avec une moyenne de 110 kg MS/m³. La teneur en eau initiale variait entre 49 et 66%, avec une moyenne de 56%. La teneur en eau finale variait de 7 à 30% avec une moyenne de 20%.

Un deuxième essai de séchage avec 18 balles de résidus de maïs a été réalisé du 20 au 24 novembre. Les balles étaient superposées en deux couches de 9 balles chacune; ainsi la hauteur était le double (1,78 m) par rapport au premier essai (0,89 m). Les balles ont séché pendant 90 h avec re-circulation continue de 89% d'air à une température d'entrée moyenne de 61°C. Le débit d'air a été inversé une seule fois, après 16 h. Chaque balle a été pesée seulement au début et à la fin du séchage ; c'est pourquoi on ne peut qu'interpoler les teneurs en eau intermédiaires entre 0 et 90 h. La figure 10 illustre le séchage moyen de ces 18 balles. Les balles humides pesaient au départ en moyenne 300 kg chacune et 161 kg à la fin de la période de 90 h de séchage. La densité des balles variait entre 94 et 144 kg MS/m³, avec une moyenne de 120 kg MS/m³. Pour les deux expériences (27 balles), la densité moyenne était de 117 kg MS/m³. La teneur en eau initiale de cette deuxième expérience variait entre 49 et 62%, avec une moyenne de 56%. La teneur en eau finale variait de 8 à 38% avec une moyenne de 18%.

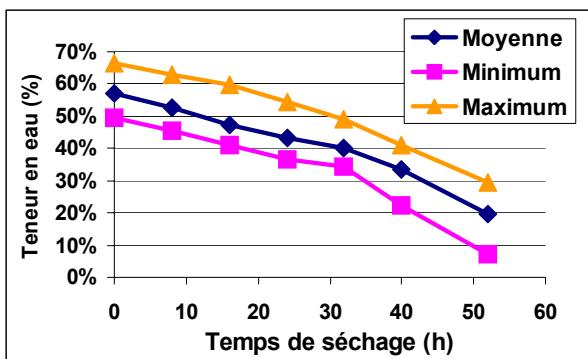


Figure 9. Teneurs en eau durant le séchage artificiel de 9 balles de résidus de maïs placées sur un niveau (hauteur de 0,89 m).

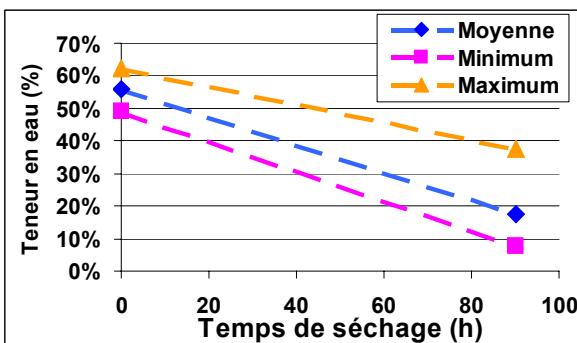


Figure 10. Teneurs en eau durant le séchage artificiel de 18 balles de résidus de maïs placées sur deux niveau (hauteur de 1,78 m).

Sur la base de ces résultats expérimentaux, on a estimé que l'évaporation moyenne pouvait être de l'ordre de 1,5 kg d'eau/h par balle avec une efficacité énergétique de 30%. On a fait des calculs de simulation des coûts de séchage de résidus de maïs selon la teneur en eau à la récolte entre 20 et 55% avec comme objectif d'atteindre une teneur en eau finale moyenne de 12%. Au tableau 3, on observe que le temps total de séchage des balles de 20% de teneur en eau à la récolte jusqu'à l'objectif de 12% serait de 10,4 h. Si les balles sont très humides à 55% de teneur en eau, il faudrait prévoir 100 h de séchage artificiel. De même, l'énergie de chauffage varierait entre 263 et 2514 kW·h/t MS selon la teneur en eau initiale. Les charges variables qui représentent essentiellement le coût de l'énergie de chauffage et de l'énergie de ventilation ont été estimées pour deux systèmes de chauffage, soit au gaz naturel (coût supposé de 8,33 \$/GJ), soit avec un système de pompe à chaleur fonctionnant à l'électricité (coût supposé de 16,77 \$/GJ ou 0,06 \$/kW·h). Les charges variables du système avec brûleur au gaz ont varié entre 10 et 98

\$/t MS; les charges variables du système avec pompe à chaleur ont varié entre 6 et 56 \$/t MS. Ce dernier système a des charges variables plus basses à cause de sa grande efficacité énergétique à fournir de la chaleur. Toutefois, les coûts d'investissement et d'amortissement plus grands de la pompe à chaleur, qui ne sont pas comptabilisés ici, pourraient annuler la différence de coût entre les deux systèmes. Ce qu'il faut retenir, c'est surtout le fait que le coût énergétique sera élevé dans les deux cas et supérieur à 10 \$/t MS aussitôt que la teneur en eau à la récolte sera supérieure à 20-25%. Or la plupart des applications envisagées pour utiliser la biomasse végétale basent leur rentabilité sur des coûts d'approvisionnement assez bas, généralement inférieurs à 50 \$/t MS, et pour lesquels on ne peut guère envisager une opération de séchage artificiel plus onéreuse que 10 à 20 \$/t MS (DiPardo, 2002).

Tableau 3. Estimations du temps de séchage, de l'énergie et des charges variables (d'énergie seulement) pour sécher artificiellement des balles de résidus de maïs jusqu'à 12 % de teneur en eau finale avec un brûleur ou une pompe à chaleur (\$ CA/t MS ; source : Savoie et Descôteaux, 2004).

Teneur en eau à la récolte (%) base sèche)	Temps de séchage (h)	Énergie de chauffage (kW•h/t MS)	Énergie de ventilation (kW•h/t MS)	Charges var. avec brûleur (\$/t MS)	Charges var. avec pompe à chaleur (\$/t MS)
20	10,4	263	39	10,24	5,86
25	18,1	456	68	17,75	10,16
30	26,8	676	101	26,33	15,07
35	36,9	931	139	36,23	20,74
40	48,7	1228	183	47,79	27,36
45	62,6	1578	235	61,44	35,17
50	79,3	1999	297	77,82	44,55
55	99,6	2514	374	97,85	56,02

Il semble donc peu probable qu'on puisse envisager la récolte de quantités importantes de résidus de maïs secs au Québec et dans l'est du Canada à un coût en dessous de la cible de 50 \$/t MS. En effet, on a vu que la récolte, l'entreposage et le transport de résidus coûteront entre 31 et 47 \$ (U.S.)/t MS selon les techniques de récolte utilisées. Le séchage artificiel pourrait être réalisé à moins de 10 \$/t MS seulement si les résidus sont séchés au champ jusqu'à 20% avant le ramassage. Toutefois, un expérience au Québec montrait que la teneur en eau à la récolte était en moyenne de 56% après 2 à 5 jours de séchage. Des expériences aux États-Unis montrent qu'il faut parfois trois semaines de séchage avant d'abaisser la teneur en eau des résidus au champ jusqu'à 20%. Cela semble cependant difficile à réaliser au Québec à cause de la récolte plus tardive du grain de maïs et de la période froide et humide, donc peu propice au séchage au champ, suite à la récolte du grain.

Conclusions

Deux études ont été menées pour évaluer divers systèmes de récolte des résidus de maïs et leur séchage artificiel en vue d'une utilisation comme biomasse industrielle, que ce soit pour de l'énergie ou pour fabriquer des bio-produits comme des panneaux agglomérés. La récolte de résidus de maïs après le battage du grain requiert des opérations supplémentaires au champ comme le déchiquetage, le râtelage et le pressage ou le hachage. Ces opérations ont l'avantage de laisser les résidus au champ pour un séchage naturel et l'abaissement de la teneur en eau. Une autre possibilité est la récolte simultanée du grain et des résidus, et leur séparation directement au

champ. Toutefois, les résidus auront alors une teneur en eau élevée qui ne convient pas à certaines utilisations de la biomasse. Les coûts de récolte, transport et entreposage des résidus de maïs sont estimés au minimum à 31 \$ (U.S.)/t MS pour un système à un passage avec hachage, et jusqu'à 47 \$ (U.S.)/t MS pour un système à passages multiples et ramassage en balle.

Dans un climat frais et humide comme celui du Québec et de l'Ontario où la production de maïs est concentrée pour le Canada, il est difficile d'envisager un séchage naturel complet des résidus au champ. Le séchage artificiel des résidus sous forme de grosses balles est techniquement possible, bien qu'il y aura des variations de teneurs en eau finales à l'intérieur des produits. Économiquement, les charges variables du séchage artificiel ont été estimées entre 6 et 100 \$/t MS selon la teneur en eau à la récolte, la technologie de chauffage et la source d'énergie utilisée. De plus, ce coût n'inclut pas les charges fixes qui hausseraient encore le coût total. Donc, en pratique il sera difficile de livrer des quantités importantes de résidus de maïs secs à un prix inférieur à 50 \$/t MS, une cible parfois mentionnée par le secteur de la biomasse. Il sera toutefois possible d'envisager des livraisons de résidus si l'industrie peut utiliser un produit humide qui ne nécessite pas de séchage artificiel.

Remerciements

Un soutien financier a été obtenu du programme fédéral de recherche et de développement sur l'énergie (PERD) pour l'identification de nouveaux systèmes de récolte et d'entreposage de la biomasse. Le volet séchage a bénéficié d'une collaboration avec le Centre de recherche et de développement de l'agriculture du Cégep d'Alma qui était responsable de la récolte des balles de résidus de maïs. L'auteur remercie M. Sébastien Descôteaux qui a développé le séchoir bidirectionnel et réalisé la cueillette de données sur le séchage au champ.

Références

- Descôteaux, S. and P. Savoie. 2004. Bi-directional dryer for mid-size square hay bales. ASAE/CSAE Paper No. 041135. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- DiPardo, J. 2002. Outlook for Biomass Ethanol Production and Demand. Site du U.S. Department of Energy. <http://www.eia.doe.gov/oiaf/analysispaper/biomass.html>
- Edens, W.C., L.O. Pordesimo and S. Sokhansanj. 2002. Field drying characteristics and mass relationships of corn stover fractions. ASAE Paper No. 026015. St. Joseph, MI: ASAE.
- FPCCQ. 2005. Offre et demande du maïs au Québec en tonnes métriques. Fédération des producteurs de cultures commerciales du Québec. <http://www.fpccq.qc.ca/> (Statistiques).
- Savoie, P. et S. Descôteaux. 2004. Artificial drying of corn stover in mid-size bales. Canadian Biosystems Engineering 46: 2.25-2.34.
- Sheehan, J., A. Aden, K. Paustian, K. Killian, J. Brenner, M. Walsh and R. Nelson. 2002. Is ethanol made from corn stover a sustainable transportation fuel? Draft report. 26 pages. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- Shinners, K.J., B.N. Binversie and P. Savoie. 2003a. Harvest and storage of wet and dry corn stover as a biomass feedstock. ASAE Paper No. 036088. St. Joseph, MI: ASAE.
- Shinners, K.J., B.N. Binversie and P. Savoie. 2003b. Whole-plant corn harvesting for biomass: comparison of single-pass and multiple pass harvest systems. ASAE Paper No. 036089. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Statistique Canada. 2005. Grandes cultures et cultures spéciales. Canada en statistiques, Agriculture, Cultures. http://www.statcan.ca/francais/Pgdb/prim11a_f.htm

Fermentation de la fléole des prés en fonction du stade, de la teneur en matière sèche et de la méthode de récolte

André Amyot¹

¹Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, 120-A Chemin du Roy, Deschambault, Québec, andre.amyot@irda.qc.ca

La fléole des prés est la graminée fourragère la plus cultivée au Québec. On la considère comme une plante relativement facile à ensiler. Cependant, on observe souvent des problèmes de conservation lorsqu'on l'ensile en balle ronde, surtout suite à une récolte à un stade avancé de maturité. La chute de pH est moins rapide et l'acidification finale moins poussée dans l'ensilage en balle ronde que dans l'ensilage conventionnel parce que le fourrage n'est pas haché. La fermentation qui prend place dans un fourrage non haché est moins efficace que celle qui se produit dans un fourrage haché. En effet, la proportion relative d'acide lactique et d'acide acétique est déterminée non seulement par les espèces de bactéries lactiques mais aussi par le type de sucres présents et leur concentration de même que le pH. Un hachage grossier du fourrage ensilé en balle ronde permettrait probablement de pallier à cet inconvénient en favorisant la libération des sucres et leur utilisation par les bactéries. Cependant on a peu de données pour nous aider à prédire dans quelles conditions ce traitement est justifié et efficace.

On a réalisé une expérience le but de déterminer l'influence du stade, de la teneur en matière sèche et de la méthode de récolte sur la fermentation de la fléole des prés. Cette recherche comportait trois objectifs principaux. Le premier était de déterminer si le stade de récolte de la fléole des prés influence sa fermentation de la même façon quel que soit la teneur en matière sèche. Le second était de déterminer dans quelle conditions (stade de récolte et teneur en matière sèche) l'ensilage de fléole des prés non haché en balle ronde est le plus susceptible de présenter des problèmes de fermentation. Le troisième était de déterminer si on peut améliorer la fermentation de la fléole des prés ensilée en balle ronde, en hachant le fourrage grossièrement avec un système de fléaux, de la même façon quels que soient le stade et la teneur en matière sèche, et si ce traitement permet d'obtenir une aussi bonne fermentation qu'avec un fourrage haché court.

