



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

Jeudi, le 14 février 2013

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

Le temps où les fourrages étaient considérés comme une production de seconde classe est chose du passé. De plus en plus de producteurs sont conscients que miser sur les plantes fourragères c'est investir dans le futur de leur entreprise tout en récoltant les profits à court terme. Elles jouent un rôle déterminant dans la rentabilité des productions animales, présentent un énorme potentiel de production de biomasse et contribuent à la protection et à la valorisation du territoire agricole. Ce qui était hier encore vu comme des atouts majeurs sont devenus des éléments incontournables pour assurer le futur de l'agriculture dans son ensemble. C'est par ailleurs sans compter les opportunités qu'offre la demande croissante à l'international pour le foin de commerce. Le Québec compte des centaines de milliers d'hectares en production fourragères sous des conditions climatiques propices à l'obtention à la fois de la quantité et d'une qualité supérieure. Comme dans tous les secteurs économiques, la recherche, le développement et le transfert technologique jouent un rôle essentiel pour assurer l'essor de la ressource et pour mieux répondre aux besoins des utilisateurs. Dans ce contexte, les échanges entre les gens de la recherche, l'industrie, les producteurs et les conseillers agricoles revêtent toute leur importance. C'est dans cette optique que le Conseil Québécois des Plantes Fourragères (CQPF) de concert avec le Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec (CRAAQ) organise chaque année la demi-journée d'information scientifique sur les fourrages (DJISF). Cette année encore, vous serez à même de constater la diversité des thématiques et le dynamisme de la recherche en plantes fourragères au Québec et dans l'est Ontarien. Je suis convaincu que cette activité sera l'occasion de mieux faire connaître les potentialités des plantes fourragères ainsi que les besoins de connaissances et de développement technologique dans ce secteur.

Yves Castonguay, président,
Comité Plantes Fourragères du CRAAQ

TABLE DES MATIÈRES

1- Le réseau d'essais en plantes fourragères: pour qui et pourquoi? <u>Réal Michaud</u>	4
2- Le coût économique et environnemental de la récolte, conservation et distribution des fourrages sur les fermes laitières. <u>Philippe Savoie</u>	7
3- Potentiel d'utilisation de la chicorée et du lotier comme plantes fourragères pour les vaches laitières. <u>Elsa Vasseur</u>	14
4- Composition chimique de certains cultivars d'espèces fourragères fauchés en début et en fin de journée. <u>Amélia Dos Passos Bernardes</u>	16
5- De quelle façon la période de fanage affecte le métabolisme des fructanes chez la fléole? <u>Maroulf Ould Ahmed</u>	21
6- Performance du modèle Stics pour simuler la croissance et la valeur nutritive de la fléole des prés. <u>Guillaume Jégo</u>	25
7- As t'on les bons inoculants pour ensiler le maïs en automne? <u>Yiqin Zhou</u>	30
8- Mesure des particules de fourrage en trois dimensions. <u>Philippe Savoie</u>	33

LE RÉSEAU D'ESSAIS EN PLANTES FOURRAGÈRES: POUR QUI ET POURQUOI?

RÉAL MICHAUD¹, GUY ALLARD², ANNIE CLAESSENS¹, JULIE LAJEUNESSE³, PHILIPPE SÉGUIN⁴.

¹ Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, 2560 boulevard Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3. ² Département de phytologie, Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec, QC, G1V 0A6. ³ Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ferme de recherche, Normandin, QC, G8M 4K3. ⁴ Department of Plant Science, Macdonald Campus, McGill University, Sainte-Anne-de-Bellevue, QC, H9X 3V9
Courriel: real.michaud@agr.gc.ca

ASPECT JURIDIQUE

Au Canada, la *Loi sur les semences* et son règlement d'application, mis en vigueur par le gouvernement fédéral, régissent les essais, l'inspection, la qualité et la vente des semences. Cette loi stipule que nul ne doit :« vendre ou importer au Canada une semence d'une variété qui n'est pas enregistrée de la manière prescrite ou faire de la publicité en vue de la vente au Canada d'une telle semence ». De plus, selon le règlement sur les semences, l'enregistrement des cultivars est obligatoire pour différents types de cultures parmi lesquelles on retrouve les principales espèces fourragères recommandées au Canada. Or des épreuves préalables sont demandées comme exigences de base relatives aux demandes d'enregistrement des cultivars.

Ces épreuves préalables à l'enregistrement sont sous la supervision de comités provinciaux ou régionaux. Tous les comités qui recommandent l'enregistrement des cultivars doivent être officiellement reconnus par le ministre de l'Agriculture et de l'Agroalimentaire du Canada. C'est le cas du comité plantes fourragères du CRAAQ.

Les comités de recommandation ont, entre autres, les responsabilités suivantes :

- Définir et faire appliquer les protocoles d'essai et déterminer la valeur des cultivars pour les cultures dont ils sont responsables;
- Faire des recommandations à l'Agence canadienne sur l'inspection des aliments (ACIA) sur la valeur du cultivar;
- Veiller à ce que les cultivars témoins soient actualisées et suffisamment représentatifs des exigences agricoles au Canada.

HISTORIQUE DU RÉSEAU

Le réseau d'essais comparatifs de cultivars de plantes fourragères a été mis en place en 1938 par le Conseil des semences du Québec. En plus de répondre aux exigences de la loi fédérale, le but des essais était: 1) de faire l'étude du comportement et de la valeur des nouveaux cultivars comparativement aux cultivars qui étaient alors cultivés et 2) d'établir des recommandations pour la province. Le Comité des plantes fourragères, d'abord appelé Comité des prairies et pâturages, relevait du Conseil des semences du Québec avant la création du Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ) en 1969. Son nom est alors devenu Comité des Herbages jusqu'en

1986 où il a changé pour celui que l'on connaît aujourd'hui. Ce Comité relève maintenant du CRAAQ depuis l'an 2000, année qui a marqué la fusion des trois conseils de production.

Les raisons mentionnées pour la mise en place du réseau d'essais en 1938 sont toujours valides. Les essais de cultivars de graminées et de légumineuses fourragères permettent de rencontrer les objectifs suivants :

- 1- Fournir des renseignements sur le comportement des espèces et des cultivars de plantes fourragères lorsqu'ils sont semés sous des conditions se rapprochant des conditions normales chez les meilleurs producteurs du Québec.
- 2- Appuyer les demandes à l'enregistrement auprès de l'ACIA et faire les recommandations d'espèces et de cultivars adaptés aux zones agro-écologiques du Québec.
- 3- Mettre à jour, de façon constante et rapide, les résultats sur le nouveau matériel génétique développé par les améliorateurs de plantes fourragères.
- 4- Permettre une diffusion rapide et efficace des résultats des essais aux agronomes et aux producteurs du Québec.

PRINCIPAUX INTERVENANTS DU RÉSEAU

Le réseau d'essais comprend maintenant trois sites qui sont localisés à Normandin (AAC), St-Augustin-de-Desmaures (U. Laval) et Sainte-Anne-de-Bellevue (U. McGill). C'est une diminution importante par rapport au nombre antérieur de sites, considérant qu'au début des années 1990, en plus des sites actuels, le réseau comprenait les sites de Kapuskasing (AAC), La Pocatière (AAC), Lennoxville (AAC) et Deschambeault (MAPAQ). Le financement du réseau est assuré d'une part par le MAPAQ et d'autre part par l'industrie qui doit verser des frais pour inscrire leurs cultivars dans les essais. Des frais sont également exigés à l'industrie pour la publication des cultivars sur la liste des recommandations.

LES ESPÈCES

La luzerne, le trèfle rouge, la fléole des prés, le brome inerme et le dactyle sont évalués sur une base régulière, c'est-à-dire que des essais sont établis annuellement si des demandes pour évaluer de nouveaux cultivars sont présentées. Pour la fétuque élevée, le brome des prés, l'alpiste roseau, le raygrass annuel, le lotier et le trèfle blanc, les essais ne se font qu'à environ tous les 5-6 ans.

LES ESSAIS OFFICIELS

La liste des cultivars recommandés est révisée annuellement et publiée dans la revue le «Producteur de lait» et elle est également affichée sur Agri-Réseau. Comment un cultivar se retrouve-t-il sur cette liste et pourquoi le producteur devrait-il toujours choisir un cultivar dont le nom apparaît sur cette liste?

L'inscription d'un cultivar sur la liste des recommandations du Québec nécessite plusieurs étapes dont les plus importantes sont : l'introduction et l'évaluation dans le réseau d'essai des plantes fourragères du Québec, l'attestation que le cultivar est performant et, la confirmation du distributeur qu'il dispose en quantité suffisante de la semence du cultivar. Revoyons maintenant un peu plus en détail quelques-unes de ces étapes.

Le réseau d'essais officiels est sous la responsabilité du Comité des plantes fourragères du CRAAQ qui en assure le bon fonctionnement. L'expérimentation selon un protocole bien défini permet de déterminer la valeur agronomique des cultivars, leur potentiel de production en matière

sèche, leur résistance à certaines maladies et insectes et leur pérennité. Car en plus du rendement, la pérennité est un critère déterminant pour l'inscription d'un cultivar sur la liste des cultivars recommandés. Celle-ci est évaluée dans les essais d'après l'évolution du peuplement et du rendement au terme de l'expérimentation. Ainsi un cultivar sous évaluation sera semé au trois sites au cours de deux années consécutives. Le semis sera exploité sur trois années après l'établissement. Un minimum de 8 années/sites est exigé avant de considérer la recommandation d'un cultivar. Aucune donnée de rendement n'est prélevée lors de l'année d'établissement, sauf bien sûr pour le ray-grass annuel.

Les essais sont conduits en petites parcelles (9 m²) de quatre répétitions par site pour chaque semis. Dans ces essais, les cultivars sont évalués en culture pure et sous des conditions leur permettant d'exprimer leur potentialité. Ces essais ont l'avantage de permettre des comparaisons tout à fait valables entre les nouveaux cultivars et des cultivars bien connus utilisés comme témoins. Les cultivars témoins sont généralement les meilleurs cultivars disponibles. Durant 2 à 3 années, les cultivars expérimentaux sous évaluation sont soumis au même régime d'exploitation que celui recommandé par le CRAAQ pour les espèces concernées. Ainsi, les graminées fourragères sont coupées deux à trois fois par année au stade fin montaison-début épiaison et les légumineuses le sont au tout début floraison.

Tous les essais d'évaluation sont visités annuellement par des membres du comité. La tournée des sites d'essais s'effectue vers la fin de mai et le début de juin. Pendant cette visite, chaque essai est évalué individuellement. Un essai doit être accepté avant que les données puissent être utilisées. Après les années d'expérimentation, les résultats recueillis sur un cultivar sont regroupés et analysés. Seuls les essais dont les caractéristiques agronomiques et statistiques ont été jugés valables sont retenus et c'est à partir de cette base que le Comité prend ses décisions. Vu le nombre limité de sites, les résultats du réseau ne permettent pas de faire des recommandations régionales mais plutôt des recommandations basées sur l'adaptation générale d'un cultivar.

Un cultivar ne se retrouve généralement pas sur la liste des cultivars recommandés pour le Québec soit parce que:

- a) le cultivar n'a jamais été mis à l'essai au Québec ou est encore insuffisamment évalué
- b) le cultivar a été mis à l'essai au Québec et sa performance a été trouvée inférieure à celle des cultivars témoins.
- c) le cultivar a été retiré de la liste suite à la demande du fournisseur parce que la semence n'est plus disponible
- d) Le fournisseur ne désire pas faire paraître son cultivar sur la liste.