Une deuxième pousse de fléole des prés a été récoltée au stade épiaison et au stade floraison, après avoir subi un fanage au champ pour porter sa teneur en matière sèche à 30%, 45% et 60%. À chaque teneur en matière sèche, le fourrage a été récolté de trois façons différentes, soit : 1° fourrage non haché récolté avec une presse à balles rondes et enrubanné avec du film étirable (BR long), 2° fourrage haché grossièrement avec une fourragère à fléaux et récolté avec la même presse (BR moyen) et 3° fourrage haché court avec une fourragère conventionnelle et ensilé dans des sacs semi-vrac en polypropylène tressé d'une capacité de 1000 litres rendus étanches avec une doublure intérieure de polyéthylène (SV court). L'expérience comportait 54 unités expérimentales (2 stades × 3 teneurs en matière sèche × 3 méthodes de récolte × 3 répétitions). Des échantillons ont été prélevés dans chaque unité expérimentale à 5 reprises, soit lors de la confection de l'ensilage (jour 0) de même qu'après 7 jours, 21 jours, 42 jours et 120 jours d'entreposage.

Le suivi du pH à 5 moments différents pendant la période d'entreposage et l'analyse des différents paramètres de la fermentation après 120 jours d'entreposage ont démontré que :

1° Effet du stade et de la matière sèche

L'augmentation de la teneur en matière sèche de la fléole des prés s'est traduite en une acidification moins rapide et une fermentation moins poussée tel qu'indiqué par un pH plus élevé, des teneurs plus faibles en acide lactique, en acide acétique et en azote ammoniacal et une teneur plus élevée en sucres résiduels (45% MS et 60% MS), de même qu'un rapport « acide lactique / acide acétique » plus faible (60% MS) (effet MS) alors que la récolte de la fléole au stade floraison plutôt qu'au stade épiaison a entraîné une acidification moins rapide et une moins bonne fermentation tel qu'indiqué par un pH plus élevé et une teneur comparable en azote ammoniacal et en sucres résiduels malgré une moindre production d'acide lactique et d'acide acétique et un rapport « acide lactique / acide acétique » plus faible (effet stade). De plus, l'effet du stade de récolte a été plus marqué avec l'augmentation de la teneur en matière sèche. En effet, l'acidification de l'ensilage à 30% MS a été un peu moins rapide mais pratiquement aussi poussée au stade floraison qu'au stade épiaison alors que celle de l'ensilage à 45% MS et 60% MS a été nettement moins rapide et moins poussée au stade floraison. De plus l'acidification de l'ensilage à 60% MS n'était pas compétée après 42 jours au stade floraison alors qu'elle l'était au stade épiaison. Les résultats indiquent aussi qu'à 30% MS la fermentation a été aussi efficace au stade floraison qu'au stade épiaison alors qu'à 45% MS et 60% MS elle a été nettement moins efficace au stade floraison, tel qu'indiqué par un rapport « acide lactique / acide acétique » plus faible (45% MS et 60% MS) de même que la présence de plus d'azote ammoniacal et de moins de sucres résiduels (60% MS) (interaction stade × MS).

2° Ensilage non haché en balle ronde (BR long) vs ensilage haché (BR moyen et SV court)

L'ensilage non haché en balle ronde (BR long) a subi une acidification moins rapide et une fermentation moins poussée que l'ensilage haché (BR moyen et SV court) tel qu'indiqué par un pH plus élevé, des teneurs plus faibles en acide lactique et en acide acétique et une teneur plus élevée en sucres résiduels (effet méthode). Cependant l'effet a été beaucoup plus marqué au stade floraison qu'au stade épiaison. En effet, au stade épiaison l'acidification a été presque aussi rapide, le pH final a été presque aussi bas et la teneur en sucres résiduels a été plus élevée que dans le fourrage haché alors qu'au stade floraison l'acidification a été nettement moins rapide, le pH a été beaucoup plus élevé et la teneur en sucres résiduels n'a pas été plus élevée que dans le fourrage haché (interaction méthode × stade). De plus, le comportement de l'ensilage non haché en balle ronde (BR long) a été influencé par la teneur en matière sèche. Même si l'effet sur le pH a été observé quelle que soit la teneur en matière sèche, en cours de fermentation l'écart de pH avec l'ensilage haché s'est manifesté d'autant plus tôt et a été d'autant plus marqué que la teneur en matière sèche a été faible alors qu'après 120 jours il a été semblable quelle que soit la teneur en MS. Finalement, c'est à 30% MS que l'ensilage non haché en balle ronde (BR long) a montré le plus de signes d'une fermentation moins efficace que l'ensilage haché, tel qu'indiqué par un rapport « acide lactique / acide acétique » plus faible et une teneur en azote ammoniacal plus élevée. Ceci semble la conséquence de l'acidification moins rapide d'un fourrage à faible teneur en matière sèche (interaction méthode × MS).

3° Ensilage haché grossièrement en balle ronde (BR moyen) vs ensilage haché court (SV court)

L'ensilage haché grossièrement en balle ronde (BR moyen) a subi une acidification aussi rapide et une fermentation aussi poussée que l'ensilage haché court (SV court), tout en préservant plus de sucres (effet méthode), et ce quel que soit le stade de récolte (interaction méthode × stade). Cependant, le comportement de ces deux types d'ensilage a été un peu influencé par la matière sèche. En effet, même s'il n'y a pas eu de différence de pH, à 30% MS l'ensilage haché

grossièrement en balle ronde (BR moyen) a montré des signes d'une fermentation moins efficace que l'ensilage haché court (SV court), tel qu'indiqué principalement par une teneur plus élevée en azote ammoniacal, et n'a pas permis de préserver plus de sucres que ce dernier alors qu'à 45% MS il a fermenté aussi efficacement et surtout a mieux préservé les sucres. Cela peut être relié au fait qu'à 30% MS il est plus facile d'obtenir une densité élevée avec l'ensilage haché court (interaction méthode × MS).

On en conclut que : 1° La fléole des prés récoltée au stade floraison subit une fermentation moins rapide et moins poussée que celle récoltée au stade épiaison, mais l'effet est moins marqué à 30% MS qu'à 45% MS ou 60% MS; 2° L'ensilage de fléole des prés non haché en balle ronde subit une fermentation moins rapide et moins poussée que l'ensilage haché. De plus, des signes d'une fermentation moins efficace se manifestent de façon plus marquée lorsque la récolte est tardive (floraison) et lorsque la teneur en matière sèche est faible (30%); 3° L'ensilage de fléole des prés haché grossièrement en balle ronde subit une fermentation aussi rapide et aussi poussée que l'ensilage haché court quel que soit le stade de récolte. Cependant des signes d'une fermentation moins efficace se manifestent lorsque la teneur en matière sèche est faible (30%).

Références bibliographiques :

- 1) Amyot, A. 1995. Qualité de conservation de l'ensilage de balles rondes. 2- Influence du traitement mécanique du fourrage sur la fermentation. Rapport final. Projet # R-1105-86-007. Direction de la recherche et du développement, MAPAQ. 83 p.
- 2) Lafreniere, C.; R. Berthiaume; R. Drapeau et A. Amyot. 1998. Comment conserver une bonne récolte sous forme d'ensilage. Colloque sur les plantes fourragères. L'ensilage : du champ a l'animal. Alma (17 novembre) et Sherbrooke (18 novembre): CPVQ; pp. 57-108.
- 3) Leibensperger, R. Y. and R. E. Pitt. 1987. A model of clostridial dominance in silage. *Grass and Forage Science*. 42:297-317.
- 4) Pitt, R. E.; R. E. Muck, and R. Y. Leibensperger. 1985. A quantitative model of the ensilage process in lactate silages. *Grass and Forage Science*. 40:279-303.

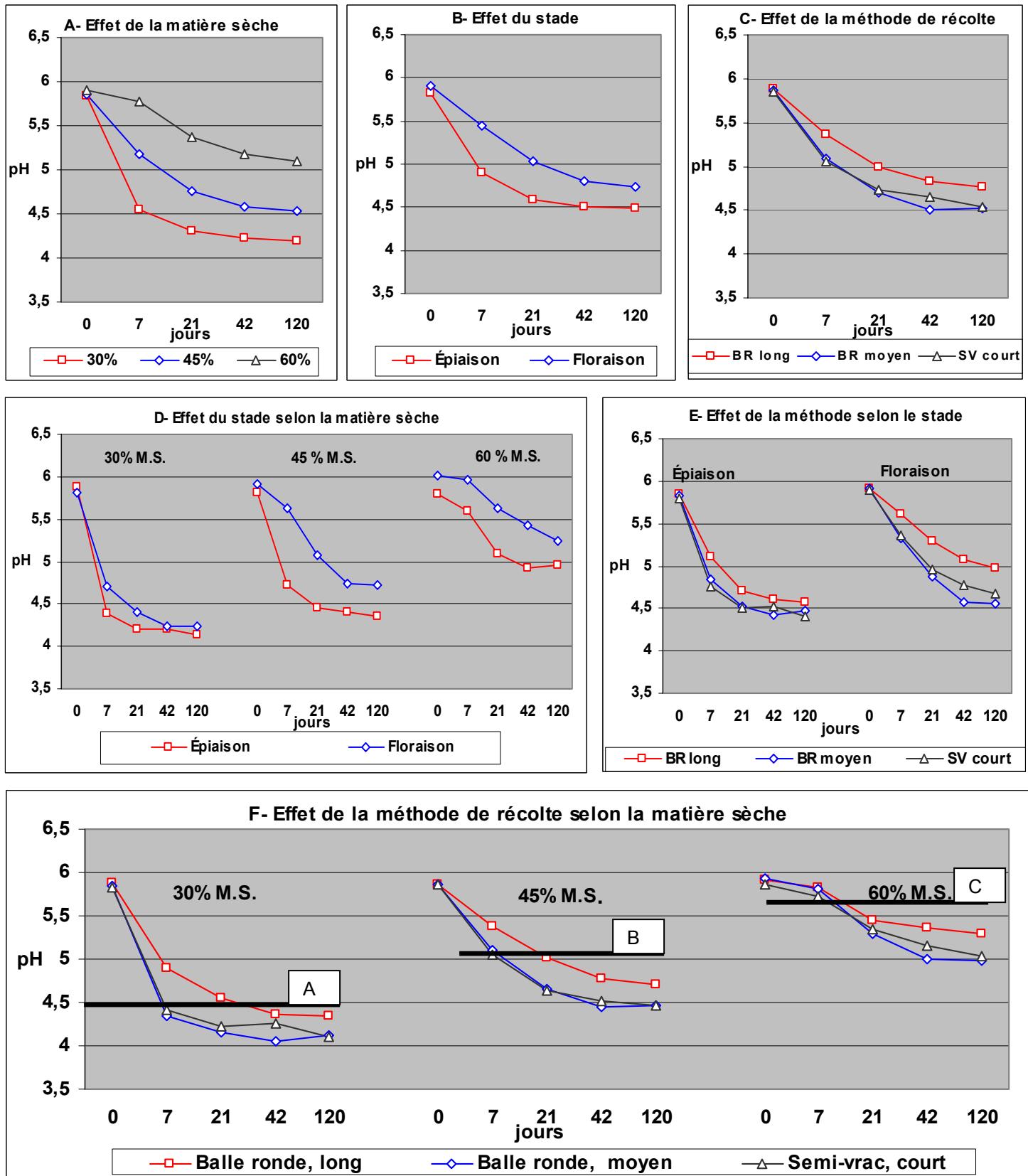


Figure 1. Évolution du pH de l'ensilage de fléole des prés (A - pH de stabilité anaérobie de l'ensilage à 30% M.S. = 4,4; B - pH de stabilité anaérobie de l'ensilage à 45% M.S. = 5,0; C - pH de stabilité anaérobie de l'ensilage à 60% M.S. = 5,6).

Du lait... Sans foin sec!

Denis Boutin¹, Yvan Chouinard², Guy Allard³ et Doris Pellerin²,

¹Agri-Gestion inc., ²Département des sciences animales et ³Département de phytologie,
Université Laval.

Au Québec, les ensilages d'herbe et de maïs occupent une proportion de plus en plus importante dans les rations des vaches laitières, alors que celle du foin diminue. En effet, chez les troupeaux inscrits au PATLQ (Programme d'analyse des troupeaux laitiers du Québec), la proportion d'ensilage par rapport à celle du foin dans la ration est passée de 28% en 1985 (1) à 64% en 2002 (2). Cette augmentation est attribuable à la rapidité et à la facilité de récolte ainsi qu'à la mécanisation de la distribution de l'ensilage comparativement au foin. Ceci permet notamment une diminution marquée de la main-d'œuvre nécessaire à la récolte ainsi qu'à l'alimentation des animaux. Les producteurs n'utilisant que de petites quantités de foin [< 10% base matière sèche (MS)] doivent tout de même maintenir deux systèmes de récolte de leurs fourrages ce qui est difficilement justifiable. Deux options s'offrent à ces producteurs: éliminer cette petite quantité de foin de la ration des vaches laitières ou acheter du foin.

Les objectifs du présent projet étaient de vérifier s'il existait des retombés négatives sur la production et la composition du lait, sur la reproduction et la santé et sur la valeur du lait et les coûts d'alimentation pour les producteurs utilisant des rations composées uniquement d'ensilage comme unique fourrage comparativement à ceux utilisant que de petites quantités de foin.

Production et composition du lait

À partir de la banque de données du PATLQ, quatre groupes de troupeaux ont été formés selon qu'ils utilisaient ou non du foin et selon le mode de récolte de l'ensilage sous forme haché ou sous forme de balles rondes. Nous disposions des moyennes par troupeau pour deux années, soit l'année 2000-2001 (an 1) et l'année 2001-2002 (an 2). Une première comparaison a été faite entre les troupeaux au tout ensilage haché et les troupeaux à l'ensilage haché et foin (1 et 10% base MS) et une deuxième comparaison entre les troupeaux au tout ensilage de balles rondes et les troupeaux à l'ensilage de balles rondes et foin (1 et 10% base MS). Ces comparaisons visaient ainsi à vérifier s'il existait des avantages à ajouter du foin à la ration.