Pour se retrouver sur la liste des cultivars recommandés, la performance d'un cultivar doit être supérieure ou tout au moins égale à celle des cultivars témoins inclus dans les essais. Seulement 5 à 10 % des cultivars expérimentaux soumis à l'évaluation sont jugés suffisamment bons pour être ajoutés à la liste des cultivars recommandés. Ceci démontre toute l'importance du réseau d'essai dans le choix de cultivars plus performants. C'est pourquoi les producteurs devraient toujours exiger de leurs fournisseurs de la semence certifiée de cultivars recommandés parce que ceux-ci ont été pleinement évalués et trouvés les plus productifs et les mieux adaptés aux conditions du Québec.

LE COÛT ECONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL DE LA RÉCOLTE, CONSERVATION ET DISTRIBUTION DES FOURRAGES SUR LES FERMES LAITIÈRES

PHILIPPE SAVOIE¹, FRÉDÉRIC PELLETIER², STÉPHANE GODBOUT², RENÉ MORISSETTE¹

¹Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), 2560 boul. Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3

²Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Québec, G1P 3W8

Courriel : philippe.savoie@agr.gc.ca

RÉSUMÉ

Un nouveau chiffrier a été développé pour estimer le coût de récolte, conservation et distribution des fourrages. Il a servi à évaluer l'impact de la mise en commun des équipements de récolte sur des fermes de 40, 80 et 160 vaches laitières. La mise en commun est bénéfique pour des fermes de 40 et 80 vaches qui utilisent une presse à petites balles rectangulaires (bénéfices nets de 4608 et 7962 \$ par entreprise, respectivement). Par contre un regroupement d'équipement à foin de deux fermes plus grandes (160 vaches chacune) crée une perte nette (-4738 \$) à cause d'importants retards d'exécution. La mise en commun d'équipement d'ensilage haché est bénéfique pour les trois regroupements considérés (deux fermes de 40, 80 et 160 vaches chacune), car l'augmentation de la capacité des équipements est plus facile que pour le foin et les retards d'exécution augmentent moins vite alors que les charges fixes diminuent rapidement (bénéfices nets de 9298, 7603 et 15291 \$ par entreprise, respectivement). La mise en commun d'équipements de récolte des fourrages pourrait être bénéfique pour accroître le profit net des entreprises et soutenir le maintien de plusieurs petites et moyennes entreprises laitières.

INTRODUCTION

Des études récentes ont montré que le coût de production des fourrages sur les fermes laitières peut varier considérablement. Par exemple, Farmer (2010) a estimé des coûts entre 118 et 271 \$ par tonne métrique sur une base de matière sèche, avec une moyenne de 168 \$/t MS. Une grande partie du coût de production des fourrages se trouve dans la récolte, la manutention, l'entreposage et la distribution aux animaux. Selon le CRAAQ (2009), les coûts de récolte, conservation et reprise du foin sec variaient entre 131 et 306 \$/t MS selon le mode de récolte (petites balles rectangulaires, balles rondes, grosses balles rectangulaires) et le volume annuel servi (entre 100 et 400 t MS). Ces coûts variaient entre 134 et 316 \$/t MS pour l'ensilage selon la structure d'entreposage et le volume annuel, entre 100 et 400 t MS servies.

Par ailleurs, les Producteurs de lait du Canada et le gouvernement canadien ont lancé une initiative de recherche en 2010, appelée la Grappe laitière, phase I (2010-2013). Un des objectifs est de promouvoir des technologies et des méthodes de gestion pour réduire le coût et l'impact environnemental de la production laitière. Dans cette perspective, divers travaux de recherche ont porté sur la réduction du temps de séchage des fourrages au champ (Morissette et Savoie, 2012) et l'utilisation d'énergies renouvelables durant le séchage du foin en grange (Morissette et Savoie, 2011). Une meilleure gestion des opérations de récolte au champ est aussi une bonne façon de réduire les pertes et de mieux valoriser la ressource fourragère (Savoie et al., 2012).

Les coopératives d'utilisation de machines agricoles (CUMA) sont un moyen efficace de réduire les coûts de récolte en répartissant les charges fixes sur plusieurs exploitations. À l'origine, les CUMA regroupaient au moins sept exploitants, mais aujourd'hui elles peuvent regrouper aussi peu que quatre exploitants pour bénéficier d'un soutien et d'un encadrement technique en France (Lefèvre, 1996; www.cuma.fr). Les CUMA se sont bien développées en Europe, mais elles ont eu un succès limité en Amérique du nord. Il demeure qu'un nouveau modèle d'utilisation des machines agricoles dans le but de réduire le coût serait attrayant pour les producteurs laitiers canadiens et québécois. Il est possible que la réduction des coûts de récolte et conservation des fourrages ait aussi un impact positif sur l'environnement, en réduisant les ressources nécessaires. Le présent travail rapporte seulement l'étude des coûts. L'hypothèse à vérifier est qu'une mise en commun de certains équipements de récolte, même au niveau de seulement deux fermes laitières, peut avoir un impact significatif sur le bénéfice net de chaque entreprise.

MÉTHODOLOGIE

Un nouveau chiffrier a été développé pour calculer le coût des machines de récolte, de manutention et de distribution des fourrages sur une ferme laitière. Les paramètres de base sont ceux proposés par le CRAAQ (2009), avec une mise à jour au niveau du prix des équipements et des intrants (carburant, films plastiques, entretien et réparation, main-d'œuvre). La méthodologie est expliquée dans Pelletier et Godbout (2012); elle est basée sur les données d'ingénierie et les normes de calcul de machinerie de l'American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE 2006; 2011).

Le chiffrier inclut les opérations suivantes pour le foin : fauche, fanage, râtelage, pressage, chargement des balles au champ, transport, déchargement à l'entrepôt, reprise, distribution aux animaux et les charges de l'entrepôt. Pour l'ensilage des fourrages hachés, il inclut la fauche, la fourragère, le transport, la mise en silo, la reprise, la distribution et les charges du silo. Le coût des retards d'exécution est estimé selon le modèle proposé par le CRAAQ, c'est-à-dire qu'un délai occasionne une perte de valeur alimentaire de 2,50 \$/t de matière sèche (MS) servie par jour en considérant la moitié de tous les jours de récolte par coupe. Cela suppose implicitement qu'on échelonne la récolte de part et d'autre de la date optimale.

L'utilisateur peut choisir entre diverses largeurs de faucheuses, faneuses et râteaux. Le chiffrier offre aussi divers choix de capacité pour le pressage, en petites balles rectangulaires, en balles rondes ou en grosses balles rectangulaires, ainsi que pour la fourragère. Il calcule la consommation de carburant pour chaque opération et peut ainsi estimer la production de gaz à effet de serre pour chacune et l'ensemble des opérations.

Au stade actuel, le chiffrier a été utilisé pour simuler seulement les résultats économiques de quelques scénarios de base, soit des entreprises de 40, 80, 160 et 320 vaches laitières. On suppose un ratio de 4,4 t MS servies par vache par année. Les méthodes de conservation examinées jusqu'ici incluent le foin en petites balles rectangulaires et en grosses balles rondes, ainsi que l'ensilage haché en silos tours.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Certaines simulations préliminaires sont illustrées aux tableaux 1 à 6. Elles montrent que le coût de récolte, entreposage et reprise diminue avec l'augmentation de la grosseur du troupeau de 40 à 320 vaches. Toutefois, le coût des retards d'exécution augmente parce qu'il faut plus de jours pour récolter des volumes de fourrages plus grands. En fait, la grosseur des équipements est augmentée généralement lorsque le volume augmente, mais pas toujours en proportion avec l'augmentation du volume, ce qui explique l'augmentation du coût des retards d'exécution.

Pour la récolte du foin en petites balles carrées (tableau 1), le coût des opérations au champ passe de 128 à 55 \$/t MS servie pour une grosseur de ferme de 40 à 320 vaches. Cependant, les coûts de retard d'exécution passent de 4 à 35 \$/t MS servie. Les coûts de reprise et distribution sont peu affectés par la grosseur de l'entreprise parce que les petites balles sont manipulées manuellement et il y a peu d'économie d'échelle à ce niveau. Quand on considère la mise en commun des machines de récolte pour deux fermes de 40 vaches (tableau 2), l'économie des opérations au champ est de 29 \$/t MS tandis que les retards d'exécution coûteront en moyenne 3 \$/t MS de plus, pour un gain net de 26 \$/t MS ou 4608 \$ par entreprise. La mise en commun des équipements de foin de petites balles pour deux entreprises de 80 vaches est légèrement moins bénéfique par unité de fourrage (23 \$/t MS), mais l'économie nette demeure assez intéressante par entreprise, soit 7962 \$ à cause du volume accru de fourrage. Quand deux grandes fermes de 160 vaches mettent leur équipement de foin en petites balles ensemble, il y a alors une perte nette (-7 \$/t MS ou -4738 \$ par entreprise) à cause des grands délais de récolte et de la perte de valeur nutritive. Le modèle n'a pas été optimisé dans ce cas, car il faudrait considérer un chantier beaucoup plus performant ou un équipement à très haute capacité comme les presses à grosses balles rectangulaires. Néanmoins, on voit clairement qu'il y a une limite économique à mettre en commun certains équipements à cause des retards d'exécution.

Pour la récolte du foin en balles rondes (tableaux 3 et 4), le coût des opérations au champ passe de 111 à 57 \$/t MS servie pour une grosseur de ferme de 40 à 320 vaches. Cependant, les coûts de retard d'exécution passent de 4 à 31 \$/t MS servie. Les coûts de reprise, distribution et bâtiment baissent aussi avec une grosseur de l'entreprise (80 à 71 \$), mais beaucoup moins rapidement que ceux des opérations de récolte. Quand on considère la mise en commun des machines de récolte de balles rondes (tableau 4), l'économie nette des opérations au champ moins le coût accru des retards d'opération est de 25 \$/t MS pour deux fermes de 40 vaches, 7 \$/t MS pour deux fermes de 80 vaches et -4 \$/t MS pour deux entreprises de 160 vaches (4319, 2545 et -2985 \$ par entreprise, respectivement). La mise en commun d'un chantier de balles rondes de foin peut être bénéfique pour deux fermes de 40 vaches, mais elle est peu intéressante pour des entreprises de plus de 80 vaches.

Pour la récolte d'ensilage haché entreposé en silos tours (tableaux 5 et 6), le coût des opérations au champ passe de 175 à 67 \$/t MS servie pour une grosseur de ferme de 40 à 320 vaches. Cependant, les coûts de retard d'exécution passent de 8 à 20 \$/t MS servie. Les coûts de reprise, distribution et silos baissent aussi avec une grosseur de l'entreprise (94 à 57 \$), mais moins rapidement que ceux des opérations de récolte. Quand on considère la mise en commun des machines de récolte d'ensilage haché (tableau 6), l'économie nette des opérations au champ moins le coût accru des retards d'opération est de 53 \$/t MS pour deux fermes de 40 vaches, 29 \$/t MS pour deux fermes de 80 vaches et 26 \$/t MS pour deux entreprises de 160 vaches (9298,

7603 et 15 291 \$ par entreprise, respectivement). La mise en commun d'un chantier d'ensilage haché est donc toujours bénéfique peu importe la grosseur des fermes entre 40 et 160 vaches. Le bénéfice par tonne de fourrage servie est plus grand pour les petites entreprises.

Quelques simulations préliminaires avec le nouveau chiffrier de calcul montrent clairement l'intérêt de mettre en commun des équipements de récolte. Le bénéfice de la mise en commun est clair pour au moins deux fermes de 40 vaches laitières qui utilisent comme principal système de récolte la presse à petites balles rectangulaire ou la presse à balles rondes. Lorsque le système de récolte est l'ensilage haché, il y a un intérêt important à mettre en commun les équipements pour deux fermes jusqu'à 160 vaches chacune. Le modèle doit être validé avec des données réelles de ferme et il doit faire l'objet de plusieurs sous-optimisations pour chaque opération, comme la faucheuse ou le râteau le plus approprié pour une situation donnée. La mise en commun des machines de récolte suppose aussi la bonne entente dans un partenariat d'affaire. L'exemple français des CUMA à plusieurs membres devrait aussi être considéré pour réduire le coût de récolte, augmenter le revenu net et favoriser le maintien de plusieurs petites et moyennes entreprises en production laitière.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les Producteurs de lait du Canada et Agriculture et Agroalimentaire Canada pour leur soutien dans le cadre de la Grappe laitière, phase I (2010-2013).

LISTE DES OUVRAGES CITÉS

- ASABE. 2006. Agricultural Machinery Management. ASAE EP496.3 FEB2006. 6 pages.
- ASABE. 2011. Agricultural Machinery Management Data. ASAE D497.7 MAR2011. 8 pages.
- CRAAQ. 2009. Foin en balles rectangulaires entreposées pêle-mêle – Frais de récolte, de conservation et de reprise. AGDEX 732/821j. Février 2009. 7 pages.
- Farmer, B. 2010. La production laitière au Québec en 2010 : défis et solutions. 17 pages.
Disponible à : <http://www.agrireseau.qc.ca/bovinslaitiers/documents/farmer.pdf>
- Lefèvre, D. 1996. A l'ombre des machines : Les Cuma, 50 ans de solidarités locales. 217 pages.
Editions Entraid, Paris.
- Morissette, R. et P. Savoie. 2011. Le séchage artificiel du foin avec l'énergie solaire et la biomasse. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages, Victoriaville, le 15 février. Pages 32 à 41. CQPF CRAAQ. Disponible sur le site:
<http://www.agrireseau.qc.ca/>
- Morissette, R. et P. Savoie. 2012. Effet du macérateur, de la faneuse et de la séquence des passages sur le séchage du foin au champ. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages, Victoriaville, le 21 février. Pages 9 à 17. CQPF CRAAQ.
- Pelletier, F. et S. Godbout. 2012. Analyse des systèmes de récolte et de conservation des fourrages sur les entreprises laitières au Canada. 25 pages. Projet IRDA # 200028.
Rapport d'étape no. 2 présenté à Agriculture et Agroalimentaire Canada, 26 mars 2012.
- Savoie, P. E. Caron et G.F. Tremblay. 2012. Méthodes de fenaison pour réduire les pertes. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages, Victoriaville, le 21 février. Pages 38 à 47. CQPF CRAAQ. Disponible sur le site: <http://www.agrireseau.qc.ca/>

Tableau 1. Frais (en \$/t de matière sèche servie) pour la récolte, l'entreposage et la reprise du foin récolté sec et pressé en petites balles rectangulaires pour des fermes de 40, 80, 160 et 320 vaches.

Opérations	40 vaches	80 vaches	160 vaches	320 vaches
Fauchage	30,44	25,23	18,08	16,24
Fanage	12,59	11,01	7,22	5,08
Râtelage	8,60	6,13	4,59	3,75
Pressage	28,75	16,11	10,89	9,69
Chargement	18,70	18,21	9,78	8,07
Transport	16,38	9,97	6,73	4,39
Mise en entrepôt	12,59	12,26	9,78	8,07
Sous-total du champ à l'entrepôt	128,05	98,92	67,07	55,29
Reprise	12,59	12,26	9,78	8,07
Distribution	23,82	23,82	23,82	23,82
Sous-total de toutes les opérations	164,46	135,00	100,67	87,18
Bâtiment	40,97	38,90	37,88	37,36
Retards d'exécution	3,98	6,93	16,16	34,67
Total (\$/t MS)	209,41	180,83	154,71	159,21

Tableau 2. Frais (en \$/t MS servie) pour le foin en petites balles rectangulaires quand il y a regroupement de deux fermes pour les opérations de récolte.

Opérations	Deux fermes de 40 vaches	Deux fermes de 80 vaches	Deux fermes de 160 vaches
Fauchage	25,23	18,08	16,24
Fanage	11,01	7,22	5,08
Râtelage	6,13	4,59	3,75
Pressage	16,11	10,89	9,69
Chargement	18,21	9,78	8,07
Transport	9,97	6,73	4,39
Mise en entrepôt	12,26	9,78	8,07
Sous-total du champ à l'entrepôt	98,92	67,07	55,29
Reprise	12,59	12,26	9,78
Distribution	23,82	23,82	23,82
Sous-total de toutes les opérations	135,33	103,15	88,89
Bâtiment	40,97	38,9	37,88
Retards d'exécution	6,93	16,16	34,67
Total (\$/t MS)	183,23	158,21	161,44
Réduction des coûts de récolte (\$/t MS)	29,13	31,85	11,78
Augmentation des retards (\$/t MS)	2,95	9,23	18,51
Bénéfice net du regroupement (\$/t MS)	26,18	22,62	-6,73
Bénéfice net par ferme (\$/an)	4607,68	7962,24	-4737,92

Tableau 3. Frais (en \$/t de matière sèche servie) pour la récolte, l'entreposage et la reprise du foin récolté sec et pressé en balles rondes pour des fermes de 40, 80, 160 et 320 vaches.

Opérations	40 vaches	80 vaches	160 vaches	320 vaches
Fauchage	30,57	22,12	20,38	16,37
Fanage	12,75	11,15	7,05	5,22
Râtelage	8,71	6,2	4,61	4,67
Pressage	30,54	18,63	13,11	9,91
Chargement	9,43	9,07	8,88	8,78
Transport	14,67	12,16	8,81	7,84
Mise en entrepôt	3,92	3,77	3,7	3,66
Sous-total du champ à l'entrepôt	110,59	83,1	66,54	56,95
Reprise	7,54	7,25	7,09	7,02
Distribution	21,11	18,37	17,1	16,45
Sous-total de toutes les opérations	139,24	108,72	90,73	79,91
Bâtiment	51,36	49,31	48,28	47,76
Retards d'exécution	4,07	7,02	16,35	30,68
Total (\$/t MS)	194,67	165,05	155,36	158,35

Tableau 4. Frais (en \$/t MS) pour le foin en balles rondes quand il y a regroupement de deux fermes pour les opérations de récolte.

Opérations	Deux fermes de 40 vaches	Deux fermes de 80 vaches	Deux fermes de 160 vaches
Fauchage	22,12	20,38	16,37
Fanage	11,15	7,05	5,22
Râtelage	6,20	4,61	4,67
Pressage	18,63	13,11	9,91
Chargement	9,07	8,88	8,78
Transport	12,16	8,81	7,84
Mise en entrepôt	3,77	3,70	3,66
Sous-total du champ à l'entrepôt	83,10	66,54	56,45
Reprise	7,54	7,25	7,09
Distribution	21,11	18,37	17,10
Sous-total de toutes les opérations	111,75	92,16	80,64
Bâtiment	51,36	49,31	48,28
Retards d'exécution	7,02	16,35	30,68
Total (\$/t MS)	170,13	157,82	159,60
Réduction des coûts de récolte (\$/t MS)	27,49	16,56	10,09
Augmentation des retards (\$/t MS)	2,95	9,33	14,33
Bénéfice net du regroupement (\$/t MS)	24,54	7,23	-4,24
Bénéfice net par ferme (\$/an)	4319,04	2544,96	-2984,96

Tableau 5. Frais (en \$/t de matière sèche servie) pour la récolte, l'entreposage et la reprise de l'ensilage haché en silos tour pour des fermes de 40, 80, 160 et 320 vaches.

Opérations	40 vaches	80 vaches	160 vaches	320 vaches
Fauchage	37,02	25,58	24,17	17,61
Fanage	0,00	0,00	0,00	0,00
Râtelage	0,00	0,00	0,00	0,00
Pressage	89,16	55,26	45,79	33,37
Chargement	0,00	0,00	0,00	0,00
Transport	29,53	24,70	13,03	9,36
Mise en entrepôt	19,52	16,59	10,29	6,95
Sous-total du champ à l'entrepôt	175,23	122,13	93,28	67,29
Reprise	38,40	30,82	17,54	13,55
Distribution	21,00	19,13	12,63	10,19
Sous-total de toutes les opérations	234,63	172,08	123,45	91,03
Bâtiment	34,53	33,76	33,26	32,93
Retards d'exécution	7,76	8,03	15,28	19,55
Total (\$/t MS)	276,92	213,87	171,99	143,51

Tableau 6. Frais (en \$/t MS) pour l'ensilage haché en silo tour quand il y a regroupement de deux fermes pour les opérations de récolte.

Opérations	Deux fermes de 40 vaches	Deux fermes de 80 vaches	Deux fermes de 160 vaches
Fauchage	25,58	24,17	17,61
Fanage	0,00	0,00	0,00
Râtelage	0,00	0,00	0,00
Pressage	55,26	45,79	33,37
Chargement	0,00	0,00	0,00
Transport	24,70	13,03	9,36
Mise en entrepôt	16,59	10,29	6,95
Sous-total du champ à l'entrepôt	122,13	93,28	67,29
Reprise	38,40	30,82	17,54
Distribution	21,00	19,13	12,63
Sous-total de toutes les opérations	181,53	143,23	97,46
Bâtiment	34,53	33,76	33,26
Retards d'exécution	8,03	15,28	19,55
Total (\$/t MS)	224,09	192,27	150,27
Réduction des coûts de récolte (\$/t MS)	53,10	28,85	25,99
Augmentation des retards (\$/t MS)	-0,27	-7,25	-4,27
Bénéfice net du regroupement (\$/t MS)	52,83	21,60	21,72
Bénéfice net par ferme (\$/an)	9298,08	7603,20	15290,88

POTENTIEL D'UTILISATION DE LA CHICOREE ET DU LOTIER COMME PLANTES FOURRAGERES POUR LES VACHES LAITIERES

ELSA VASSEUR^{1*}, LOUIS ROUSSEAU^{2*}, DANIELLE LOMBARDI¹, ROBERT BERTHIAUME³, TREVOR DEVRIES⁴, DENIS LAFRANCE², RENÉE BERGERON¹

¹Centre de production laitière biologique d'Alfred, Université de Guelph – Campus d'Alfred, Alfred, Ontario. ²CETAB+, Victoriaville, Québec, ³Agriculture et Agroalimentaire Canada, Lennoxville, Québec. ⁴Université de Guelph – Campus de Kemptville, Kemptville, Ontario
Courriels : evasseur@alfredc.uoguelph.ca et rousseau.louis@cgpvicto.qc.ca

Les fourrages tannifères tels que la chicorée (*Cichorium intibus*) et le lotier corniculé (*Lotus corniculatus*) contiennent des concentrations plus élevées de tannins condensés (TC) que les fourrages réguliers. Les TC sont des composés secondaires de plantes avec des propriétés antihelminthiques (Barry, 1998 ; Barry et McNabb, 1999) présentant aussi un potentiel de réduction du ballonnement et d'amélioration de l'utilisation de l'azote chez les ruminants (McMahon et coll., 2000). La présence de TC donne aux plantes un goût amer, mais les glucides non-structuraux peuvent mitiger l'amertume grâce à leur palatabilité accrue (Smit et coll., 2006), tandis que la teneur en glucides non structuraux des fourrages peut varier en fonction du temps de récolte (Orr et coll., 2001). La chicorée est également une plante fourragère possédant un haut contenu en différents minéraux (Mogensen et coll., 2008). Son profond système racinaire lui confère également une bonne résistance à la sécheresse (Guangdi et Kemp, 2005).

Trois études ont été menées conjointement pour identifier le potentiel d'utilisation de la chicorée et du lotier comme plantes fourragères ayant des caractéristiques pouvant améliorer la santé et le bien-être des vaches laitières. Les études menées au Centre de production laitière biologique d'Alfred avaient pour objectifs de déterminer la consommation volontaire (Étude 1) et la préférence (Étude 2) des vaches pour la chicorée et le lotier récoltés à des moments différents de la journée. L'étude 3 menée par le Centre d'expertise et de transfert en agriculture biologique et de proximité (CETAB+), avait pour objectif de tester le potentiel d'utilisation de plusieurs espèces de plantes fourragères et d'herbes au pâturage, dont la chicorée et le lotier.