Tableau 1. Production et composition du lait

	TEH ¹	EHF	TBR	BRF
An 1				
Production (kg/vache/an)	8 230	8 679	7 635*	8 158*
Gras (%)	3,79	3,79	3,81*	3,74*
Protéine (%)	3,22	3,26	3,22	3,22
An 2				
Production (kg/vache/an)	8 915	8 773	7 816	8 003
Gras (%)	3,82	3,82	3,84	3,84
Protéine (%)	3,22	3,25	3,20	3,20

* Différence significative à P < 0,05.

¹TEH = Tout Ensilage Haché uniquement, EHF = Ensilage Haché et Foin (entre 1 et 10% base MS), TBR = Tout ensilage de Balles Rondes uniquement, BRF = Ensilage Balles Rondes et Foin (entre 1 et 10% base MS).

Comparées aux fermes ajoutant entre 1 et 10% de foin à l'ensilage haché, les fermes au tout ensilage haché ne présentaient aucune différence significative pour la production laitière et les teneurs en matière grasses et en protéines pour les deux années (Tableau 1). Par contre, pour l'an 1, les fermes ajoutant du foin à l'ensilage de balles rondes (BRF) ont eu une meilleure production laitière et une teneur en matières grasses inférieur à ceux des fermes utilisant le tout ensilage de balles rondes. Ce résultat est d'autant plus surprenant que l'ensilage de balles rondes est constitué de brins de fourrages plus longs. Toutefois, les données révèlent une consommation volontaire de matière sèche (CVMS) et un poids plus élevés pour les vaches des troupeaux recevant du foin pour l'an 1 de l'étude, ce qui expliquerait en partie l'avantage des troupeaux utilisant du foin avec l'ensilage de balles rondes sur les troupeaux au tout ensilage de balles rondes.

Reproduction et santé

Pour l'an 1, l'utilisation du tout ensilage, qu'il soit servi sous forme hachée ou sous forme de balles rondes, n'influencerait pas négativement le nombre de saillies par vache ni le comptage des cellules somatiques (CCS) (Tableau 2). De plus, pour l'an 2, les troupeaux au tout ensilage haché ont eu un CCS inférieur à celui des troupeaux ajoutant du foin. Aussi, le taux de réforme des troupeaux au tout ensilage haché était inférieur à celui des troupeaux à l'ensilage haché et foin. Par ailleurs, aucune différence pour le taux de réforme n'a été observée entre les fermes utilisant l'ensilage de balles rondes uniquement et celles ajoutant du foin à l'ensilage de balles rondes. Toutefois, pour la variable taux de réforme, nous ne disposions que des données de l'an 2 et il nous a donc été impossible de valider ces conclusions avec une deuxième année de données. Les résultats indiquent que les troupeaux au tout ensilage haché n'ont pas un taux de réforme supérieur à celui des fermes qui ajoutent du foin à l'ensilage haché.

Tableau 2. Performances de reproduction et santé du pis

	TEH ¹	EHF	TBR	BRF
An 1				
Saillies par vache	1,79	1,86	1,78	1,83
CCS ² (000 c.s./ml)	258	270	256	252
An 2				
Saillies par vache	1,85	1,93	1,85	1,78
CCS (000 c.s./ml)	216*	274*	258	257
Réforme (%)	25*	32*	32	29

* Différence significative à $P < 0,05$.

¹TEH = Tout Ensilage Haché uniquement, EHF = Ensilage Haché et Foin (entre 1 et 10% base MS), TBR = Tout ensilage de Balles Rondes uniquement, BRF = Ensilage Balles Rondes et Foin (entre 1 et 10% base MS).

²CCS = Comptage des cellules somatiques.

Valeur du lait et coût d'alimentation

Comme nous l'avons vu précédemment, les troupeaux à l'ensilage de balles rondes et foin ont une production laitière supérieur à celle des troupeaux au tout ensilage de balles rondes pour l'an 1 de l'étude. Ce résultat explique que la valeur du lait soit significativement plus élevée la première année pour ces troupeaux (Tableau 3). Par contre, pour les deux années, la valeur du lait moins les coûts d'alimentation n'est pas supérieure, peu importe les comparaisons. Pour conserver l'avantage que procurerait l'ajout de foin à l'ensilage de balles rondes, le coût d'alimentation devrait être moindre, ce qui n'est pas le cas. De plus, le coût d'alimentation à

l'hectolitre est significativement inférieur une année sur deux pour les troupeaux au tout ensilage haché, lorsque comparés aux troupeaux recevant également du foin.

Tableau 3. Valeur du lait et coût d'alimentation

	TEH ¹	EHF	TBR	BRF
An 1				
Valeur du lait (\$/vache/an)	4 764	5 010	4 329*	4 551*
Valeur du lait moins coût d'alimentation (\$/vache/an)	3 566	3 778	3 201	3 343
Coût d'alimentation à l'hectolitre (\$/hl)	12,95	13,72	14,68	14,84
An 2				
Valeur du lait (\$/vache/an)	5 103	5 028	4 433	4 501
Valeur du lait moins coût d'alimentation (\$/vache/an)	3 883	3 755	3 282	3 307
Coût d'alimentation à l'hectolitre (\$/hl)	12,34*	14,10*	14,71	15,08

* Différence significative à P < 0,05

¹TEH = Tout Ensilage Haché uniquement, EHF = Ensilage Haché et Foin (entre 1 et 10% base MS), TBR = Tout ensilage de Balles Rondes uniquement, BRF=Ensilage Balles Rondes et Foin (entre 1 et 10% base MS).

Évolution des troupeaux dans le temps

Parmi les troupeaux étudiés, entre l'an 1 et l'an 2, des changements ont parfois eu lieu quant à la quantité de foin servie aux vaches en lactation. Par exemple, un troupeau au tout ensilage pouvait devenir un troupeau à l'ensilage et foin (entre 1 et 10% base MS) et vice versa. Ces troupeaux sujets à changements ont été étudiés afin de vérifier s'ils évoluaient différemment. Autrement dit, le fait de quitter le tout ensilage en recommençant à utiliser du foin a t'il un impact positif ou négatif sur les différents résultats? Les données obtenues n'indiquent aucun avantage à ajouter du foin à une ration tout ensilage comparé aux troupeaux demeurés au tout ensilage pour ces deux années, c'est-à-dire qu'ils évoluent dans le même sens et au même rythme. De même, les troupeaux utilisant l'ensilage haché et le foin et les troupeaux utilisant l'ensilage de balles rondes et le foin qui sont passés au tout ensilage haché et au tout ensilage de balles rondes respectivement, n'y ont trouvé aucun avantage ou désavantage. Toutefois, nous pouvons penser que les propriétaires de ces derniers troupeaux se sont libérés d'une tâche, soit de la distribution du foin aux vaches en lactation.

Rencontres de groupe

Nous avons rencontré des producteurs et des intervenants qui utilisaient le tout ensilage haché et le tout ensilage de balles rondes. Ces rencontres nous ont révélé des caractéristiques introuvables à partir de la banque de données du PATLQ. Les six producteurs rencontrés qui utilisaient le tout ensilage haché nous ont dit n'avoir observé aucun impact négatif sur la production laitière et ses composantes, ni sur la reproduction et la santé de leurs troupeaux. Cependant certains donnaient du foin ou de l'ensilage de balles rondes demi sec en début de lactation seulement. De plus, ces producteurs ajoutaient du foin pour les sujets de remplacement, malgré le fait que l'introduction de l'ensilage pouvait se faire dans certains cas aussi tôt qu'à 5 jours d'âge.

Nous avons également rencontré des producteurs utilisant le tout ensilage de balles rondes. Contrairement au tout ensilage haché, les propriétaires des troupeaux au tout ensilage de balles rondes n'ajoutaient pas d'agent tampon aux rations. Ces derniers nous ont par ailleurs dit avoir observé une augmentation de la production de lait depuis l'abandon du foin. De plus, les rencontres de groupe nous ont permis de constater que pour certains troupeaux, l'utilisation du tout ensilage date de plusieurs années puisque certains producteurs le pratiquent depuis le début

des années 90. La seule mise en garde des producteurs utilisant le tout ensilage haché ou le tout ensilage de balles rondes concernait le risque plus grand d'embonpoint chez les vaches taries.

La majorité des conseillers rencontrés quant à eux ne recommandaient pas le tout ensilage, arguant que le foin est une assurance peu dispendieuse et que l'achat de foin pourrait être une option intéressante pour éviter l'entretien ou le renouvellement de machinerie. Néanmoins, voici quelques points qu'ils suggèrent de surveiller pour les producteurs désirant faire le saut au tout ensilage. Premièrement, le tout ensilage de balles rondes est réalisable facilement puisqu'il est constitué d'une fibre plus longue et qu'il est conservé sous forme plus sèche. Pour les troupeaux au tout ensilage haché, la distribution des particules de fourrages ou de la RTM doit être vérifiée. Pour les sujets de remplacement, il est important de porter une attention particulière aux excès de poids et de favoriser des ensilages plus secs plutôt qu'humides pour augmenter l'ingestion par les génisses.

Conclusion

Les résultats de cette recherche démontrent que l'ajout de petites quantités de foin à l'ensilage haché ou à l'ensilage de balles rondes n'améliore pas la production laitière et la santé du troupeau. De plus, les producteurs rencontrés utilisant le tout ensilage sont satisfaits de leurs résultats.

Remerciements

Ce projet de recherche a été financé par l'action concertée FCAR-NOVALAIT-MAPAQ.

Références bibliographiques

- 1) Brisson, J. 2003. La conservation des ensilages Marge de manœuvre limitée. Le producteur de lait québécois. Vol. 23, no 7: 13-16.
- 2) PATLQ. 2003. Rapport de production 2002 du PATLQ. Le producteur de lait québécois. Vol. 23, numéros spécial : 86.

Effet de différentes espèces de plantes fourragères sur la composition du lait de chèvre, incluant les acides gras oméga-3 et les acides linoléiques conjugués.

Audrey Doyon¹, P. Yvan Chouinard¹, Gaëtan Tremblay², Dany Cinq-Mars³ et Jocelyne Delisle¹

¹Département des sciences animales, Université Laval, Québec

²Agriculture et agroalimentaire Canada, Québec

³Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec

Introduction

Les acides gras oméga-3 et les acides linoléiques conjugués suscitent présentement beaucoup d'intérêts puisqu'on leur attribue de nombreux effets bénéfiques sur la santé humaine. En effet, des travaux ont montré que la consommation d'acides gras oméga-3 était associée à une baisse des risques de maladies cardiovasculaires (Connor 2000). Les acides linoléiques conjugués auraient quant à eux la propriété d'inhiber le développement de certains cancers (Ip et al., 1999).

Les spécialistes en nutrition préconisent donc une augmentation de la consommation des acides gras oméga-3 et des acides linoléiques conjugués. Ces acides gras sont naturellement présents dans les matières grasses du lait, mais en faibles proportions d'où l'utilisation de stratégies alimentaires particulières visant à les augmenter. En effet, des travaux réalisés antérieurement ont montré qu'il est possible de modifier les teneurs en acides gras oméga-3 et en acides linoléiques conjugués dans les matières grasses du lait via l'alimentation des ruminants (Chouinard et al., 2001; Gonthier et al., 2005).

La Figure 1 montre la relation existant entre l'acide α -linolénique (oméga-3) d'origine alimentaire et les acides gras conjugués retrouvé dans les matières grasses laitières chez le ruminant. On remarque qu'une partie de l'acide α -linolénique de la ration peut passer directement dans la circulation sanguine et être incorporée dans les triacylglycérols du lait. Les acides gras conjugués quant à eux ne font pas partie de l'alimentation normale des ruminants. La présence de ces molécules dans le lait de ces animaux s'explique plutôt par l'existence, dans le rumen, de bactéries capables d'effectuer l'isomérisation des acides gras polyinsaturés du régime alimentaire (Figure 1).

L'acide α -linolénique devient ainsi l'un des précurseurs des acides gras conjugués via le processus de biohydrogénéation. L'acide linolénique conjugué est le premier intermédiaire de ce sentier métabolique. Toutefois, une certaine proportion de cet acide gras peut échapper à l'action des micro-organismes et quitter le rumen pour être absorbée par l'animal puis incorporée dans les matières grasses du lait. Le processus se poursuit dans le rumen avec la production de l'acide vaccénique *trans* puis de l'acide stéarique.

Les acides gras conjugués sont également produits dans la glande mammaire grâce à l'action de la Δ -9 désaturase (Figure 1). Cette enzyme agit généralement sur l'acide stéarique (C18:0) en ajoutant une double liaison *cis* en position Δ -9 pour former l'acide oléique (C18:1 *cis*-9), l'un des acides gras les plus importants en quantité dans les matières grasses du lait. L'enzyme Δ -9 désaturase est également capable de catalyser la conversion de l'acide vaccénique *trans*, produit dans le rumen, en acide linoléique conjugué. On retrouve ainsi l'acide linoléique conjugué dans le lait sans qu'il y ait eu production de cet acide gras dans le rumen.

Les concentrations en acides gras oméga-3 et en acides linoléiques conjugués dans les matières grasses laitières sont donc influencées par les quantités d'acide α -linolénique retrouvées

dans les rations servies aux ruminants. Les fourrages sont une source naturelle de cet acide gras oméga-3. Des travaux réalisés à l'Université Laval, en collaboration avec Agriculture et Agroalimentaire Canada, ont permis d'identifier en parcelles expérimentales des espèces de plantes fourragères ayant des teneurs élevées (trèfle blanc, 16,5 mg/g MS et ray-grass annuel, 20,6 mg/g MS) ou faibles (luzerne, 6,0 mg/g MS et fléole, 7,0 mg/g MS) en acide α -linolénique (Boufaïed et al. 2003).