MATERIEL & METHODES

Déterminer la consommation volontaire (Étude 1) et la préférence (Étude 2).

Quatorze vaches Holstein du troupeau du Centre de production laitière biologique d'Alfred ont été utilisées pour l'Étude 1 et 8 vaches pour l'Étude 2 (moyenne (\pm ÉT) des parités: 2,57 \pm 1,63 et jours en lait (JEL): 179,67 \pm 117,50). Sept fourrages ont été testés: chicorée récoltée à 700 h (CHICAM) et 1800 h (CHICPM), lotier récolté à 700 h (BIRDAM) et 1800 h (BIRDPM), ensilage préfané de lotier récolté à 700 h (BIHAYAM) et 1800 h (BIHAYPM) et ensilage de luzerne (90 %) de troisième coupe (CONTROL). Dans l'Étude 1, toutes les vaches ont été exposées une fois à chacun des fourrages servis à volonté (Carré latin 7 x 7) pendant 30 min. Dans l'Étude 2, chaque combinaison possible de deux fourrages (21) parmi les 7 fourrages a été offerte aux vaches pendant 30 min, à volonté. Le poids des fourrages avant et après a été mesuré pour chaque vache et analysé avec la procédure MIXED de SAS (Étude 1) et la procédure MDS de SAS (Étude 2).

Potentiel d'utilisation au pâturage (Étude 3).

Dix-huit espèces de plantes fourragères ont été implantées chez deux producteurs laitiers biologiques du Centre-du-Québec. Parmi celles-ci figurent la chicorée (*Cichorium intibus*) et le lotier corniculé (*Lotus corniculatus*). Des mesures de consommation au pâturage ont été effectuées en prenant les rendements avant et après le passage des vaches. Le contenu en différents minéraux des plantes a également analysé.

RESULTATS

Étude 1. La consommation volontaire a été plus élevée pour les fourrages CONTROL, BIHAYPM et BIHAYAM ($P < 0.01$). Une plus faible consommation volontaire a été mesurée pour les fourrages frais CHICAM, CHICPM, BIRDAM, et BIRDPM, peu importe le temps de récolte.

Étude 2. Le fourrage BIHAYPM a été consommé préférentiellement par rapport aux autres fourrages, suivi par le CONTROL et le BIHAYAM. Aucune préférence n'a été notée parmi les fourrages frais. Les fourrages frais ont été moins consommés, peu importe leur temps de récolte.

Étude 3. Les vaches ont consommé une moyenne d'environ 60 % de la chicorée et du lotier disponible pendant l'été. La chicorée présente des taux de zinc, de calcium et de manganèse plus importants que les autres plantes fourragères à l'étude. Au niveau des minéraux, le lotier présente des valeurs similaires à celles du trèfle blanc.

DISCUSSION & CONCLUSIONS

Étude 1. Lorsqu'elles ont fait face à une seule option, les vaches ont consommé les 7 fourrages, mais relativement moins de chicorée et de lotier frais, peu importe le temps de récolte.

Étude 2. Lorsqu'elles ont eu le choix entre deux options, les vaches ont préféré les ensilages préfanés (témoin et tannifères) aux fourrages tannifères frais. Le temps de récolte n'a pas eu d'effet sur la préférence lorsque les fourrages étaient servis frais.

Étude 3. La chicorée présente des caractéristiques intéressantes dans un contexte de pâturage multi-espèces. Le lotier est apprécié des animaux au pâturage, mais semble avoir de la difficulté à rivaliser avec des graminées bien établies.

LISTE DES OUVRAGES CITÉS

- Barry, T.N. et W.C. McNabb. 1999. The implications of condensed tannins on the nutritive value of temperate forages fed to ruminants. *Br. J. Nutr.* 81:263-272.
- Barry, T.N. 1998. The feeding value of chicory (*Cichorium intybus*) for ruminant livestock. *J. Agr. Sci.* 131: 251-257.
- Guangdi, L. et P. D. Kemp. 2005. Forage chicory (*Cichorium intybus*) : A review of its agronomy and animal production. *Advances in Agronomy* 8:187-222.
- Mogensen, L., T. Kristensen, K. Søgaard et S.K. Jensen. 2008. How can the organic dairy farmer be self-sufficient with vitamins and minerals? 16th IFOAM Organic World Congress, Modena, Italie, 16-20 Juin 2008. <http://orgprints.org/12233>
- McMahon, L.R., T.A. McAllister, B.P. Berg, W. Majak, S.N. Acharya, J.D. Popp, B.E. Coulman, Y. Wang et K.J. Cheng. 2000. A review of the effects of forage condensed tanning on ruminal fermentation and bloat in grazing cattle. *Can. J. Plant. Sci.* 80: 469-485.
- Smit, H.J., S. Tamminga et A. Elgersma. 2006. Dairy cattle grazing preference among six cultivars of perennial ryegrass. *Agronomy Journal* 98: 1213-1220.
- Orr, R.J., S.M. Rutter, P. D. Penning et A. J. Rook. 2001. Matching grass supply to grazing patterns for dairy cows. *Grass For. Sci.* 56:352-361.

COMPOSITION CHIMIQUE DE CERTAINS CULTIVARS D'ESPÈCES FOURRAGÈRES FAUCHÉES EN DÉBUT ET EN FIN DE JOURNÉE

AMÉLIA DOS PASSOS BERNARDES¹, GAËTAN TREMBLAY¹, GILLES BÉLANGER¹, ÉDITH CHARBONNEAU², ROBERT BERTHIAUME³

¹Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2560 Boul. Hochelaga, Québec, ²Université Laval, Département des sciences animales, Québec, ³Valacta, Saint-Anne-de-Bellevue, Québec.

Courriel : amelia.bernardes@agr.gc.ca

La teneur en glucides non-structuraux (**GNS**) du fourrage varie en fonction de l'espèce et de l'heure de fauche (Pelletier et coll., 2010). La fauche en fin d'après-midi cause une augmentation de la teneur en GNS du fourrage et l'intensité de cette augmentation varie d'une espèce fourragère à l'autre et d'une coupe à l'autre. Dans la présente étude, nous avons voulu vérifier si ces variations étaient aussi influencées par les cultivars chez certaines espèces de plantes fourragères.

Sept espèces fourragères, avec entre un et sept cultivars par espèce, ont été semées en parcelles de démonstration à la ferme de Sémican inc. (*i*- Luzerne: cultivars #1 à 7; *ii*- Trèfle rouge : cv. #8 à 12; *iii*- Fléole des prés : cv. #13 à 16; *iv*- Fétuque élevée : cv. #17; *v*- Brome inerme : cv. # 18; *vi*- Dactyle pelotonné : cv. #19; *vii*- Ray-grass : cv. #20). Ces parcelles ont été récoltées lors de deux années de production, soit en 2011 et 2012, au rythme de deux coupes par année (1^{re} en juin et 2^e en juillet) et de deux heures de fauche (9h00 AM vs. 16h00 PM) par coupe. Le rendement de chaque parcelle a été mesuré en 2012. Un échantillon de 500 g a été prélevé à la récolte de chaque parcelle et mis à congeler rapidement. Ils ont ensuite été séchés à 55°C et moulus à 1 mm à l'aide d'un moulin de type Wiley. Ces échantillons ont été par la suite analysés, en utilisant la spectroscopie dans le proche infra-rouge (NIRS), pour leur teneurs en sucres solubles (**SS**), amidon, glucides non-structuraux (**GNS** = **SS** + amidon), azote total (**N total**), fibres insolubles au détergent acide (**ADF**), fibres insolubles au détergent neutre (**NDF**), azote liée à la fibre NDF (**N-NDF**), gras, cendres, nitrates et pouvoir tampon, de même que pour la digestibilité *in vitro* de la matière sèche (**DIVMS**) et la digestibilité *in vitro* du NDF (**dNDF**) après une incubation de 48 heures avec du liquide ruminal (Pelletier et al., 2010).

EFFET DE L'ESPÈCE FOURRAGÈRE

Le rendement (Tableau 1) et les teneurs en SS, amidon et GNS (Tableau 2) ont varié significativement entre les espèces. La teneur en SS était élevée chez le ray-grass annuel et le dactyle pelotonné, intermédiaire dans le brome inerme, la fétuque élevée, le trèfle rouge et la fléole des prés, et faibles dans la luzerne. Quant à la teneur en amidon, elle était élevée dans les légumineuses (trèfle rouge et la luzerne), intermédiaire dans le dactyle pelotonné, le ray-grass, le brome inerme et la fétuque élevée, et faible dans la fléole des prés. Le ray-grass annuel et le dactyle pelotonné étaient les plus riches en GNS, le brome inerme, le trèfle rouge, la luzerne et la fétuque élevée avaient des teneurs intermédiaires alors que la fléole des prés était la plus pauvre. Les autres paramètres de valeur nutritive ont varié significativement entre les espèces (Tableau 2). La DIVMS a varié entre 819 et 883 g/kg MS alors que la dNDF a varié entre 546 et 765 g/kg NDF entre les espèces.

Dans la comparaison entre espèces, il faut tenir compte du fait que le nombre de cultivars variait entre 4 et 7 pour trois des espèces étudiées alors qu'il était seulement de un pour les quatre autres espèces, ce qui rend la comparaison moins puissante. En ce sens, il est plus correct de s'en tenir à la luzerne, au trèfle rouge et à la fléole des prés pour la comparaison entre les espèces de cet essai.

EFFET DES CULTIVARS

Chez la luzerne, l'effet des cultivars n'était pas significatif sur le rendement de 2012 (Tableau 1). Chez la fléole des prés, l'effet des cultivars était significatif seulement pour le rendement en 2^e coupe; le cultivar #10 aurait un regain supérieur à celui des autres cultivars. Le rendement total des deux premières coupes n'était pas affecté par les cultivars autant pour la luzerne que pour la fléole des prés.

En ce qui concerne la valeur nutritive du fourrage de luzerne, l'effet des cultivars était significatif seulement pour la dNDF et le N-NDF (Tableau 3). Les cultivars #1 et 4 avaient des dNDF faibles, les cultivars #3, 7, 6 et 2 avaient des dNDF intermédiaires, alors que le cultivar #5 avait une dNDF élevée. Le cultivar #4 avait une teneur faible alors que les cultivars #3 et 5 avaient une teneur élevée en N-NDF.

Chez le trèfle rouge, l'effet des cultivars était significatif pour tous les paramètres de valeur nutritive (Tableau 3). Comparé aux autres cultivars étudiés, le cultivar #12 avait des teneurs en GNS et SS élevées, une teneur en N total faible, des teneurs en ADF et NDF élevées, ainsi qu'une dNDF et un pouvoir tampon faibles. La teneur en GNS était intermédiaire, les teneurs en ADF et NDF étaient plus faibles alors que les digestibilités de la MS et du NDF étaient plus élevées pour le cultivar #10.

Chez la fléole des prés, le cultivar #14 avait une DIVMS et une dNDF plus faible que les cultivars #13 et 16. Les autres paramètres de valeur nutritive n'étaient pas affectés par les cultivars (Tableau 3).

EFFET DE L'HEURE DE FAUCHE

La fauche PM a causé une augmentation significative des teneurs en GNS et SS de la luzerne, du trèfle rouge et de la fléole de prés. La teneur en amidon des deux légumineuses (luzerne et trèfle rouge) était aussi plus élevée lors d'une fauche PM. Chez le trèfle rouge, la fauche PM a causé une grande augmentation de la teneur en GNS et amidon en 2^e qu'en 1^{re} coupe (interaction Coupe × Fauche significative).

La fauche PM était aussi associée à une baisse de la teneur en N total de la luzerne et du trèfle rouge, de même qu'à une baisse du pouvoir tampon du fourrage de luzerne, de trèfle rouge et de fléole de prés (Tableau 3). La fauche PM a aussi causé une diminution des teneurs en ADF, en NDF et en N-NDF du fourrage de trèfle rouge (Tableau 3).