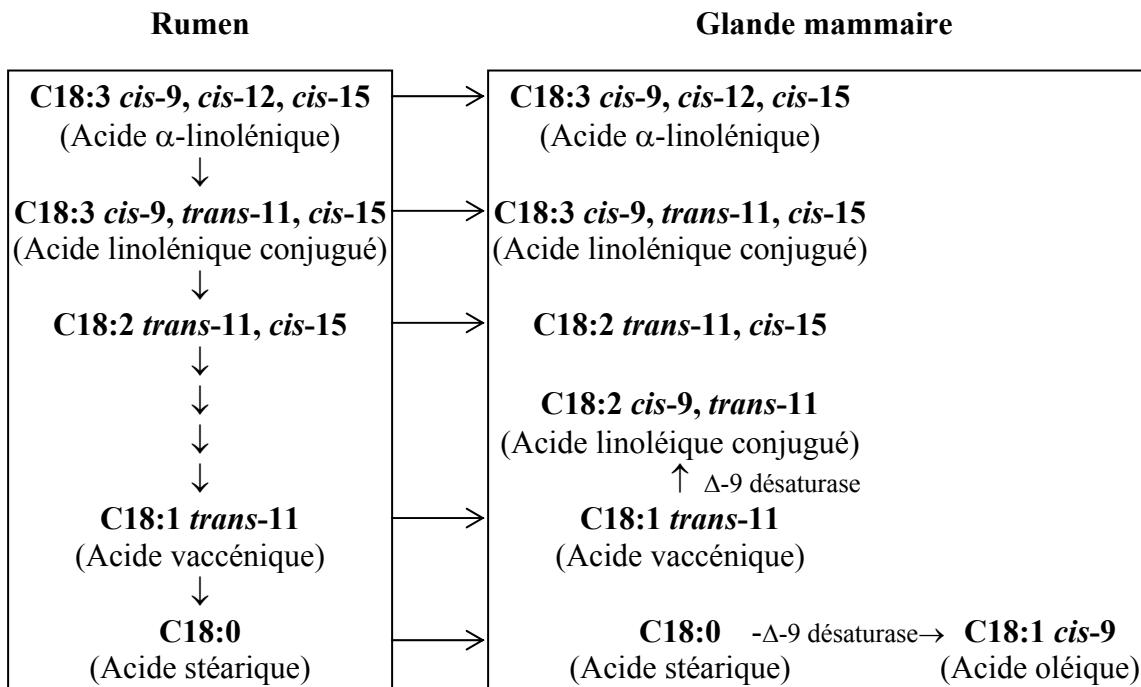


Figure 1. Métabolisme de l'acide α -linolénique et production de différents isomères d'acides gras conjugués chez le ruminant.

L'objectif de la présente étude était donc de déterminer les quantités d'acides gras oméga-3 et d'acides gras conjugués retrouvées dans le lait des chèvres alimentées avec différentes espèces de plantes fourragères (ray-grass, fléole des prés, trèfle blanc et luzerne). L'effet de ces fourrages sur les performances laitières et la teneur des constituants majeurs du lait a aussi été évalué.

Matériel et méthodes

Douze chèvres multipares ayant complété 150 jours de lactation ont été distribuées selon un dispositif en carrés latins multiples. Les trois carrés étaient constitués respectivement de chèvres Saanen, Toggenbourg et Alpine. Quatre plantes fourragères (ray-grass annuel, fléole des prés, trèfle blanc et luzerne) ont été récoltées aux stades début épiaison pour les graminées et à 10% en fleurs pour les légumineuses. Elles ont été conservées sous forme d'ensilages préfanés. Les différents ensilages ont été hachés et servis aux chèvres à volonté pour 4 périodes de 3 semaines, totalisant 12 semaines d'expérimentation. Les rations étaient complémentées avec 180 g/j de concentrés (Tableau 1). Les 17 premiers jours ont permis aux chèvres de s'adapter aux régimes expérimentaux. La collecte des données et des échantillons s'est ensuite effectuée au cours des 4 derniers jours de chaque période. Les chèvres ont été pesées pendant 3 jours consécutifs. La consommation de fourrages a été déterminée et des échantillons d'aliments ont été prélevés

pendant 4 jours consécutifs. La production laitière a été mesurée au cours de 6 traites successives et des échantillons de lait ont été prélevés en quantité proportionnelle à la traite.

Tableau 1. Composition du concentré expérimental.

Ingédient	%, base matière sèche
Orge roulée	73
Tourteau de soya	20
Mélasse	2
Mélange minéraux et vitamines ¹	5

¹Calcium : 10%, Phosphore : 5%, Magnésium : 2%.

Résultats

La concentration en matière sèche des ensilages était en moyenne de 44,3% et elle variait entre 39,0% pour la fléole et 54,4% pour le ray-grass (Tableau 2). La fléole contenait 14,6% de protéine brute et le ray-grass, le trèfle blanc et la luzerne en contenaient en moyenne 21,3%. Les fourrages contenaient en moyenne 28,0% de fibre ADF; cette concentration variait entre 23,9% pour le trèfle blanc et 33,8% pour la fléole. Pour la fibre NDF, le trèfle blanc en contenait le moins avec 29,1%, la luzerne et le ray-grass avaient des valeurs intermédiaires avec en moyenne 41,0% et la fléole en contenait le plus avec 55,8%. Les concentrations en azote soluble, azote ammoniacal, acide lactique et le pH indiquaient que les ensilages étaient tous de bonne qualité (Tableau 2).

Tableau 2. Composition et caractéristiques des 4 types d'ensilage.

Paramètre	Traitement				SEM	P (trt)
	Fléole des prés	Ray-grass	Trèfle blanc	Luzerne		
Matière sèche, %	39,0 ^b	54,4 ^a	42,2 ^b	41,6 ^b	1,82	<0,01
pH	5,23 ^a	5,25 ^a	4,70 ^b	4,63 ^b	0,11	<0,01
% base matière sèche						
Protéine brute	14,6 ^b	20,4 ^a	21,5 ^a	21,9 ^a	0,50	<0,01
ADF	33,8 ^a	25,0 ^c	23,9 ^c	29,3 ^b	0,58	<0,01
NDF	55,8 ^a	44,7 ^b	29,1 ^d	37,3 ^c	0,67	<0,01
ADL	3,7 ^b	2,9 ^c	3,8 ^b	5,5 ^a	0,19	<0,01
% de l'azote total						
Azote soluble	50,4 ^a	37,0 ^b	39,5 ^b	44,5 ^{ab}	2,57	0,02
Azote ammoniacal	6,2 ^a	3,3 ^c	4,8 ^b	3,1 ^c	0,36	<0,01
Acide lactique	1,3 ^c	2,2 ^{bc}	3,1 ^{ab}	3,5 ^{ab}	0,31	<0,01

^{a, b, c, d}Pour chaque paramètre, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas différentes au seuil P<0,05.

Le profil en acides gras des différents fourrages est présenté au Tableau 3. Les concentrations en acide α -linolénique étaient plus élevées pour le ray-grass et plus faibles pour la fléole et la luzerne, ce qui confirme les résultats obtenus au cours de nos travaux antérieurs (Boufaïed et al. 2003). La concentration en acide α -linolénique a cependant été plus faible dans le trèfle blanc

récolté au champ pour la présente étude comparativement aux concentrations observées précédemment en parcelles expérimentales (Boufaïed et al., 2003).

Tableau 3. Profil en acides des différents ensilages.

Acide gras	Traitement			
	Fléole des prés	Ray-grass	Trèfle blanc	Luzerne
	mg/g matière sèche			
C16:0	3,35	4,76	4,44	4,64
C16:1 <i>cis</i> -9 (ω -7)	0,35	0,60	0,48	0,42
C18:0	0,33	0,43	0,70	0,65
C18:1 <i>cis</i> -9 (ω -9)	0,67	0,58	1,03	0,75
C18:2 <i>cis</i> -9, <i>cis</i> -12 (ω -6)	4,27	4,57	5,89	5,56
C18:3 <i>cis</i> -9, <i>cis</i> -12, <i>cis</i> -15 (ω -3)	8,84	18,64	9,78	7,81

Le poids corporel ainsi que les variations de poids mesurées au cours de la période de 21 jours n'ont pas été influencés par le type de fourrage constituant la ration (Tableau 4). La consommation de fourrage exprimée en kilogramme par jour a été plus élevée pour la luzerne et le trèfle blanc comparativement au ray-grass et à la fléole (Tableau 4). La production laitière réelle ou corrigée pour la concentration en matières grasses et en protéine a été supérieure lorsque les chèvres recevaient la luzerne, le ray-grass et le trèfle blanc, comparativement à la fléole (Tableau 4).

Tableau 4. Poids corporel, prise alimentaire et production laitière chez des chèvres recevant différents types de fourrages.

Paramètre	Traitement				SEM	P (trt)
	Fléole des prés	Ray-grass	Trèfle blanc	Luzerne		
Poids corporel						
Réel, kg	61,2 ^b	62,9 ^a	62,7 ^{ab}	62,7 ^{ab}	0,55	0,15
Variation, g/j	123 ^a	102 ^a	129 ^a	55 ^a	23	0,15
Fourrage ingéré						
kg matière sèche/j	1,65 ^b	1,91 ^b	2,20 ^a	2,27 ^a	0,09	<0,01
% poids corporel	2,68 ^c	3,09 ^b	3,52 ^b	3,63 ^a	0,13	<0,01
Production laitière						
Réelle, kg/j	2,26 ^b	2,82 ^a	2,73 ^a	2,87 ^a	0,06	<0,01
Corrigée ¹ , kg/j	2,33 ^b	2,82 ^a	2,73 ^a	2,87 ^a	0,07	<0,01

¹Production laitière corrigée = lait (kg) \times [203,8 + [83,6 \times matières grasses (%)] + [62,9 \times protéine (%)] / 666].

^{a, b, c}Pour chaque paramètre, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas différentes au seuil P<0,05.

La concentration en matières grasses du lait a augmenté lorsque les chèvres recevaient la fléole, mais cette hausse coïncidait avec une diminution de la production laitière, ce qui explique que l'on n'observe aucune différence significative entre les traitements pour la production de matières

grasses (Tableau 5). Les concentrations en protéines brutes et la production quotidienne de protéines brutes ont été inférieures quand les chèvres recevaient de la fléole (Tableau 5).

Tableau 5. Concentration et production des constituants du lait chez des chèvres recevant différents types d'ensilages.

Constituant	Traitement				SEM	P (trt)
	Fléole des prés	Ray-grass	Trèfle blanc	Luzerne		
Solides totaux, %	11,58 ^a	11,24 ^b	11,12 ^b	11,1 ^b	0,08	<0,01
g/jour	261 ^b	316 ^a	304 ^a	319 ^a	7,45	<0,01
Matières grasses, %	3,58 ^a	3,05 ^b	3,10 ^b	3,05 ^b	0,06	<0,01
g/jour	81 ^a	86 ^a	85 ^a	88 ^a	2,67	0,29
Protéines brutes, %	3,12 ^b	3,25 ^a	3,20 ^a	3,25 ^a	0,03	<0,01
g/jour	70 ^b	91 ^a	87 ^a	93 ^a	2,16	<0,01
Protéine vraie, %	2,89 ^b	2,99 ^a	2,91 ^{ab}	2,94 ^{ab}	0,02	<0,05
Caséine, %	2,39 ^a	2,44 ^a	2,40 ^a	2,40 ^a	0,02	0,42
Protéines sériques, %	0,50 ^b	0,55 ^a	0,51 ^b	0,54 ^a	0,01	<0,01
N non protéique, %	0,036 ^d	0,041 ^c	0,045 ^b	0,049 ^a	0,004	<0,01
N non caséique, %	0,114 ^c	0,127 ^b	0,125 ^b	0,133 ^a	0,09	<0,01
Caséine, % protéine vraie	82,6 ^a	81,5 ^b	82,3 ^{ab}	81,4 ^b	0,31	<0,05
Protéine vraie, % protéines brutes	92,5 ^a	92,0 ^b	91,0 ^c	90,5 ^d	0,12	<0,01
Caséine:protéines sériques	4,84 ^a	4,54 ^{ab}	4,79 ^{ab}	4,49 ^b	0,10	<0,05

^{a, b, c, d}Pour chaque constituant, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas différentes au seuil P<0,05.

La concentration en protéine vraie du lait a été supérieure lorsque les chèvres étaient alimentées avec le ray-grass, intermédiaire lorsqu'elles recevaient la luzerne et le trèfle blanc, et moindre lorsqu'elles étaient nourries avec de la fléole (Tableau 5). La concentration du lait en caséine n'a pas été influencée par les traitements, alors que la concentration en protéines sériques fut plus élevée lorsque les chèvres recevaient du ray-grass et la luzerne plutôt que du trèfle blanc et de la fléole (Tableau 5). Les concentrations en azote non protéique et en azote non caséique du lait ont été supérieures lorsque les chèvres étaient alimentées avec la luzerne, suivi du trèfle blanc, du ray-grass et de la fléole (Tableau 5). La concentration en caséine exprimée en proportion de la protéine vraie fut supérieure lorsqu'elles recevaient de la fléole, suivi du trèfle blanc, du ray-grass et de la luzerne (Tableau 5). La concentration en protéine vraie exprimée en proportion de la protéine brute a été supérieure lorsque l'animal recevait de la fléole, suivie du ray-grass, du trèfle et de la luzerne (Tableau 5). Finalement, le rapport caséine:protéines sériques du lait a été plus élevé lorsque les chèvres étaient alimentées avec de la fléole plutôt que de la luzerne.

Comparativement aux graminées (fléole des prés et ray-grass), l'alimentation à base de fourrages de légumineuses (trèfle blanc et luzerne) a entraîné une augmentation des concentrations en C10:0, C12:0, C14:0, C14:1 et C16:0 et une diminution des concentrations en C18:0 et C18:1 *cis*-9 dans les matières grasses du lait (Tableau 6). Ces changements du profil en acides gras nous indiquent que les fourrages de légumineuses ont favorisé la synthèse *de novo* des acides gras à courte et moyenne chaînes dans la glande mammaire. Les fourrages de graminées ont au contraire favorisé le prélèvement des acides gras à longue chaîne préformés de la circulation sanguine. La concentration en C18:2 ω -6 du gras du lait a été inférieure lorsque les

chèvres recevaient le ray-grass plutôt que les trois autres ensilages. La concentration en C18:3 ω -3 des matières grasses du lait a été supérieure lorsque la chèvre recevait la luzerne, intermédiaire pour le ray-grass et le trèfle blanc, et inférieure pour la fléole.

Tableau 6. Profil en acides gras du lait chez des chèvres recevant différents types de fourrages.

Acide gras	Traitement				SEM	P (trt)
	Fléole des prés	Ray-grass	Trèfle blanc	Luzerne		
C4:0	4,27 ^b	4,46 ^a	4,30 ^b	4,33 ^{ab}	0,05	0,05
C6:0	2,86 ^b	2,96 ^a	3,00 ^a	3,03 ^a	0,03	<0,01
C8:0	2,82 ^b	2,99 ^a	3,06 ^a	3,06 ^a	0,04	<0,01
C10:0	9,34 ^c	9,75 ^b	10,87 ^a	10,71 ^a	0,13	<0,01
C12:0	4,01 ^c	4,48 ^b	5,21 ^a	5,06 ^a	0,07	<0,01
C14:0	11,20 ^b	11,29 ^b	11,78 ^a	11,78 ^a	0,13	<0,01
C14:1 <i>cis</i> -9	0,14 ^b	0,15 ^b	0,17 ^a	0,17 ^a	0,01	<0,01
C15:0	1,24 ^b	1,19 ^b	1,24 ^b	1,40 ^a	0,04	<0,01
C16:0	29,10 ^b	27,00 ^b	33,45 ^a	32,72 ^a	0,39	<0,01
C16:1 <i>cis</i> -9	0,40 ^a	0,38 ^a	0,45 ^a	0,46 ^a	0,03	0,17
C17:0	0,65 ^{bc}	0,64 ^c	0,68 ^a	0,71 ^a	0,01	<0,01
C18:0	10,17 ^a	10,24 ^a	6,53 ^b	6,78 ^b	0,24	<0,01
C18:1 <i>trans</i> -6 à 9	0,17 ^b	0,21 ^a	0,14 ^c	0,16 ^{bc}	0,01	<0,01
C18:1 <i>trans</i> -10	0,08 ^b	0,10 ^a	0,07 ^b	0,10 ^a	0,004	<0,01
C18:1 <i>trans</i> -11	0,71 ^b	0,88 ^a	0,53 ^c	0,73 ^b	0,03	<0,01
C18:1 <i>trans</i> -12	0,16 ^c	0,29 ^a	0,18 ^c	0,22 ^b	0,01	<0,01
C18:1 <i>cis</i> -9	19,54 ^a	18,87 ^a	14,74 ^b	14,59 ^b	0,32	<0,01
C18:1 <i>cis</i> -11	0,28 ^a	0,24 ^b	0,26 ^{ab}	0,23 ^b	0,01	<0,01
C18:1 <i>cis</i> -12	0,10 ^c	0,12 ^{bc}	0,14 ^{ab}	0,14 ^a	0,01	<0,01
C18:1 <i>cis</i> -13	0,03 ^b	0,06 ^a	0,04 ^b	0,04 ^{ab}	0,004	<0,01
C18:1 <i>cis</i> -15	0,33 ^a	0,27 ^a	0,24 ^a	0,21 ^a	0,05	0,29
C18:2 <i>cis</i> -9, <i>cis</i> -12 (ω -6)	2,01 ^a	1,84 ^b	2,00 ^a	2,12 ^a	0,05	<0,01
C18:3 <i>cis</i> -9, <i>cis</i> -12, <i>cis</i> -15 (ω -3)	0,91 ^c	1,59 ^b	1,60 ^b	1,68 ^a	0,03	<0,01
C18:2 <i>cis</i> -9, <i>trans</i> -11	0,36 ^b	0,47 ^a	0,33 ^b	0,45 ^a	0,02	<0,01
C18:3 <i>cis</i> -9, <i>trans</i> -11, <i>cis</i> -15	0,009 ^b	0,048 ^a	0,013 ^b	0,012 ^b	0,003	<0,01

^{a, b, c}Pour chaque acide gras, les valeurs suivies d'une même lettre ne sont pas différentes au seuil P<0,05.

Le contenu de la matière grasse du lait en acides gras intermédiaires (C18:1 *trans*-11, C18:2 *cis*-9, *trans*-11 et C18:3 *cis*-9, *trans*-11, *cis*-15) issus du processus de biohydrogénéation ruminale des acides gras insaturés a également été influencée par l'espèce de plantes fourragères servie à la chèvre. Les concentrations en acide vaccénique (C18:1 *trans*-11) dans le gras du lait ont été les plus faibles avec le trèfle blanc, intermédiaires avec la luzerne et la fléole des prés, et supérieures lorsque le ray-grass était servi. Les concentrations en acide linoléique conjugué (C18:2 *cis*-9, *trans*-11) du gras du lait ont été plus élevées lorsque l'animal recevait la luzerne et le ray-grass comparativement à la fléole et au trèfle blanc. La concentration en acide linolénique conjugué

(C18:2 *cis*-9, *trans*-11, *cis*-15) a été supérieure dans la matière grasse du lait lorsque les chèvres recevaient le ray-grass comparativement aux trois autres ensilages.

L'ensilage de luzerne, qui contenait les plus faibles concentrations en acides gras oméga-3 parmi les quatre ensilages étudiés, a permis d'obtenir les plus fortes proportions de C18:3 ω -3 dans les matières grasses du lait. Les acides gras oméga-3, bien que peu abondants dans la luzerne, semblent avoir été efficacement protégés contre l'action des microorganismes du rumen. Le ray-grass, bien qu'il contenait la plus forte proportion de C18:3 ω -3, a permis d'obtenir une concentration en C18:3 dans le gras du lait légèrement inférieure à celle observée lorsque les animaux recevaient la luzerne. Les acides gras polyinsaturés du ray-grass auraient donc été exposés dans une plus forte proportion à l'action des microorganismes du rumen. Cette hypothèse est supportée par la présence dans le lait de plus grandes concentrations d'intermédiaires du processus de biohydrogénéation (C18:1 *trans*-11, C18:2 *cis*-9, *trans*-11 et C18:3 *cis*-9, *trans*-11, *cis*-15) lorsque les chèvres étaient alimentées avec l'ensilage de ray-grass.

Conclusion

Ces travaux ont permis de vérifier l'effet de différentes espèces de plantes fourragères (ray-grass annuel, fléole des prés, trèfle blanc et luzerne) sur la concentration en acides gras oméga-3 et en acide linoléique conjugué dans les matières grasses du lait chez la chèvre. Des quatre espèces fourragères étudiées, le ray-grass et la luzerne seraient celles qui permettent une augmentation plus importante de la concentration en acide linoléique conjugué alors que la luzerne a permis d'obtenir une plus grande concentration des acides gras oméga-3 dans la matière grasse du lait, suivie de près par le ray-grass et le trèfle blanc.

Ces résultats nous permettent aujourd'hui d'affirmer qu'il est possible de modifier le profil en acides gras du lait de chèvre en servant à l'animal différentes espèces de plantes fourragères. Des expériences additionnelles pourraient permettre d'identifier la combinaison fourrage – concentré optimale pour la production d'un lait de chèvre enrichi en acides gras spécifiques. L'utilisation de la graine de lin en combinaison avec le ray-grass et la luzerne, par exemple, pourrait augmenter de façon plus importante la concentration en acides gras oméga-3 et en acide linoléique conjugué dans les matières grasses du lait.

Liste des ouvrages cités

- Boufaïed, H., P.Y. Chouinard, G.F. Tremblay, H.V. Petit, R. Michaud et G. Bélanger. 2003. Fatty acids in forages. I. Factors affecting concentrations. *Can. J. Anim. Sci.* 83:501-511.
- Chouinard, P.Y., L. Corneau, W.R. Butler, Y. Chilliard, J.K. Drackley et D.E. Bauman. 2001. Effect of dietary lipid source on conjugated linoleic acid concentrations in milk fat. *J. Dairy Sci.* 84:680-690.
- Connor, W.E. 2000. Importance of n-3 fatty acids in health and disease. *Am. J. Clin. Nutr.* 71(suppl.):171S-175S.
- Gonthier, C., A.F. Mustafa, D.R. Ouellet, P.Y. Chouinard, R. Berthiaume et H.V. Petit. 2005. Feeding micronized and extruded flaxseed to dairy cows: effects on blood parameters and milk fatty acid composition. *J. Dairy Sci.* 88:748-756.
- Ip, C., S. Banni, E. Angioni, G. Carta, J. McGinley, H.J. Thompson, D. Barbano et D.E. Bauman. 1999. Conjugated linoleic acid-enriched butter fat alters mammary gland morphogenesis and reduces cancer risk in rats. *J. Nutr.* 129:2135-2142.

La fertilisation en chlore améliore la différence alimentaire cations - anions de la fléole des prés servie à la vache tarie.

Sophie Pelletier^{1,2}, Gaëtan Tremblay*², Gilles Bélanger², Philippe Seguin³, Raynald Drapeau², Réal Michaud², Annie Brégard² et Guy Allard².

¹Département de phytologie, Université Laval, ²Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Agriculture et Agroalimentaire Canada, et ³Département de sciences végétales, Campus Macdonald, Université McGill. tremblaygf@agr.gc.ca

Introduction

Aux États-Unis, en 1996 (NAHMS, 1996), l'hypocalcémie affectait 6% des vaches laitières à un niveau clinique (symptômes apparents de fièvre vitulaire) alors qu'elle affectait 66% des vaches laitières à un niveau sous-clinique (symptômes non apparents). En considérant que la fièvre vitulaire atteint 6% des vaches du Québec, soit environ 22 800 vaches (6% de 7710 troupeaux \times 49,3 vaches par troupeau) et qu'elle entraîne des coûts de 500\$ par vache en traitement et en perte de productivité, des dépenses d'environ 11,4 millions de dollars sont donc encourues annuellement au Québec due à cette maladie. La fièvre vitulaire survient lorsque l'absorption intestinale du Ca et la mobilisation du Ca des os ne suffisent plus à combler la demande en Ca de la lactation. Afin de prévenir l'hypocalcémie, les producteurs laitiers offrent aux vaches taries une ration dont la différence alimentaire cations - anions (**DACA**) est faible. La DACA est surtout calculée en utilisant une ou l'autre de ces deux équations :

DACA courte (mEq / kg MS) = $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - (\text{Cl}^- + \text{S}^{2-})$, (Ender et al., 1971);

DACA longue (mEq / kg MS) = $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + 0,15 \text{ Ca}^{+2} + 0,15 \text{ Mg}^{+2}) - (\text{Cl}^- + 0,6 \text{ S}^{-2} + 0,5 \text{ P}^{-3})$, (NRC, 2001).

Une ration à faible DACA induit une légère acidose métabolique compensatoire qui stimule la résorption du Ca des os, améliore l'homéostasie du Ca, et prévient l'hypocalcémie clinique. La DACA cible pour prévenir la fièvre du lait serait d'environ -50 mEq / kg MS lorsqu'on utilise l'équation courte ou d'environ +150 mEq / kg MS lorsqu'on utilise l'équation longue (Goff et Horst, 2003).

Pour abaisser la DACA de la ration de la vache au cours de la période de transition, soit environ quatre semaines avant le vêlage, les producteurs offrent des aliments pauvres en potassium et/ou un supplément de sels anioniques. L'addition de sels anioniques afin de réduire la DACA de la ration a par contre ses limites, et ce, à cause des problèmes de palatabilité associés aux sources anioniques couramment utilisées (Oetzel et Barmore, 1993). Lorsqu'on utilise la formule courte et que la DACA de la ration est plus élevée que 250 mEq / kg MS, il devient difficile d'ajouter assez de sels anioniques pour abaisser la DACA au niveau recommandé sans observer des problèmes de palatabilité (Horst et al., 1997).

L'incidence de fièvre vitulaire, via une baisse du pH sanguin, peut aussi être diminué en enlevant des cations de la ration. Goff et Horst (1997) ont démontré que les vaches nourries d'une ration faible en K ou en Na étaient moins sujettes à la fièvre vitulaire que celles qui recevaient des rations riches en K et Na. Le cation présent en grande quantité dans les aliments communément servis à la vache tarie est le K qui provient surtout des fourrages. Le K de la ration est un élément déterminant dans la susceptibilité des vaches laitières à la fièvre du lait (Goff et Horst, 1997; Horst et al. 1997). La ration de la vache tarie contient une grande proportion de

fourrage, ce qui fait que les fourrages servis à la vache tarie 2 à 4 semaines avant le vêlage devraient avoir une DACA faible voir négative.

L'objectif de la présente étude était de mesurer l'effet de la fertilisation chlorée sur les éléments minéraux et la DACA d'un fourrage de fléole des prés cultivée sur des sols de différents niveaux de fertilité en K.

Matériel et Méthodes

L'expérience a été réalisée en champ au cours de l'été 2003 sur quatre sites dont le niveau de fertilité en potassium différait: Normandin (311 kg K / ha); Macdonald (289 kg K / ha), St-Augustin (197 kg K / ha) et Ste-Perpétue (123 kg K / ha). Les sols des deux premiers sites sont considérés comme étant riches alors que ceux des deux derniers sites ont des niveaux moyens de K (CRAAQ, 2003). Un plan en parcelles partagées (« split-plot ») a été utilisé comme dispositif expérimental avec les sites (contenu en K du sol) en parcelles principales et les cinq traitements du Tableau 1 en sous-parcelles.