EFFET DE LA COUPE

La teneur en amidon était plus élevée dans le fourrage de 2^e coupe pour la luzerne, le trèfle rouge et la fléole des prés (Tableau 3). Les SS étaient plus élevés en 2^e coupe chez les légumineuses seulement. La teneur en GNS était similaire aux deux coupes chez la luzerne, plus élevée en première coupe chez le trèfle rouge et plus faible en première coupe chez la fléole des prés.

Chez la luzerne, l'effet de la coupe était significatif pour tous les paramètres de la valeur nutritive, sauf la teneur en GNS. Le fourrage de luzerne de première coupe était en général de meilleure qualité que celui de deuxième coupe : teneurs en SS et en N total plus élevées, teneurs

en amidon, ADF, NDF et N-NDF plus faibles, et digestibilités de la MS et du NDF plus élevées. Le fourrage de luzerne de 2^e coupe avait un pouvoir tampon plus faible que celui de 1^{ère} coupe.

Chez le trèfle rouge, les teneurs en N total, NDF et N-NDF étaient plus élevées en première plutôt qu'en deuxième coupe (Tableau 3). Le fourrage de fléole des prés de deuxième coupe était plus riche en N total et N-NDF, moins riche en ADF et NDF, et plus digestible que celui de première coupe.

CONCLUSIONS

La luzerne et le trèfle rouge avaient une teneur en GNS plus élevée que la fléole des prés, et ce, parce que leur teneur en amidon était plus élevée. La variation dans la teneur en GNS entre cultivars était significative seulement chez le trèfle rouge; le cultivar #12 étant le plus riche.

Une variation importante de la valeur nutritive du fourrage a été observée entre les différentes espèces fourragères. Les digestibilités de la matière sèche et de la fibre NDF étaient plus élevées chez la fléole des prés, intermédiaires chez le trèfle rouge et plus faibles chez la luzerne. La variation de la valeur nutritive entre les cultivars était plus faible que celle observée entre les espèces mais une variation significative de la digestibilité de la fibre NDF a toutefois été observée entre les cultivars de luzerne, de trèfle rouge et de fléole des prés.

L'effet de la coupe sur la teneur en GNS du fourrage était variable en fonction de l'espèce fourragère. Chez la luzerne, le fourrage de première coupe était plus digestible que celui de deuxième coupe, alors que chez la fléole des prés, celui de deuxième coupe était plus digestible que celui de première coupe.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée conjointement par Sémican inc. et Agriculture et Agroalimentaire Canada dans le cadre du « Programme d'innovation en agriculture ».

LISTE DES OUVRAGES CITÉS

Pelletier, Sophie, Gaëtan F. Tremblay, Gilles Bélanger, Annick Bertrand, Yves Castonguay, Denis Pageau et Raynald Drapeau. 2010. Forage nonstructural carbohydrates and nutritive value as affected by time of cutting and species. *Agronomy Journal*, 102: 1388-1398.

Tableau 1. Rendement en matière sèche de six espèces fourragères (moyennes de 2 coupes et 2 heures de fauche par coupe) récoltées en 2012.

Espèces (# cultivars)	Coupe 1	Coupe 2		Total
	t MS ha ⁻¹			
Luzerne (7)	3.1 ^C	2.5 ^B		5.5 ^B
#1	3.0	2.4		5.4
#2	3.3	2.6		5.9
#3	2.8	2.5		5.3
#4	3.2	2.2		5.4
#5	3.0	2.6		5.7
#6	3.0	2.3		5.2
#7	3.3	2.5		5.8
Fléole de près (4)	4.4 ^{AB}	3.1 ^A		7.3 ^A
#13	5.1	3.2 ^{ab}		8.3
#14	3.9	2.9 ^b		6.8
#15	4.9	3.8 ^a		8.7
#16	3.8	2.5 ^b		5.6
Fétuque élevée (1)	5.0 ^{AB}	2.9 ^{AB}		7.9 ^{AB}
Brome des près (1)	3.0 ^{BC}	2.8 ^{AB}		5.8 ^{AB}
Dactyle pelotonné (1)	4.4 ^{ABC}	2.5 ^{AB}		6.9 ^{AB}
Ray-grass annuel (1)	5.4 ^A	2.8 ^{AB}		8.2 ^{AB}

^{ABC} Sur une même colonne, les moyennes suivies de lettres majuscules différentes sont significativement différentes ($P < 0.05$).

^{abc} Pour une même espèce et sur une même colonne, les moyennes suivies de lettres minuscules différentes sont significativement différentes ($P < 0.05$).

Tableau 2. Composition chimique du fourrage de six espèces fourragères (moyennes de 2 ans, 2 coupes par an et 2 heures de fauche par coupe).

Espèce (# cultivars)	GNS*	SS	Amidon	N total	g/kg MS				DIVMS	dNDF	N-NDF	Pouvoir tampon
					ADF	NDF	Gras	Cendres				
Luzerne (7)	72.4 ^b	43.7 ^c	28.2 ^a	31.1 ^b	340 ^c	412 ^d	40.7 ^c	99.8 ^b	815 ^d	546 ^d	3.9 ^e	88.7 ^a
Trèfle rouge (5)	73.4 ^b	50.5 ^d	22.1 ^b	34.0 ^a	287 ^d	409 ^d	47.8 ^a	109.3 ^a	883 ^a	712 ^b	13.3 ^a	91.3 ^a
Fléole des prés (4)	57.4 ^c	49.1 ^d	8.1 ^d	22.3 ^c	363 ^a	597 ^a	68.8 ^b	74.6 ^c	854 ^{bc}	752 ^a	7.6 ^b	55.3 ^c
Fétuque élevée (1)	65.6 ^{bc}	54.0 ^{cde}	11.7 ^c	23.3 ^c	357 ^{ab}	583 ^a	40.1 ^c	87.5 ^c	819 ^d	681 ^c	5.7 ^d	64.1 ^{cd}
Brome inerme (1)	77.6 ^{ab}	64.0 ^{bc}	13.3 ^c	21.9 ^c	360 ^a	578 ^a	46.6 ^{bc}	78.1 ^{de}	842 ^c	717 ^b	7.2 ^{bc}	56.3 ^{de}
Dactyle pelotonné (1)	97.4 ^a	79.5 ^{ab}	18.9 ^{bc}	24.2 ^c	321 ^c	458 ^c	50.6 ^b	96.2 ^b	879 ^a	731 ^{ab}	6.0 ^{cd}	77.7 ^b
Ray-grass annuel (1)	98.1 ^a	83.2 ^a	16.0 ^{bc}	22.5 ^c	335 ^{bc}	530 ^b	43.6 ^{bc}	85.6 ^{cd}	873 ^{ab}	765 ^a	5.0 ^{de}	69.6 ^{bc}

*GNS = Glucides non structuraux = Sucres solubles (SS) + amidon; DIVMS = Digestibilité *in vitro* de la matière sèche; dNDF = Digestibilité *in vitro* du NDF.

^{abc} Sur une même colonne, les moyennes suivies de lettres minuscules différentes sont significativement différentes ($P < 0.05$).

Tableau 3. Effets des cultivars, de la coupe et de l'heure de fauche sur la composition du fourrage de luzerne, de trèfle rouge et de fléole des prés [moyennes de 2 ans de production (2011 et 2012) pour la luzerne et la fléole des prés et moyennes d'une année (2011) pour le trèfle rouge].

	GNS*	SS	Amidon	N total	ADF	NDF	Gras	Cendres	DIVMS	dNDF	N-NDF	Pouvoir tampon
	g/kg MS									g/kg NDF	g/kg MS	g ac. lact./kg MS
LUZERNE – Effet Cultivars												
#1	78.3	46.1	32.2	30.4	344	412	39.3	99	807	528 ^c	3.5 ^{bc}	86.0
#2	67.0	41.0	26.2	31.7	338	411	39.2	101	818	557 ^{ab}	4.0 ^{ab}	91.4
#3	78.5	45.2	32.1	31.0	338	413	42.4	100	819	542 ^{bc}	4.2 ^a	86.2
#4	72.4	43.2	28.7	30.5	346	414	39.4	98	804	525 ^c	3.4 ^c	87.8
#5	67.7	41.7	26.2	31.5	335	416	40.3	100	822	570 ^a	4.3 ^a	90.6
#6	68.4	44.0	24.5	30.7	342	412	42.5	103	815	554 ^{ab}	4.0 ^{ab}	88.9
#7	74.1	44.3	29.4	31.8	335	402	41.5	98	819	548 ^{abc}	3.9 ^{abc}	90.1
Effet Coupe												
1 ^{ère}	72.8	47.7 ^a	25.3 ^b	32.4 ^a	331 ^b	404 ^b	42.6 ^a	102 ^a	829 ^a	571 ^a	4.1 ^a	99.0 ^a
2 ^e	71.8	39.5 ^b	32.2 ^a	29.8 ^b	348 ^a	419 ^a	38.8 ^b	98 ^b	800 ^b	522 ^b	3.7 ^b	78.4 ^b
Effet Fauche												
AM	63.3 ^b	39.7 ^b	23.0 ^b	31.8 ^a	340	410	40.4	101	816	544	4.1	91.3 ^a
PM	81.3 ^a	47.5 ^a	34.9 ^a	30.4 ^b	339	413	40.9	98	814	549	3.7	86.1 ^b
TRÈFLE ROUGE – Effet cultivars												
#8	67.9 ^b	42.6 ^c	24.0 ^a	35.8 ^a	282 ^{bc}	406 ^b	66.4 ^b	113 ^a	890 ^a	726 ^{ab}	14.6 ^a	96.5 ^{ab}
#9	70.7 ^b	47.7 ^{bc}	22.4 ^{ab}	33.7 ^b	291 ^{ab}	418 ^a	65.3 ^b	109 ^b	878 ^b	701 ^c	13.8 ^{ab}	89.6 ^c
#10	74.6 ^{ab}	50.0 ^{bc}	23.7 ^{ab}	35.8 ^a	274 ^c	387 ^c	70.3 ^b	111 ^{ab}	899 ^a	736 ^a	13.0 ^{bc}	98.9 ^a
#11	72.2 ^b	51.8 ^b	19.4 ^c	33.3 ^{bc}	289 ^{ab}	415 ^{ab}	64.3 ^b	112 ^a	878 ^b	707 ^{bc}	13.3 ^{bc}	90.9 ^{bc}
#12	81.7 ^a	60.3 ^a	21.1 ^{bc}	31.5 ^c	297 ^a	418 ^a	77.8 ^a	102 ^c	869 ^b	690 ^c	11.9 ^c	80.8 ^d
Effet Coupe												
1 ^{ère}	85.9 ^a	65.1 ^a	20.7 ^b	32.3 ^b	286	404 ^b	69.6	106 ^b	882	707	11.5 ^b	89.2 ^b
2 ^e	61.0 ^b	35.9 ^b	23.5 ^a	35.7 ^a	288	414 ^a	68.0	112 ^a	883	717	15.1 ^a	93.4 ^a
Effet Fauche												
AM	56.6 ^b	41.0 ^b	15.5 ^b	35.1 ^a	292 ^a	416 ^a	68.6	111 ^a	881	717	14.2 ^a	94.9 ^a
PM	90.2 ^a	59.9 ^a	29.8 ^a	32.9 ^b	282 ^b	402 ^b	69.1	107 ^b	884	707	12.5 ^b	87.7 ^b
FLÉOLE DES PRÉS – Effet cultivars												
#13	58.1	50.1	7.7	22.5	360	595	50.5	73	859 ^a	763 ^a	7.4	57.4
#14	57.1	48.4	8.4	22.0	370	604	43.9	73	840 ^b	730 ^b	7.5	52.5
#15	55.3	48.1	7.0	22.4	362	597	48.4	75	852 ^{ab}	756 ^a	7.7	56.0
#16	59.2	49.7	9.7	22.5	362	592	48.3	77	864 ^a	760 ^a	7.8	55.4
Effet Coupe												
1 ^{ère}	52.2 ^b	46.5	5.3 ^b	20.4 ^b	382 ^a	630 ^a	40.4 ^b	68 ^b	830 ^b	722 ^b	6.6 ^b	52.1 ^b
2 ^e	62.7 ^a	51.7	11.8 ^a	24.2 ^a	344 ^b	564 ^b	55.1 ^a	81 ^a	878 ^a	782 ^a	8.6 ^a	58.5 ^a
Effet Fauche												
AM	51.7 ^b	44.5 ^b	6.8	22.7	367	598	45.8	75	850	749	7.7	58.2 ^a
PM	63.1 ^a	53.7 ^a	9.7	22.0	360	596	49.7	74	858	756	7.5	52.5 ^b

*GNS = Glucides non structuraux = Sucres solubles (SS) + amidon; DIVMS = Digestibilité *in vitro* de la matière sèche; dNDF = Digestibilité *in vitro* du NDF.

^{abc}Pour une même espèce, un même effet et sur une même colonne, les moyennes suivies de lettres différentes sont significativement différentes ($P < 0.05$).

DE QUELLE FAÇON LA PÉRIODE DE FANAGE AFFECTE LE MÉTABOLISME DES FRUCTANES CHEZ LA FLÉOLE DES PRÉS ?

MAROUF OULD AHMED², PASCAL DROUIN¹, MARIE-PASCALE PRUD'HOMME², ANNETTE BERTRAND-MORVAN², CAROLE LAFRENIÈRE³

¹ Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445, boulevard de l'université, Rouyn-Noranda, Québec. ² Université de Caen-Basse-Normandie, Caen, France. ³ Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445, boulevard de l'université, Rouyn-Noranda, Québec
Courriel : pascal.drouin@uqat.ca

Le fructane est un polysaccharide composé principalement à partir d'unités de fructose. C'est un polysaccharide non structural, présent chez plusieurs familles de plantes chez lesquelles il exerce plusieurs fonctions. Chez les graminées, le fructane peut agir dans la réponse à certains stress physiologiques (Valluru & Van den Ende, 2008), mais sa fonction principale pour cette étude est la capacité des plantes de l'entreposer à l'intérieur de vacuoles (Gallagher, 2007). Il contribue alors à améliorer l'énergie fournie par ces plantes pour l'alimentation animale.

Plusieurs graminées fourragères, telle la fléole des prés, accumulent préférentiellement les sucres produits lors de la photosynthèse en fructanes plutôt qu'en amidon. La proportion de fructanes accumulée dépend de plusieurs facteurs, dont le stade de maturité des plantes, les conditions climatiques et le niveau de fertilisation azotée. Chez la fléole des prés, une graminée fourragère très répandue au Québec, la concentration en fructanes au moment de la fauche revêt une grande importance pour la qualité nutritive des fourrages. Plusieurs travaux récents tentent d'associer certains paramètres agronomiques à la concentration en sucres solubles afin d'assurer une concentration maximale en sucres solubles et ainsi favoriser l'apport en énergie des fourrages (Pelletier et al., 2009; Tremblay et al., 2005).

La synthèse des fructanes est effectuée par plusieurs enzymes, dont la fructane-fructosyl-transférase qui est responsable de l'élongation de la molécule et la sucrose:sucrose fructosyltransférase permet l'initiation de l'élongation à partir de sucrose. Les paramètres physiologiques et moléculaires de la synthèse des fructanes sont connus, mais de façon générale pour l'ensemble des espèces. La dégradation de la molécule est réalisée par plusieurs types de fructanes exohydrolases et parfois par certaines invertases. Chez la fléole, la première fructane exohydrolase caractérisée l'a été que très récente (Tamura et al., 2011). Or, lors de la récolte des plantes, les enzymes responsables de la dégradation des fructanes peuvent demeurer actifs, être inactivés, ou même être synthétisés par la plante afin de répondre au stress osmotique induit suite à la fauche. Les études d'induction de ces gènes ont été uniquement réalisées afin de comprendre la mobilisation des fructanes lors de la reprise de la croissance après la fauche (Lasseur et al., 2006).

L'objectif de ce projet est d'étudier en conditions contrôlées l'effet de la période de préfanage sur les concentrations en sucres solubles (fructane et amidon) chez la fléole des prés. Les conditions de préfanage étudiées sont la température ainsi que l'intensité d'illumination. Ces résultats seront analysés en relation avec les paramètres nutritifs de l'aliment.

L'expérience a consisté à faire croître en serre des plants de fléole à deux stades de maturité différents, soit l'épiaison et l'anthèse. À chacun de ces stades de croissance, les plants ont été coupés et laissés à préfaner sous quatre traitements, soit à deux températures (15 et 20°C) et deux niveaux d'illumination (lumière et obscurité). Les échantillons ont été prélevés à six périodes différentes (0, 3, 6, 9, 12 et 24 heures). Pour chaque condition expérimentale, le niveau de matière sèche est évalué et les feuilles et les tiges ont été séparées puis congelées. L'analyse du matériel a consisté à doser les sucres solubles totaux, les fructanes, l'amidon, le sucrose, le fructose, le glucose et les protéines solubles. L'activité enzymatique des sucrose:sucrose fructosyltransférases, fructanes exohydrolases et invertases a ensuite été déterminée.

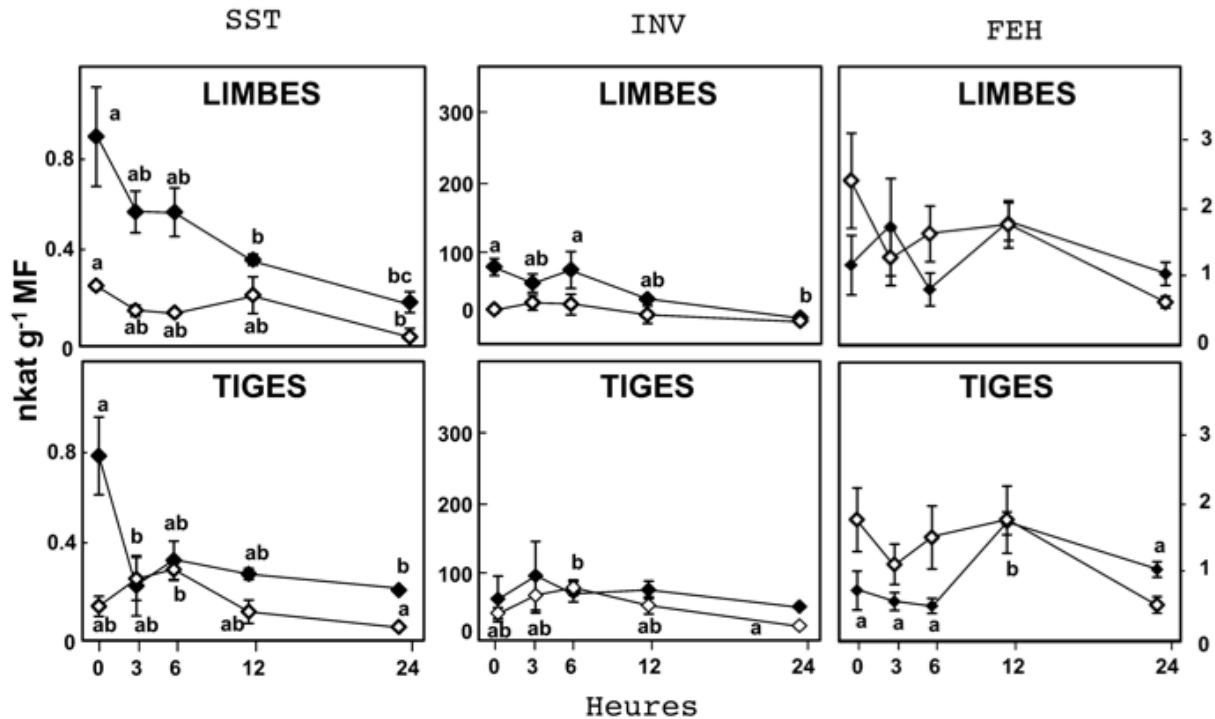
Les résultats indiquent que le niveau de matière sèche a atteint près de 83% en 24 heures en présence de lumière dans les feuilles, mais seulement 58% dans les tiges (55 et 43% en obscurité). Après 12 heures de préfanage, les niveaux de matière sèche sont plus similaires à ceux de préfanage en conditions réelles au champ. Le taux de protéolyse a par contre été important dans l'ensemble des traitements de préfanage puisque la concentration en protéines solubles passe de 4% en début de traitement à environ 1% après 24 heures (1,5% après 12 heures).

Tout au long des traitements de préfanage, la concentration en sucres solubles augmente légèrement dans les tiges et les feuilles pour atteindre un maximum après 12 heures dans les feuilles (475 mg sucres solubles totaux g^{-1} MS) et après 24 heures dans les tiges (630 mg sucres solubles totaux g^{-1} MS). La concentration en fructose suit les mêmes tendances dans les feuilles et les tiges que l'accumulation des sucres solubles totaux (560 et 584 mg fructose g^{-1} MS pour les feuilles et les tiges respectivement). La concentration en glucose demeure stable tout au long des traitements de préfanage, avec des valeurs de près de 200 et 300 mg glucose g^{-1} MS pour les feuilles et les tiges respectivement. Le saccharose répond de façon similaire à la réponse des sucres solubles totaux et du fructose.

L'augmentation de la concentration en sucres solubles totaux et en fructose n'est pas attribuable à la photosynthèse, qui aurait pu se poursuivre dans les cellules, puisque l'augmentation est visible autant dans les traitements sous illumination que pour ceux en obscurité. Cette réponse est par contre assez complexe puisqu'elle diffère entre les feuilles et les tiges. Les feuilles sont souvent plus sensibles à la présence d'illumination au niveau de la concentration en ces sucres, tandis que la concentration est légèrement plus élevée dans les tiges. Ces différences sont significatives pour les premières heures (jusqu'à 12 heures) et s'inversent par la suite).

L'activité enzymatique (figure 1) associée à la synthèse des fructanes décroît rapidement en absence de lumière, mais demeure stable en présence de lumière. En absence de lumière, la diminution de l'activité pourrait être associée à l'arrêt de la photosynthèse, mais aussi à l'augmentation du niveau de la matière sèche. En présence de lumière, la synthèse des fructanes se poursuit tout au long des 24 heures de du traitement de préfanage. L'activité des invertases est plutôt stable dans le temps, donc tout au long du préfanage. Pour ce qui est de l'activité de dégradation des fructanes, elle décroît lentement tout au long du préfanage dans les feuilles, mais augmente dans les tiges. Ceci pourrait être dû à une mobilisation des fructanes vers d'autres organes de la plante. Ces résultats sont en accord avec les modifications de concentration des différents sucres solubles (totaux, fructose et glucose).

Figure 1. Activité enzymatique pour les enzymes impliquées dans la synthèse et de la dégradation des fructanes en fonction des différents traitements de préfanage chez les limbes et les tiges de fléole.



*Les losanges blancs représentent les traitements en présence de lumière, tandis que les cercles noirs représentent les traitements sous obscurité.

Les conditions de préfanage testées lors de cette expérience indiquent que le métabolisme associé à la synthèse et la dégradation des sucres solubles, dont les fructanes, demeurent actifs durant les premières heures suite à la fauche. L'activité demeure importante jusqu'à ce que le niveau de matière sèche dépasse 350 g kg⁻¹. Cette activité enzymatique demeure importante malgré un niveau de protéolyse important. L'ensilage du matériel devrait permettre à l'activité enzymatique de se poursuivre, favorisant la présence de monosaccharides ou d'oligosaccharides pouvant être rapidement utilisés par les microorganismes présents, autant les bactéries lactiques que les autres microorganismes moins désirables durant le processus d'ensilage.