Le rendement en MS et les concentrations en K, Na, Ca, Mg, Cl, S et P de la fléole des prés ont été mesurés à la première récolte du printemps de 2003. La DACA a été ensuite calculée pour le fourrage de chaque parcelle en utilisant les deux équations rapportées plus haut.

Tableau 1. Traitements de fertilisation appliqués au champ des quatre sites expérimentaux¹.

Traitement no	Fertilisation azotée ² (kg N / ha)	Forme de chlore	Fertilisation chlorée (kg Cl / ha)
1	70	CaCl ₂	0
2	70	CaCl ₂	80
3	70	CaCl ₂	160
4	70	CaCl ₂	240
5	70	NH ₄ Cl	160

¹Le P était apporté en fonction des analyses de sol (CRAAQ, 2003).

²L'azote a été apporté sous forme de NH₄NO₃.

Résultats

DACA : La fertilisation en chlore a causé une diminution significative des DACA courte et longue de la fléole des prés, et ce, à trois des quatre sites étudiés (Fig. 1a, b). La diminution de la DACA courte avec la fertilisation en CaCl₂ était en effet significative ($P < 0,01$) et plus importante à St-Augustin, Ste-Perpétue et au campus Macdonald (163 à 248 méq / kg MS) qu'à Normandin (46 méq / kg MS, $P = 0,07$). Les effets de la fertilisation en CaCl₂ sur la DACA longue étaient semblables à ceux observés pour la DACA courte (Fig. 1b).

Lorsque aucune fertilisation en chlore était appliquée, la DACA courte de la fléole des prés était minimale (199 méq / kg MS) au site où le contenu en K du sol était le plus faible (Ste-Perpétue), et elle était maximale (459 méq / kg MS) au site de St-Augustin où le contenu en K du sol était intermédiaire.

À trois des quatre sites étudiés, les deux formes de fertilisant chloré (CaCl₂ et NH₄Cl) étaient aussi efficaces pour abaisser la DACA de la fléole des prés. Au site du campus Macdonald, par contre, la fertilisation à 160 kg Cl / ha sous forme de CaCl₂ était plus efficace que celle sous forme de NH₄Cl pour faire abaisser la DACA calculée avec la formule courte ou longue (données non présentées). Une deuxième année de résultats est donc nécessaire afin de conclure quant à l'efficacité des deux formes de chlore.

Rendement en MS : La fertilisation en chlore n'a pas eu d'effet sur le rendement en MS de la fléole. Le rendement en fourrage était maximal au site de Normandin (4,8 t / ha), intermédiaire à ceux de St-Augustin (3,6 t / ha) et du campus Macdonald (3,1 t / ha) et minimal à Ste-Perpétue (1,7 t / ha).

Concentration en K : La fertilisation en chlore a causé une augmentation significative de la concentration en K de la fléole des prés à deux des 4 sites; cette concentration a augmenté de 12% au site du campus Macdonald et de 10% à celui de St-Augustin (Fig. 1c). Cependant, cette faible augmentation de la concentration en K avec la fertilisation chlorée était accompagnée d'une forte augmentation de la concentration en Cl de la fléole des prés (Fig. 1g), résultant ainsi en une diminution nette de la DACA avec la fertilisation en Cl.

Lorsque aucune fertilisation en Cl n'était appliquée, la concentration en K de la fléole des prés était minimale à Ste-Perpétue (15 mg / g MS) et maximale à Normandin (31 mg / g MS), reflétant ainsi le niveau de fertilité du sol en potassium.

Concentration en Na : La fertilisation chlorée a causé une augmentation de la concentration en Na de la fléole des prés, et ce, à Ste-Perpétue seulement (Fig. 1d). La concentration en Na de la fléole était aussi significativement plus élevée à Ste-Perpétue qu'aux autres sites, mais étant donné qu'elle est demeurée numériquement faible (0,11 à 0,21 mg / g MS), cette augmentation a eu un effet très limité sur la DACA.

Concentration en Ca : La concentration en Ca du fourrage a augmenté de 26, 24, 21 et 10% avec la fertilisation en CaCl_2 , et ce, aux sites de St-Augustin, du campus Macdonald, de Ste-Perpétue et de Normandin, respectivement (Fig. 1e). Cette faible augmentation de la concentration en Ca de la fléole des prés avec une fertilisation en CaCl_2 était par contre accompagnée par une augmentation nettement plus importante de la concentration en Cl de la plante, de sorte que la DACA du fourrage a diminué avec ce type de fertilisation.

La concentration en Ca de la fléole des prés était plus élevée aux sites de St-Augustin et Ste-Perpétue, intermédiaire au site de Normandin et plus faible au site du campus Macdonald.

Concentration en Mg : La concentration en Mg de la plante a été peu affectée par la fertilisation chlorée (Fig. 1f). Cette concentration était plus élevée au site de Ste-Perpétue qu'aux autres sites.

Concentration en Cl : La fertilisation en chlore a causé une augmentation marquée de la concentration en Cl de la plante et cette augmentation explique la diminution observée dans la DACA de la fléole des prés; l'intensité de cet effet a varié d'un site à l'autre (Fig. 1g). L'augmentation de la concentration en Cl de la fléole avec la fertilisation chlorée était en effet moins importante à Normandin (43%) qu'aux trois autres sites (216 à 672%). Lorsque qu'on compare le traitement témoin où aucune application de Cl n'était effectuée (Fig. 1g), la concentration en Cl de la fléole des prés était nettement plus élevée à Normandin (10,5 mg / kg MS) qu'aux trois autres sites (1,3 à 4,1 mg / kg MS); la fertilisation des années précédentes était riche en chlore à Normandin à cause d'applications répétées de KCl.

Concentration en S : La fertilisation chlorée n'a pas affecté de façon significative la concentration en S de la fléole des prés (Fig. 1h). Comme pour le Na, les variations de la concentration en S de la fléole des prés étaient trop faibles pour influencer de façon significative la DACA.

Concentration en P : Aucun effet de fertilisation en chlore et de site n'a été observé sur la concentration en P de la fléole des prés (Fig. 1i).

SOMMAIRE

- La différence alimentaire cations – anions (DACA) de la fléole des prés a significativement diminué avec une fertilisation en chlore, et ce, à tous les sites sauf à Normandin ($P = 0,07$ pour la DACA courte et $P = 0,26$ pour la DACA longue) où le niveau de chlore dans le sol était initialement élevé.
- Le rendement en MS de la fléole des prés n'a pas été affecté par la fertilisation chlorée.
- La plus faible DACA (8 méq / kg MS) a été obtenue avec le taux de fertilisation en Cl le plus élevé (240 kg Cl / ha) au site dont la teneur en K du sol était la plus faible (123 kg K / ha). À ce dernier site, les niveaux de fertilisation de 80 et 160 kg Cl / ha ont permis de produire du fourrage de fléole des prés dont la DACA était de 74 et 13 méq / kg MS, respectivement. La DACA du fourrage de fléole des prés est grandement influencée par ses concentrations en K et Cl.
- À trois des quatre sites étudiés, nous n'avons pas observé de différence entre les deux types de fertilisants chlorés (CaCl_2 vs. NH_4Cl) quant à leur effet sur la DACA de la fléole des prés.

RÉFÉRENCES

- CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation. 1^{re} édition. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 297 pp.
- Ender, F., Dishington, I. W. et Helgebostad, A. 1971. Calcium balance studies in dairy cows under experimental induction and prevention of hypocalcaemic *paresis puerperalis*. The solution of the aetiology and the prevention of milk fever by dietary means. *Z. Tierphysiol., Tierernähgr. u. Futtermittelkde.* 28: 233-256.
- Goff, J.P. 2000. Pathophysiology of calcium and phosphorus disorders. *Vet. Clin. N. Am.-Food A.* 16:319-337.
- Horst, R. L., Goff, J. P., Reinhardt, T. A. et Buxton, D. R. 1997. Strategies for preventing milk fever in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 80: 1269-1280.
- Goff, J. P. et Horst, R. L. 1997. Effects of the addition of potassium or sodium, but not calcium, to prepartum rations on milk fever in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 80: 176-86.
- Goff, J. P. et Horst, R. L. 2003. Role of acid-base physiology on the pathogenesis of parturient hypocalcaemia (milk fever) - the DCAD theory in principal and practice. *Acta vet. Scand. Suppl.* 97: 51-56.
- Oetzel, G. R. et Barmore, J. A. 1993. Intake of a concentrate mixture containing various anionic salts fed to pregnant, nonlactating cows. *J. Dairy Sci.* 76:1617-1623.
- National Animal Health Monitoring System (NAHMS), Dairy 1996: Part III: Reference of 1996 Dairy Health and Health Management. Veterinary Services, APHIS, USDA, Ft. Collins, CO. p. 30.
- National Research Council. 2001. Nutrient requirements of dairy cows. 7th rev. ed. National Academy Press, Washington, DC.

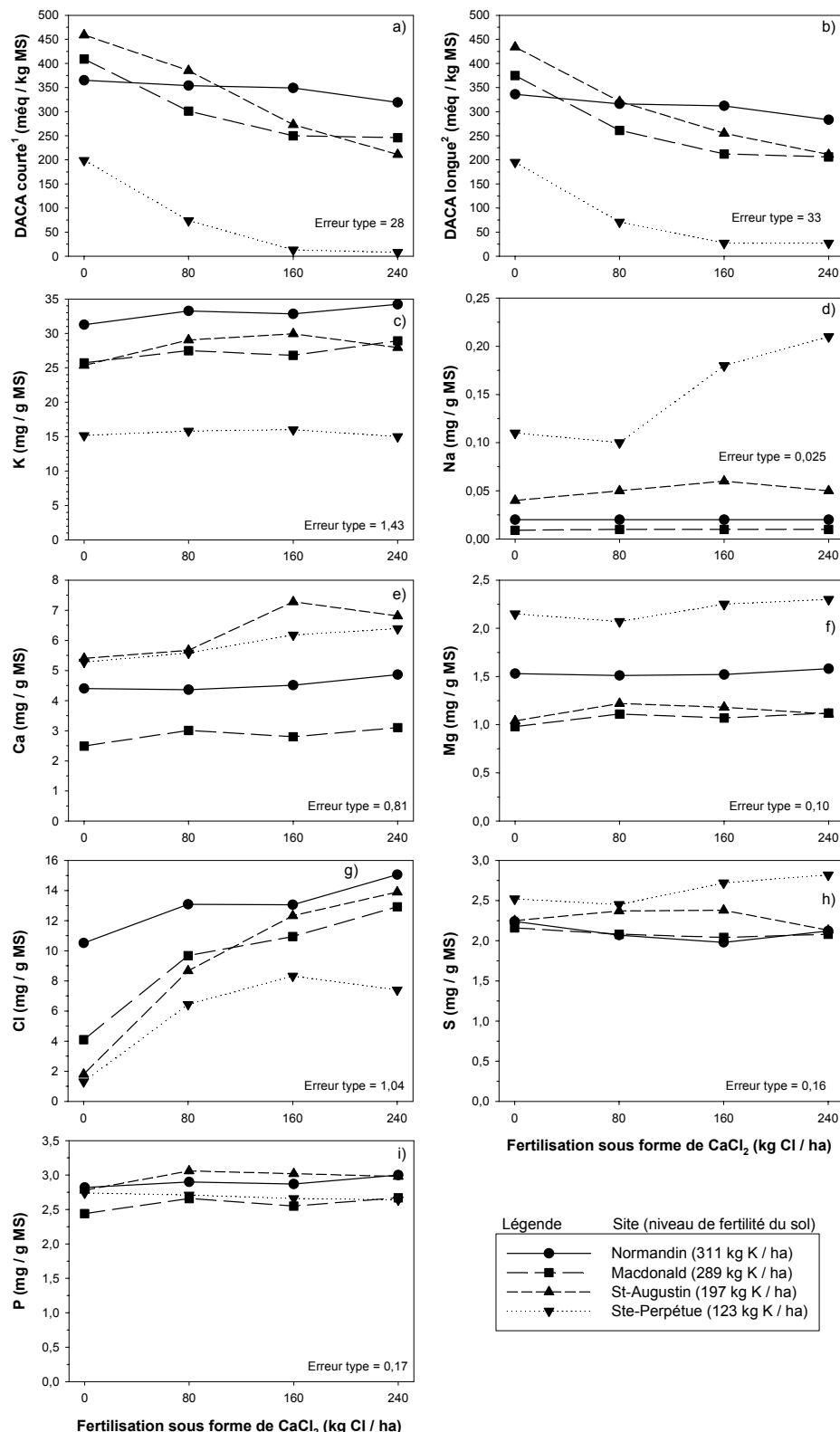


Figure 1. Effet de la fertilisation chlorée (CaCl₂) sur la différence alimentaire cations – anions [DACA courte¹ = (Na⁺ + K⁺) - (Cl⁻ - S⁻²), DACA longue² = (Na⁺ + K⁺ + 0,15 Ca⁺² + 0,15 Mg⁺²) - (Cl⁻ + 0,6 S⁻² + 0,5 P⁻³)] et les concentrations en K, Na, Ca, Mg, Cl, S et P de la fléole des prés cultivée à quatre sites expérimentaux dont le niveau de fertilité en K du sol variait.

Différence alimentaire cations - anions de plantes fourragères suite à l'apport de sous-produits magnésiens

Gaétan Parent¹, Gilles Bélanger¹, Jean Lafond², Noura Ziadi¹, Jean-Pierre Deland³ et Jean Laperrière³

^{1,2}Agriculture et Agroalimentaire Canada, ¹Sainte-Foy, ²Normandin; et ³Norsk Hydro Canada inc., Bécancour.

Norsk Hydro Canada Inc. (**NHCl**), entreprise spécialisée dans l'extraction et le raffinage du magnésium (Mg) destiné à un usage industriel, génère différents sous-produits dans le processus d'extraction de ce métal. Ces sous-produits peuvent contenir suffisamment de Mg sous une forme phytodisponible pouvant être valorisée en production agricole. Parmi ces sous-produits, deux ont reçu une certification du BNQ (Bureau de normalisation du Québec) et sont d'ailleurs actuellement commercialisés. Ces deux sous-produits sont le MAGIIIM™ et le MAGIIIM+™. Ces sous-produits comportent en moyenne de 9 à 12% de Mg total et sont considérés comme des matières chaulantes comportant un pouvoir neutralisant variant de 55 à 65% d'équivalent carbonate de calcium. Ces sous-produits comportent également de 0,8 à 1,6% de chlore (Cl).

D'autre part, le début de la lactation des vaches laitières est une période critique où la demande en calcium (Ca) pour la production de lait est très élevée. Lorsque la teneur en Ca dans le sang baisse sous un certain seuil (hypocalcémie), l'animal risque de souffrir de fièvre vitulaire, maladie ayant pour effet d'entraîner une diminution de la production laitière et une augmentation des coûts de production. Différentes solutions sont possibles afin de limiter l'apparition de cette baisse de Ca sanguin telles l'utilisation de sels anioniques dans la ration de la vache en début de lactation ou encore l'alimentation pré-vêlage au moyen d'aliments comportant une faible différence alimentaire cations - anions (**DACA**). Pour cette dernière approche, la production d'aliments à faible DACA est possible par la fertilisation des cultures au moyen d'éléments chargés négativement tels le Cl et le soufre (S). Par contre, la fertilisation des cultures au moyen d'éléments chargés positivement [potassium (K), Ca, Mg, sodium (Na)] pourrait avoir pour conséquence néfaste d'augmenter la DACA des fourrages.

La présente étude avait pour objectif de déterminer l'impact de l'apport de sous-produits magnésiens provenant de NHCl, comportant également une certaine quantité de Cl, sur la DACA d'une prairie à prédominance de graminées fourragères. Des parcelles de recherche ont été établies à la ferme de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à Normandin en mai 2002. Deux sous-produits magnésiens ont été testés soit le MAGIIIM™ et le MAGIIIM+™ en plus du sel d'Epsom ($MgSO_4$). Ce dernier traitement a été supplémenté avec un apport de chaux calcique afin d'apporter la même quantité de matière chaulante sur une base de pouvoir neutralisant que ce qui était apporté par les sous-produits magnésiens utilisés. Des apports de Mg (0, 400 et 800 kg Mg/ha) ont été pratiqués au printemps 2002 et 2003 lors du début de la croissance de la végétation. Les quantités de Mg apportées dans cette expérimentation étaient élevées puisqu'un but visé était de simuler l'effet à long terme de l'apport répété de Mg mais dans le cadre d'un projet de recherche dont la durée n'était que de trois ans. Les graminées fourragères à prédominance de fléole des prés ont été récoltées selon une régie de deux coupes. La fertilisation minérale des parcelles de recherche a été faite selon les recommandations du CPVQ (1996). Les fertilisants minéraux ont été fractionnés en deux apports soit 60% appliqués

au printemps après le départ de la croissance des végétaux et le reste suite à la première coupe. La DACA a été calculée en utilisant la formule suivante :

$$[(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + 0,15 \text{ Ca}^{2+} + 0,15 \text{ Mg}^{2+}) - (\text{Cl}^- + 0,6 \text{ S}^{2-} + 0,5 \text{ P}^{3-})] \text{ (NRC, 2001)}$$

En moyenne pour les deux coupes de 2002 et 2003, l'apport des deux sous-produits magnésiens testés a diminué la DACA des plantes fourragères. Les valeurs obtenues passaient de 535 mÉq/kg M.S. pour le témoin sans apport de Mg à des valeurs variant de 400 mÉq/kg M.S. pour le MAGIIIM+™ à 418 mÉq/kg M.S. pour le MAGIIIM™ pour des apports de 800 kg Mg/ha. L'apport du sel d'Epsom a également diminué la DACA, particulièrement avec un apport de 400 kg Mg/ha (DACA de 454 mÉq/kg M.S.). Pour un apport plus élevé de sel d'Epsom (800 kg Mg/ha), la DACA était plus élevée (490 mÉq/kg M.S.) qu'avec l'apport de 400 kg Mg/ha. L'effet de ces traitements sur la DACA était plus prononcé à la coupe 2 qu'à la coupe 1.

La diminution de la DACA obtenue avec l'apport des sous-produits MAGIIIM™ et MAGIIIM+™ a été principalement attribuée à l'augmentation marquée de la concentration en Cl des plantes fourragères. Même si l'apport de sous-produits magnésiens a aussi augmenté la teneur en Mg des plantes fourragères, plus particulièrement pour le MAGIIIM+™, cette augmentation n'a pas eu d'effet marqué sur la DACA. Ce résultat est expliqué par l'importance réduite que présente le Mg comparativement au Cl dans le calcul de la DACA. En effet, dans la formule utilisée pour le calcul de la DACA, le Mg comporte un coefficient de 0,15 alors que le coefficient du Cl est de 1. Dans ce contexte et sous les conditions de l'expérimentation, l'apport de Cl a plus influencé la DACA des plantes fourragères que le Mg apporté sous forme de sous-produits magnésiens.

La diminution de la DACA obtenue avec l'apport de 400 kg Mg/ha sous forme de sel d'Epsom a été principalement attribuée à l'augmentation de la teneur en S des plantes fourragères. En dépit du fait que la concentration en Mg avait nettement augmenté avec l'apport de Mg, l'effet du S sur la DACA était plus prononcé que celui du Mg. L'explication de ce résultat réside de nouveau dans la plus grande prépondérance du S dans la formule du calcul de la DACA comparativement au Mg. Par contre, pour un apport de 800 kg Mg/ha, une légère augmentation de la DACA a plutôt été observée; la concentration en S des plantes fourragère était comparable à celle obtenue avec un apport de 400 kg Mg/ha.

Le Cl ou le S apporté avec les sources de Mg testées a favorisé la diminution de la DACA même si des quantités importantes de Mg étaient apportées. Les sous-produits magnésiens MAGIIIM™ et MAGIIIM+™ peuvent donc contribuer à diminuer la DACA des fourrages principalement en raison de leur composition en Cl. Pour le sel d'Epsom, un apport de 400 kg Mg/ha a diminué la DACA principalement en raison de l'apport de S.

Références citées

- CPVQ (Conseil des Productions Végétales du Québec). 1996. Grilles de références en agriculture. 2^{ème} édition. Agdex 540. Conseil des productions végétales du Québec inc. 128 pp.
- NRC (National Research Council). 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. Seventh revised Edition. p.191-194.

La fléole de climat frais: plus productive, plus énergétique et plus digestible.

Annick Bertrand, Yves Castonguay, Gaëtan Tremblay et Gilles Bélanger

Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), Sainte-Foy. bertranda@agr.gc.ca

Le taux de conversion de l'azote des fourrages en lait ou en viande est d'environ 20 à 25% (Cairns, 2002). Ce faible taux entraîne le rejet d'une quantité importante d'azote par les ruminants avec des conséquences négatives pour l'environnement. La raison principale de ce faible taux de conversion de l'azote est une limitation énergétique; les microbes du rumen ont besoin d'une source d'énergie rapidement fermentescible pour leur croissance et pour l'utilisation de l'azote. On peut penser qu'une augmentation de la teneur en sucres solubles de la plante permettrait d'améliorer de façon significative l'utilisation de l'azote du fourrage par les microorganismes du rumen.

Pour une même espèce, les plantes croissant sous des températures élevées produisent généralement des fourrages de qualité moindre que celles croissant sous des températures plus fraîches. Par exemple, le ray-grass croissant à des températures de 10-15°C produit 59% de feuilles alors que le ray-grass croissant à 20-25°C ne donne que 36% de feuilles (Ball et al., 2001). Quoiqu'il existe certaines données sur l'effet de la température de croissance sur la répartition des tiges et des feuilles, peu de travaux relient directement la concentration en sucres et en protéines des plantes avec la température de croissance. De nouvelles connaissances concernant l'incidence de la température de croissance sur le contenu en sucres et la qualité du fourrage seraient particulièrement pertinentes dans le contexte des changements climatiques prédicts. Cette information permettrait de mettre à profit la variabilité génétique d'une espèce pour contrer les effets négatifs d'un réchauffement des températures ou de l'augmentation de l'incidence des périodes de sécheresse sur la qualité du fourrage. De plus, la mise en évidence d'une meilleure qualité et d'une plus grande digestibilité de fourrages produits sous un climat frais permettrait d'appuyer leur mise en marché pour l'exportation.

Le but de la présente étude était de déterminer l'effet de la température de croissance sur le rendement, la concentration en sucres solubles et en fibres (ADF, NDF et ADL) ainsi que sur la digestibilité de la fléole des prés (*Phleum pratense* L.). Nous nous sommes également intéressés à l'effet de la période de coupe (AM vs PM) sur la qualité des fourrages produits avec la fléole des prés.

Tableau 1. Description des traitements de température appliqués lors de la croissance de la fléole des prés.

Traitement	Température de croissance (°C)	
	Jour	Nuit
17/5 °C	17	5
22/10 °C	22	10
28/15 °C	28	15

Pour réaliser cette expérience, des plants de fléole des prés (cv. Champ) ont été semés en pots et placés dans une chambre de croissance à 22°C le jour et à 17°C la nuit (22/17 °C) pendant 5 semaines. Après cette période, les plantes ont été coupées et distribuées dans trois chambres de

croissance ajustées aux températures décrites dans le tableau 1 et où la photopériode était fixée à 15 heures par jour. Le dernier traitement, où les températures sont plus élevées, visait à étudier l'impact de conditions de croissance en tenant compte de l'augmentation des températures associées aux changements climatiques.

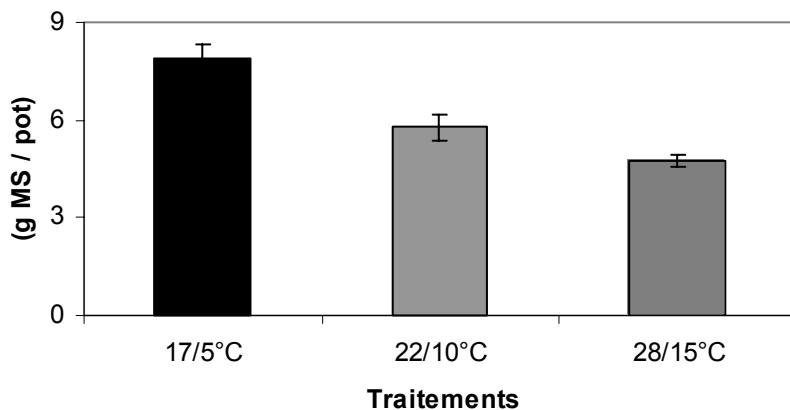


Figure 1. Effet de la température de croissance (jour/nuit) sur le rendement en matière sèche de la partie aérienne de la fléole des prés.

Nos résultats ont clairement démontré que les températures fraîches favorisent la croissance de la fléole : plus la température de croissance était fraîche, plus le rendement était élevé (Figure 1). La température de croissance a aussi eu un effet marqué sur l'accumulation des sucres dans la plante. La concentration de sucres totaux la plus élevée, de 92,7 mg/g MS, a été atteinte dans les plants croissant à 28/15 °C, alors que les plants croissant à 17/5 °C avaient une concentration intermédiaire de 72,4 mg/g MS et que ceux croissant à 22/10 °C avaient la concentration la plus basse (52,9 mg/g MS). Cependant, lorsque la quantité de sucre était calculée sur une base de plante entière, c'est la fléole croissant à 17/5 °C, ayant le rendement le plus élevé, qui produisait le plus de sucres (569 mg de sucres/ pot à 17/5 °C comparativement à 306 mg/pot à 22/10 °C et à 438 mg/pot à 28/15 °C).

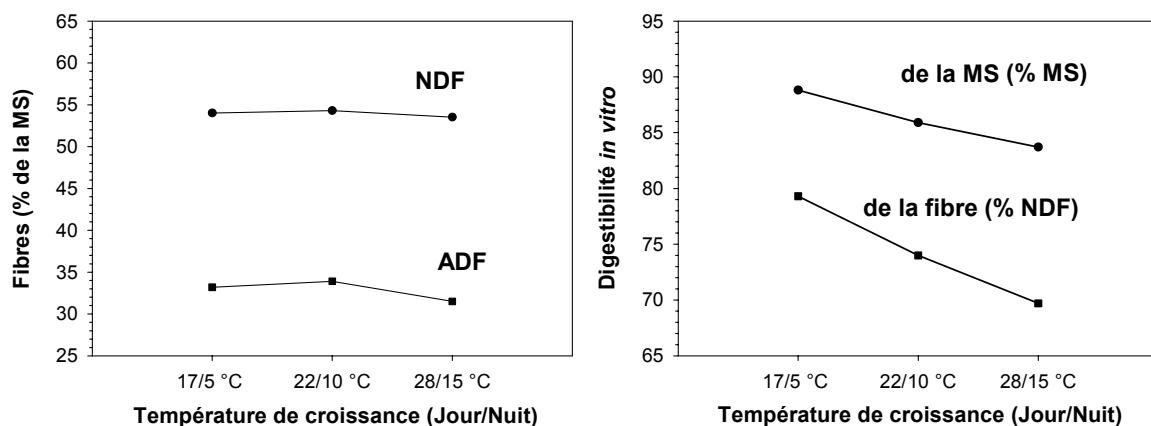


Figure 2. Effet de la température (jour/nuit) appliquée au cours de la croissance de la fléole des prés sur la concentration en fibres et la digestibilité.