LISTE DES OUVRAGES CITÉS

- Gallagher, J. J., A. J. Cairns, L. B. Turner. Fructans in temperate forage grasses : agronomy, physiology, and molecular biology. In. Shiomi, N, N. Benkeblia, S. Onodera (eds.). Recent advances in fructooligosaccharides research. Research Signpost, Kerala, India. pp. 15-46.
- Lasseur, B., J. Lothier, A. Djoumad, B. De Conninck, S. Smeekens, A. Van Laere, A. Morvan-Bertrand, W. Van den Ende, M.-P. Prud'homme. 2006. Molecular and functional characterization of a cDNA encoding fructan :fructan 6G-fructosyltransferase (6G-FFT) / fructan :fructan 1-fructosyltransferase (1-FFT) from perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *J. Exp. Bot.* 57 :2719-2734.
- Pelletier, S., G. F. Tremblay, C. Lafrenière, A. Bertrand, G. Bélanger, Y. Castonguay, J. Rowsell. 2009. Nonstructural carbohydrate concentrations in timothy as affected by N fertilisation, stage development, and time of cutting. *Agron. J.* 101 :1372-1380.
- Tamura, K.-I., Y. Sanada, K. Tase, T. Komatsu, M. Yoshida. 2011. Pp6-FEH1 encodes an enzyme for degradability of highly polymerized levan and is transcriptionally induced by defoliation in timothy (*Phleum pratense* L.). *J. Exp. Bot.* 62 :3421-3431.
- Tremblay, G. F., G. Bélanger, R. Drapeau. 2005. Nitrogen fertilizer application and developmental stage affect silage quality of timothy (*Phleum pratense* L.). *Grass & Forage Sci.* 60 :337-355.
- Valluru, R., W. Van den Ende. 2008. Plant fructans in stress environments : emerging concepts and future prospects. *J. Ex*

PERFORMANCE DU MODÈLE STICS POUR SIMULER LA CROISSANCE ET LA VALEUR NUTRITIVE DE LA FLÉOLE DES PRÉS

GUILLAUME JÉGO¹, GILLES BÉLANGER¹, GAËTAN F. TREMBLAY¹, QI JING¹, VERN S. BARON²

¹ Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2560 Boulevard Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3, Canada. ² Centre de recherches de Lacombe, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 6000 sentiers C et E, Lacombe, AB, T4L 1W1, Canada
Courriel : guillaume.jego@agr.gc.ca

Apparue dans le champ de l'agronomie dans les années 1950, la modélisation y occupe aujourd'hui une place conséquente. Profitant des nouvelles possibilités ouvertes par le développement de l'informatique, elle permet d'appréhender des échelles variées - modélisation de la plante, du peuplement végétal, de la parcelle agricole, du territoire (par exemple : Colbach et al., 2001a et 2001b, Jégo et al., 2012) et de quantifier des relations de fonctionnement entre les différents éléments du système. Parmi tous les types de modèles existant, les modèles de culture permettent de décrire grâce à des équations mathématiques la croissance des cultures en interaction avec le sol, le climat et les pratiques agricoles. Ils ont été utilisés dans de nombreuses études scientifiques afin de simuler l'impact des pratiques agricoles ou du choix des systèmes de culture sur le fonctionnement et les performances du système climat-sol-plante (Loyce et Wéry, 2006), en termes, par exemple, de production ou d'effets environnementaux.

La fléole des prés (*Phleum pratense* L.) est une plante fourragère pérenne tolérante au froid qui est largement cultivée en Amérique du Nord et en Europe du Nord. Le modèle CATIMO (CANadian TIMothy MOdel; Bonesmo et Bélanger, 2002a, 2002b) a été initialement développé pour simuler la croissance primaire de la fléole des prés. Il a été validé avec des jeux de données indépendants provenant de différents sites au Canada et en Scandinavie. Il a été par la suite amélioré pour simuler la dynamique de l'indice de récolte (Jing et al., 2011) ainsi que le regain après la première coupe (Jing et al., 2012). Alors que la croissance de la plante et l'évolution des variables de valeur nutritive sont bien décrites par le modèle, le compartiment sol n'est que sommairement décrit et les processus simulés ne permettent pas d'estimer les bilans hydrique et azoté. D'un autre côté, diverses études ont montré que le modèle STICS (Brisson et al., 1998, 2002; Figure 1) pouvait être utilisé pour estimer de façon relativement fiable les bilans hydrique et azoté d'un ou plusieurs cycles de cultures (ex. Beaudoin et al., 2008 ; Jégo et al., 2012). Il a par ailleurs, déjà été calibré pour simuler la croissance de certaines plantes fourragères telles que les graminées (Ruget et al., 2001, Ruget et al., 2006), la luzerne et la fétuque (Juin et al., 2004 ; Ruget et al., 2009) mais il ne permet pas d'estimer la valeur nutritive de la biomasse produite (hormis sa teneur en azote).

L'objectif de cette étude était donc de calibrer et d'évaluer la performance du modèle STICS à simuler la croissance et la valeur nutritive de la fléole des prés. Ce travail s'est concentré sur des cycles de croissance annuels incluant la croissance primaire et le regain avec une réinitialisation du modèle au 1 avril de chaque année. Des simulations pluriannuelles sans réinitialisation

nécessiteraient au préalable une vérification du module snowMAUS (Trnka et al., 2010) qui permettrait de simuler les effets des conditions hivernales. L'objectif à plus long terme est de bénéficier d'un outil de modélisation permettant de simuler l'impact des variations pédoclimatiques et des pratiques agricoles sur le compromis entre la quantité et la qualité de la biomasse produite de même que sur le bilan environnemental (eau et azote) d'un cycle de culture de fléole des prés.

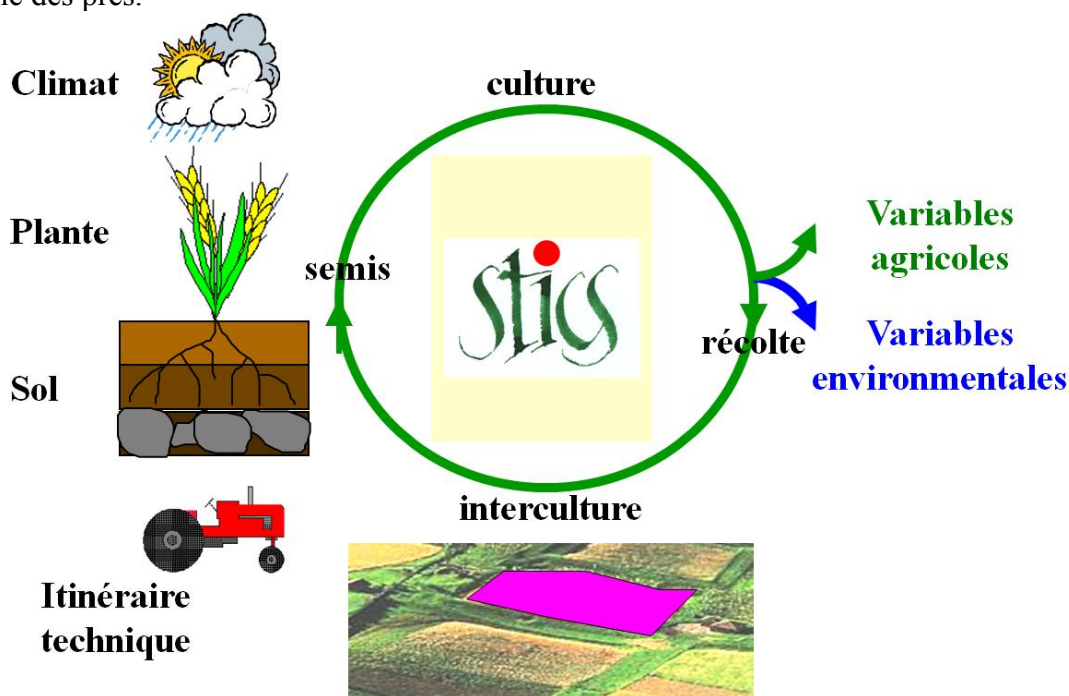


Figure 1. Schéma de synthèse des entrées nécessaires au fonctionnement du modèle STICS et des sorties calculées par le modèle.

Un total de 24 jeux de données (champ × année × traitement azoté) répartis sur 3 sites à travers le Canada a été utilisé. Ces données incluent des mesures d'indice de surface foliaire (LAI), de biomasse aérienne, de concentrations en azote et en parois cellulaires (NDF), de digestibilité des parois cellulaires et de la matière sèche de la biomasse. Deux des 24 jeux de données ont été utilisés pour calibrer le modèle : un pour l'Est du Canada (cultivar Champ) et un pour l'Ouest du Canada (cultivar Climax). La première étape a consisté à calibrer les paramètres contrôlant la dynamique de croissance de la surface foliaire et de la biomasse en utilisant le paramétrage de la fétuque comme valeurs initiales. Au total, 13 paramètres ont été calibrés contrôlant la phénologie, la dynamique de la surface foliaire, la montée à graine, le lien entre le LAI et la biomasse de feuilles et, les paramètres d'efficacité de conversion du rayonnement intercepté en biomasse.

Après calibration, les prédictions de biomasse et de LAI des 2 jeux de données de calibration étaient très bonnes avec quasiment aucun biais (< 2 %), une NRMSE (Normalized Root Mean Square Error) faible (< 10 %) et une efficacité élevée (> 0,9). La seconde étape de la calibration a consisté à calibrer les équations utilisées dans CATIMO afin de calculer les indices de valeur nutritive à partir des variables de sorties de STICS (biomasses des feuilles, des tiges et de la partie aérienne totale). Après calibration de ces équations, les valeurs nutritives simulées étaient également très proches des mesures utilisées pour la calibration (NRMSE < 5 %).