En plus de favoriser la croissance, les températures plus fraîches ont augmenté la digestibilité de la fléole. En effet, une augmentation de la température de croissance a causé une diminution linéaire et significative de la digestibilité de la matière sèche (MS) ainsi que celle de la fibre NDF (Figure 2). De plus, les traitements de température de croissance n'ont pas eu d'effet sur les concentrations en fibres ADF et NDF de la fléole des prés (Figure 2), indiquant que la température de 17/5 °C a eu un effet positif sur la digestibilité de la fibre sans en modifier la concentration. La concentration en lignine de la plante, qui était en moyenne de 3,9% de la MS, n'était pas non plus affectée par les traitements.

Les résultats obtenus en conditions contrôlées démontrent que les rendements et la digestibilité de la fléole des prés sont améliorés lorsque la plante pousse dans des conditions fraîches (17 °C le jour / 5 °C la nuit). Cette augmentation de la digestibilité de la fléole des prés n'est pas reliée à une augmentation de la concentration en sucres solubles ou à une baisse de la concentration en fibres ADF, NDF ou ADL, mais bien à une augmentation de la digestibilité de la fibre NDF. Notre expérience indique que la fléole de climat frais est de qualité supérieure. Ces résultats pourraient être mis de l'avant lors de la mise en marché du foin.

Références :

- Cairns, A. 2002. Starch accumulation in temperate forage grasses. IGER innovations. Pages 6-9.
Ball, D., Collins, M., Lacefield, G., Martin, N., Mertens, D., Olson, K., Putnam, D., Undersander, D. et Wolf, M. 2001. Understanding forage quality. American Farm Bureau Federation Publication 1-01, Park Ridge, IL, USA.

Autotoxicité de la luzerne: Impact sur les populations et rendements

Philippe Seguin¹ et Craig C. Sheaffer².

¹Département de sciences végétales, Campus Macdonald - Université McGill,
2111 Lakeshore Road., Sainte-Anne-de-Bellevue (QC) H9X 3V9.

Tél.: (514) 398-7855, Fax : (514) 398-7897, philippe.seguin@mcgill.ca

²Department of Agronomy and Plant Genetics, University of Minnesota,
St. Paul MN 55108, USA

Introduction

L'autotoxicité de la luzerne affecte le développement de plants de luzerne semés dans une luzernière récemment détruite. Ce phénomène est attribuable à la production de toxines par les plants de luzerne établis (morts ou vivants). Ces toxines ralentissent la germination et la croissance de nouveaux semis de luzerne mais peu ou pas celle d'autres espèces. Il semble qu'elles modifient de façon permanente la morphologie du système racinaire des plants de luzerne (Jennings et Nelson, 2002a). Les plants affectés posséderont pour toute leur existence un système racinaire beaucoup plus traçant que des plants non affectés. L'identité des toxines reste controversée, de même que leur mode d'action, et leur impact sur la productivité de champs affectés.

Il n'y a présentement pas de consensus sur l'importance des pertes de rendements attribuable à l'autotoxicité. Certaines études suggèrent que les rendements et populations de luzerne peuvent être tous deux réduits de façon considérable dès l'année du re-semis. Les études de Jennings et Nelson (2002a,b) suggèrent que l'autotoxicité cause en moyenne des pertes de rendements de 19% tout au long de la durée d'une luzernière et ce de façon consistante. Des études réalisées dans le Midwest américain ont cependant démontré que l'autotoxicité de la luzerne résulte en peu ou pas de perte de rendement dans l'année du re-semis mais en des diminutions de 15 à 20% les années subséquentes. Ces baisses ne furent cependant observées que dans certains environnements (Seguin et coll., 2002).

Certaines de ces variations entre études peuvent s'expliquer par l'impact que plusieurs facteurs semblent avoir sur le phénomène d'autotoxicité. Il semble que les toxines peuvent persister dans le sol jusqu'à six mois, cette durée dépendant du type de sol, étant moindre dans les sols sablonneux et plus importante dans les sols argileux. D'autres facteurs environnementaux telles la température et les précipitations peuvent également affecter la persistance de ces toxines dans le sol (Jennings et Nelson, 1998). Il semble que l'impact pourrait être supérieur lorsque le re-semis s'effectue sans labour et lorsque effectué tôt au printemps (Tesar, 1993; Jennings et Nelson 2002a). Des études en laboratoire ont révélé également des différences entre cultivars de luzerne, aussi bien dans leur potentiel à générer l'autotoxicité, que dans leur susceptibilité aux toxines (Chung et Miller, 1995; Khatta et Seguin, 2001, résultats non publiés).

Avec la récurrence des pertes hivernales dans les luzernières de nombreuses régions de l'Amérique du Nord, la question suivante se pose plus que jamais: que faire, re-semcer de la luzerne ou pas? Les recommandations varient grandement d'une région à l'autre. Néanmoins, il est généralement recommandé de ne pas effectuer un nouveau semis de luzerne dans une luzernière récemment détruite, du à l'impact négatif que l'autotoxicité pourrait avoir sur les

rendements de la nouvelle luzernière. Cependant l'information disponible sur l'étendue des pertes de rendements causées par l'autotoxicité de la luzerne, et sur l'impact la régie peut avoir sur ce phénomène reste limitée.

Le but de ce projet est de : i) déterminer l'importance de l'autotoxicité de la luzerne à différents sites en Amérique du Nord; ii) déterminer si ce phénomène est de la même intensité suivant différent cultivars de luzerne; et iii) déterminer si la susceptibilité est la même pour différents cultivars. Des expériences ont donc été établies au Québec et Minnesota afin de répondre à ces questions.

Méthodologie

Des parcelles de trois cultivars de luzerne (Avalanche +Z, Hybriforce 400 et WL319 HQ) et un cultivar de ray-grass (BG-34) ont été établies à un taux de 12 kg/ha de façon conventionnelle dans un total de trois environnements, en 2002 et 2003 à un site à Montréal, QC, et en 2003 à un site à Rosemount au Minnesota. La moitié de la superficie de ces parcelles fut traitée avec du glyphosate (3,3 kg d'élément actif/ha) à l'automne de l'année de semis (mi-septembre) et l'autre au printemps suivant (début mai). Ce traitement avait pour but de simuler les pertes hivernales dans une luzernière. Par la suite, à la mi-mai, toutes les parcelles furent re-semées utilisant un semoir sans labour avec quatre cultivars de luzerne (Avalanche +Z, Hybriforce 400, Vernal et WL319 HQ) à un taux de 12 kg/ha. Ces cultivars de luzerne ne sont pas recommandés par le CRAAQ au Québec, mais furent sélectionnés suite à la démonstration en laboratoire de leur forte différence en terme de susceptibilité à l'autotoxicité (J. Moutray, communication personnelle).

Les traitements furent disposés en un plan aléatoire complet avec restrictions à deux niveaux (i.e., « split-split-plot »). Comme traitement principal on retrouve les différents cultivars de luzerne semés initialement et qui ont pour but de générer les toxines, le ray-grass est inclus comme témoin dans lequel les toxines ne sont pas présentes. Les traitements disposés en sous-parcelles sont les dates à laquelle les parcelles principales sont détruites. Cette destruction a pour but de simuler les pertes hivernales. Finalement en sous-sous-parcelles sont disposés les cultivars re-semés au printemps. Les sous-sous-parcelles mesurent 1,5 par 5 m. Les sites à Montréal contiennent quatre répétitions et celui au Minnesota trois. Les rendements de chacune des parcelles ainsi que les populations de luzerne présentes sont déterminés au cours de trois saisons (i.e., année du re-semis et les deux années suivantes), excepté pour le site initié en 2002 à Montréal pour lequel seules les années suivant le re-semis sont étudiées.

Résultats

Jusqu'à présent les résultats préliminaires de 2004 suggèrent une très faible autotoxicité qui se reflète principalement dans les populations (i.e., plants/m²), et ce seulement dans les deux environnements québécois. Pour le site re-semé en 2003, les populations de luzerne furent 30% inférieures dans les parcelles contenant initialement de la luzerne, lorsque comparées au contrôle (Figure 1). De plus les populations étaient 45% moindres dans les parcelles détruites au printemps comparées à celles détruites à l'automne, et dans lesquelles les toxines devraient se retrouver en plus forte concentration. Des différences de 30% furent également observées pour le site re-semé en 2004 entre les parcelles détruites au printemps et celles détruites à l'automne. Cependant, il n'y avait pas de différences entre le témoin et les parcelles contenant initialement de la luzerne. Au Minnesota il n'y avait aucune différence entre les divers traitements. Aucune interaction ne fut observée entre les différents facteurs évalués.

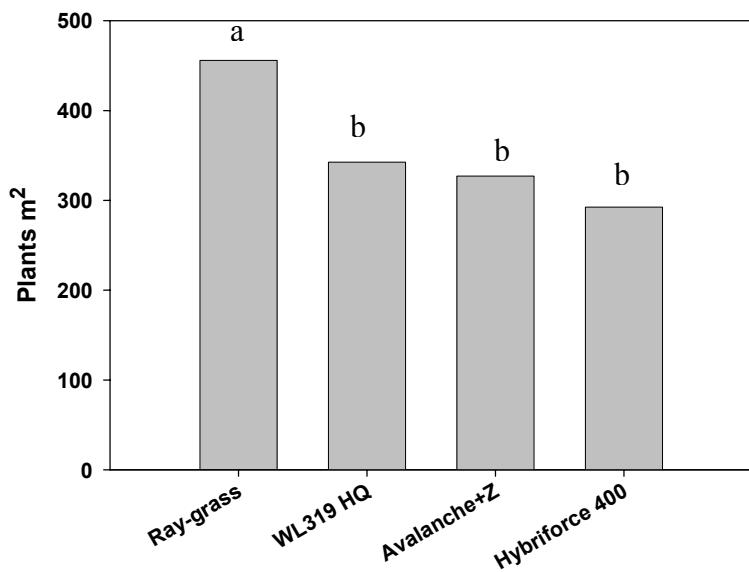


Figure 1. Densité, en 2004, de plants de luzerne re-semés en 2003 dans des parcelles de luzerne (Avalanche +Z, Hybriforce 400, et WL319 HQ) ou de ray-grass (témoin). Les résultats sont la moyenne de 2 dates auxquelles la culture initiale fut détruite, 4 cultivars de luzerne re-semés, et 4 réplications ($n = 32$). Les moyennes suivies de lettres différentes sont différentes statistiquement ($P < 0,05$).

un effet inverse aurait du être observé s'il y avait eu une différence furent observées entre les rendements des différents facteurs. À Montréal, pour le site re-semé en 2003, des rendements inférieurs ont été observés à la troisième coupe et pour les rendements annuels avec Avalanche +Z et WL319 HQ lorsque comparés à Hybriforce 400 et Vernal. Au Minnesota les résultats étaient différents, Vernal ayant des rendements inférieurs aux autres cultivars au cours de l'année du re-semis.

Conclusion

Les résultats préliminaires de ce projet indiquent que sous ces conditions, il y aurait uniquement une faible réponse autotoxique de la luzerne, se reflétant principalement par une réduction du nombre de plants par mètre carré. Initialement les rendements ne semblent pas être affectés, suggérant que la réduction des populations soit compensée par une augmentation du nombre de tiges par plant. Nos études se poursuivent afin de déterminer si la réponse peut croître avec le temps.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier A. Désilets-Roy, M-L. Lacasse, J. Straughton et D. Swanson pour la récolte des échantillons.

Très peu d'effets furent observés sur les rendements fourragers dans les trois environnements et aucune interaction ne fut observée entre les différents facteurs évalués. Aucun des effets observés ne supporte la présence d'autotoxicité. En fait, au contraire, pour le site re-semé en 2003 à Montréal, les rendements à la deuxième de trois coupes en 2004 furent 22% inférieurs dans les parcelles initialement semées avec du ray-grass comparées aux parcelles semées avec de la luzerne. De même, au Minnesota les rendements des deux coupes effectuées en 2004 furent en moyenne 17% inférieurs dans les parcelles détruites à l'automne lorsque comparées à celles détruites au printemps. Dans les deux cas une réponse autotoxique. Certaines cultivars de luzerne re-semées. À

Montréal, pour le site re-semé en 2003, des rendements inférieurs ont été observés à la troisième coupe et pour les rendements annuels avec Avalanche +Z et WL319 HQ lorsque comparés à Hybriforce 400 et Vernal. Au Minnesota les résultats étaient différents, Vernal ayant des rendements inférieurs aux autres cultivars au cours de l'année du re-semis.

Références

- Chung, I.M., et Miller, D.A. 1995. Differences in autotoxicity among seven alfalfa cultivars. *Agronomy Journal*. 87:596–600.
- Jennings, J.A., et Nelson, C.J. 1998. Influence of soil texture on alfalfa autotoxicity. *Agronomy Journal*. 90:54–58.
- Jennings, J.A., et Nelson, C.J. 2002a. Rotation interval and pesticide effects on establishment of alfalfa after alfalfa. *Agronomy Journal*. 94:786-791.
- Jennings, J.A., et Nelson, C.J. 2002b. Zone of autotoxic influence around established alfalfa plants. *Agronomy Journal*. 94:1104-1111.
- Seguin, P., Sheaffer, C.C., Schmitt, M.A., Russelle, M.P., Randall, G.W., Peterson, P.R., Hoverstad, T.R., Quiring, S.R., et Swanson, D.R. 2002. Alfalfa autotoxicity: Effects of reseeding delay, original stand age, and cultivar. *Agronomy Journal*. 94:775-781.
- Tesar, M.B. 1993. Delayed seeding of alfalfa avoids autotoxicity after plowing or glyphosate treatment of established stands. *Agronomy Journal*. 85:256–263.