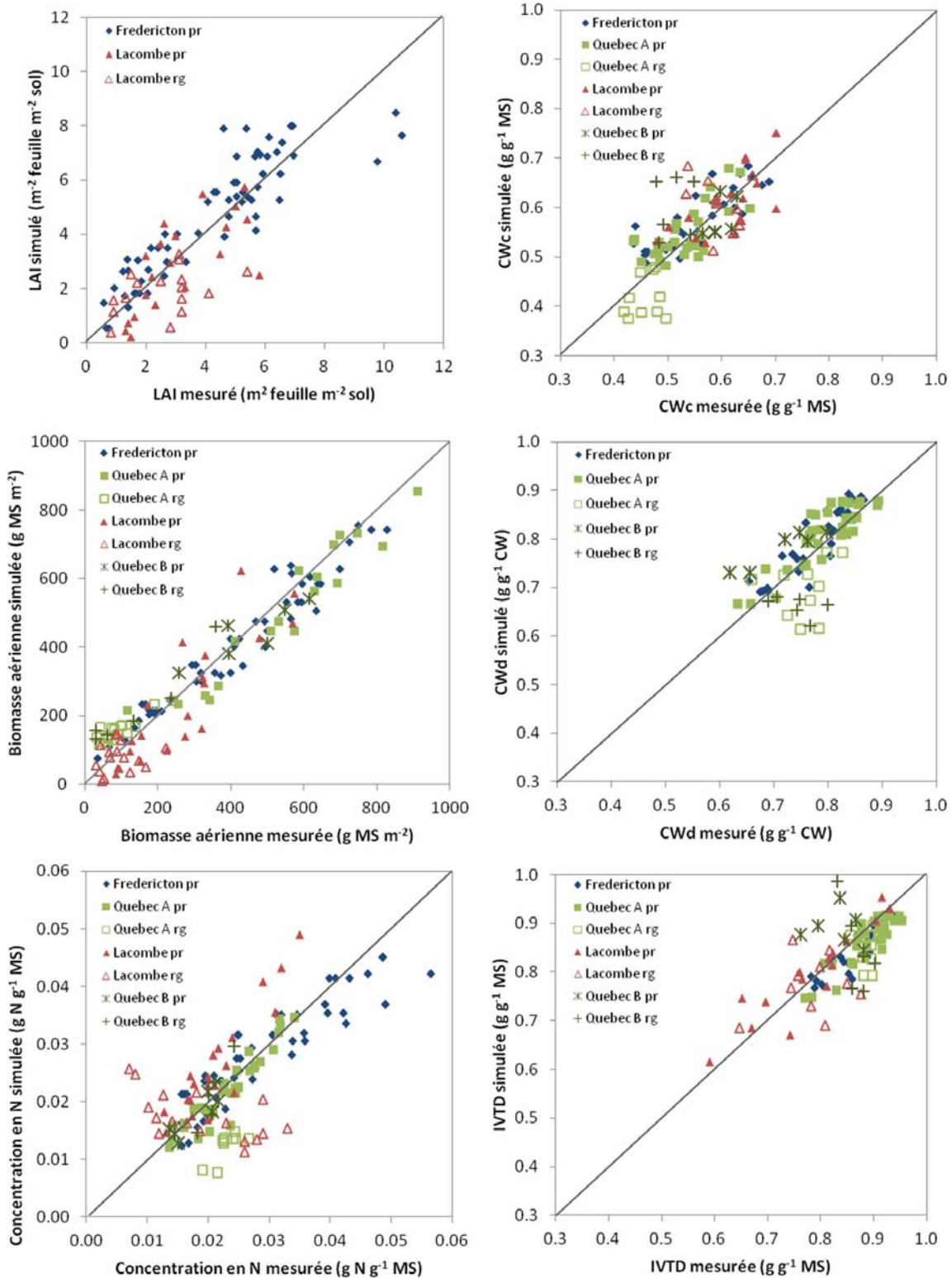


Figure 2. LAI, biomasse, concentration en azote, concentrations en parois cellulaires (CWC), digestibilité des parois cellulaires (CWd) et de la matière sèche (IVTD) mesurés et simulés par STICS pour la croissance primaire (pr) et le regain (rg).

Les 22 autres jeux de données ont été utilisés pour évaluer la performance du modèle après calibration (Figure 2). Pour la croissance primaire, les prédictions de LAI, de biomasse, de concentration en azote et des autres paramètres de valeur nutritive de la plante étaient globalement bonnes avec une NRMSE inférieure à 30 % en moyenne pour toutes les variables. Cependant, les prédictions étaient un peu moins bonnes pour le cultivar Climax (NRMSE légèrement supérieures à 30 %) que pour le cultivar Champ. Pour le regain, les prédictions étaient globalement moins bonnes. Le LAI et la biomasse produite tendaient à être surestimés par le modèle. En conséquence, les NRMSE étaient généralement élevées (> 30 %) et les efficacités souvent faibles, voire négatives dans certains cas. Cependant, les valeurs absolues de RMSE étaient relativement proches de celles obtenues pour la croissance primaire, avec par exemple pour la biomasse, des valeurs de RMSE de 66,5 g m⁻² pour la croissance primaire et 73,5 g m⁻² pour le regain. Les valeurs élevées de NRMSE et les faibles efficacités proviennent principalement du fait que les biomasses produites sont beaucoup plus faibles lors du regain (50 à 200 g m⁻²) que lors de la croissance primaire (600 à 900 g m⁻²). L'erreur de prédiction du modèle pour la biomasse étant de l'ordre de 70 g m⁻², la performance relative du modèle s'est donc avérée être meilleure pour la croissance primaire que pour le regain. Cependant une partie de ces erreurs de prédictions proviennent également probablement du fait que les paramètres contrôlant la gestion des réserves de la plante n'ont pas été calibrés.

La prochaine étape de ce travail consiste à évaluer, et si besoin, à calibrer le module snowMAUS afin de pouvoir correctement prédire les conditions hivernales (épaisseur de neige, température et humidité du sol). Ceci permettra d'effectuer des simulations pluriannuelles et d'évaluer les bilans agronomiques et environnementaux complets d'une culture de fléole des prés.

LISTE DES OUVRAGES CITÉS:

- Beaudoin N., Launay M., Sauboua E., Ponsardin G., Mary B., 2008 - Evaluation of the soil crop model STICS over 8 years against the on farm database of Bruyères catchment. *European Journal of Agronomy* 29, 46-57.
- Bonesmo H., Bélanger G., 2002a - Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model: I. Growth and nitrogen. *Agronomy Journal*, 94, 337-345.
- Bonesmo H., Bélanger G., 2002b - Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model: II. Digestibility and fiber. *Agronomy Journal*, 94, 345-350.
- Brisson N., Mary B., Ripoche D., Jeuffroy M.H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.M., Meynard J.M., Delécolle R., 1998 - STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311-346.
- Brisson N., Ruget F., Gate P., Lorgeou J., Nicoullaud B., Tayot X., Plenet D., Jeuffroy M.H., Bouthier A., Ripoche D., Mary B., Justes E., 2002 - STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie*, 22, 69-92.
- Colbach, N., Clermont-Dauphin C., Meynard J. M., 2001a. "GENESYS: a model of the influence of cropping system on gene escape from herbicide tolerant rapeseed crops to rape volunteers - I. Temporal evolution of a population of rapeseed volunteers in a field." *Agriculture Ecosystems & Environment* 83(3): 235.
- Colbach, N., Clermont-Dauphin C., Meynard J. M., 2001b. "GENESYS: a model of the influence of cropping system on gene escape from herbicide tolerant rapeseed crops to rape volunteers -

- II. Genetic exchanges among volunteer and cropped populations in a small region." *Agriculture Ecosystems & Environment* 83(3): 255.
- Jégo G., Sánchez-Pérez J.M., Justes E., 2012 - Predicting soil water and mineral nitrogen contents with the STICS model for estimating nitrate leaching under agricultural fields. *Agricultural Water Management*, 107, 54-65.
- Jing Q., Bélanger G., Baron V., Bonesmo H., 2011 - Modeling the biomass and harvest index dynamics of timothy. *Agronomy Journal*, 103, 1397–1404.
- Jing Q., Bélanger G., Baron V., Bonesmo H., Virkajärvi P., Young D., 2012 - Regrowth simulation of the perennial grass timothy. *Ecological Modelling*, 232, 64-77.
- Juin S., Brisson N., Clastre P., Grand P., 2004 - Impact of global warming on the growing cycles of three forage systems in upland areas of southeastern France. *Agronomie*, 24, 327-337.
- Loyce, C., Wéry J., 2006. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception des systèmes de culture. *Agronomie*: 77-95.
- Ruget F.; Delecolle R.; Le Bas C, Duru M., Bonneville N., Rabaud V., Donet I., Perarnaud V., Paniagua S., 2001 - L'estimation régionale des productions fourragères, In : *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*, Malezieux, E.; Trebil, G.; Jaeger, M., ed., 263-282.
- Ruget F., Novak S., Granger S., 2006 - Du modèle STICS au système ISOP pour estimer la production fourragère. *Adaptation à la prairie, application spatialisée*, Fourrages, 186, 241-256
- Ruget F., Satger S., Volaire F., Lelièvre F., 2009 - Modeling tiller density, growth, and yield of Mediterranean perennial grasslands with STICS. *Crop Science*, 49, 2379-2385.
- Trnka M., Kocmánková E., Balek J., Eitzinger J., Ruget F., Formayer H., Hlavinka P., Schaumberger A., Horáková V., Možný M., Žalud Z., 2010 - Simple snow cover model for agrometeorological applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 1115-1127.

AVONS-NOUS LES BONS INOCULANTS POUR ENSILER LE MAÏS L'AUTOMNE ?

YIQIN ZHOU², PASCAL DROUIN¹, ET CAROLE LAFRENIÈRE²

¹Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445, boulevard de l'université, Rouyn-Noranda, Québec. ² Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 445, boulevard de l'université, Rouyn-Noranda, Québec.
Courriel : pascal.drouin@uqat.ca

La conservation des plantes fourragères par la technique de l'ensilage est une activité estivale qui est dépendante des conditions climatiques. Ceci afin d'optimiser la qualité nutritive et le bon niveau de préfanage afin d'obtenir les conditions idéales d'humidité du matériel végétal à ensiler. Ces conditions favoriseront le développement des bactéries lactiques et leur présence face à d'autres microorganismes pouvant nuire à la qualité de la fermentation.

Les ensilages de maïs et certains ensilages de plantes fourragères sont, par contre, souvent réalisés assez tard en automne. La température de l'air peut ainsi être beaucoup plus fraîche, voir froide même, que durant l'été. L'état physiologique des plantes est aussi différent, et plusieurs tissus peuvent être en sénescence avancée, ce qui modifie les populations des microorganismes épiphytes. Ces conditions vont nécessairement affecter la dynamique bactérienne durant l'ensilement.

L'effet de la température sur la diversité microbienne et la qualité de la fermentation a été étudié précédemment, mais seulement en conditions de températures élevées (Muck et Dickerson, 1988; Pahlow et al., 2003). Ces études ont principalement été réalisées dans des environnements agricoles plus chaud, telle la Californie ou le Wisconsin en été et les températures étudiées peuvent atteindre le 40°C. Les études considérant des ensilages ayant chauffé ne sont pas considérées dans ce cas. Dans une étude de Kim et Adesogan (2006), il est démontré qu'une température de 40°C tout au long du processus d'ensilage réduit de façon importante la qualité de la fermentation ainsi que la stabilité aérobie du matériel. La dynamique microbienne n'est par contre que peu étudiée dans ces travaux.

Les ensilages de maïs sont souvent peu propices à chauffer étant donné que cette plante est très riche en sucres fermentescibles et qu'il est facile de la compacter, ce qui diminue la concentration en oxygène résiduelle. En conditions fraîches, ceci ne permettra donc pas d'élever la température en début d'ensilage dans la masse. La réponse à la fermentation est généralement bonne dans le maïs, mais il demeure recommandé d'ajouter un inoculant (*Lactobacillus buchnerii*) permettant d'améliorer la stabilité aérobie. Du maïs ensilé en septembre ou octobre devrait ainsi être exposé à des températures relativement fraîches, ce qui pourra affecter la fermentation. En bordure du silo-meule par exemple, là où la température fluctuera le plus en association avec celle de l'environnement, l'effet sur la fermentation sera plus important. Nous avons donc voulu connaître la dynamique de la diversité microbienne durant l'ensilement de maïs en conditions fraîches et froides.

Afin de réaliser le projet, du maïs haché (1 cm) a été récolté chez un producteur et transporté immédiatement au laboratoire. Il n'y a pas eu de précipitation dans la semaine précédente la

récolte, et plusieurs nuits sous le point de congélation ont été mesurées. Le maïs récolté pour l'expérience était exempt de tout inoculant, pour ne pas affecter les résultats. Au laboratoire, des silos expérimentaux ont été préparés selon la méthode du sachet sous vide et répartis en cinq traitements de températures (25, 20, 15, 10 et 5°C). Des silos ont été récoltés à 1, 2, 3, 7, 28 et 60 jours afin de suivre les changements du pH, des acides organiques et de la diversité microbienne, entre autres.

La première constatation suite à l'analyse des résultats est que la fermentation s'est bien établie dans l'ensemble des échantillons. Le taux de réduction du pH est plus lent à 5°C qu'aux autres températures (taux de 0,095 unité pH j⁻¹ à 10°C – la valeur à 5°C ne pouvait être modélisé). Le tableau 1 présente les valeurs de pH et d'acide lactique après 60 jours d'incubation pour chacune des températures. La valeur théorique de stabilité anaérobie calculée pour le matériel ensilé est de 4,42, donc tous les échantillons sont potentiellement bien conservés.

Tableau 1. Paramètres chimiques des silos

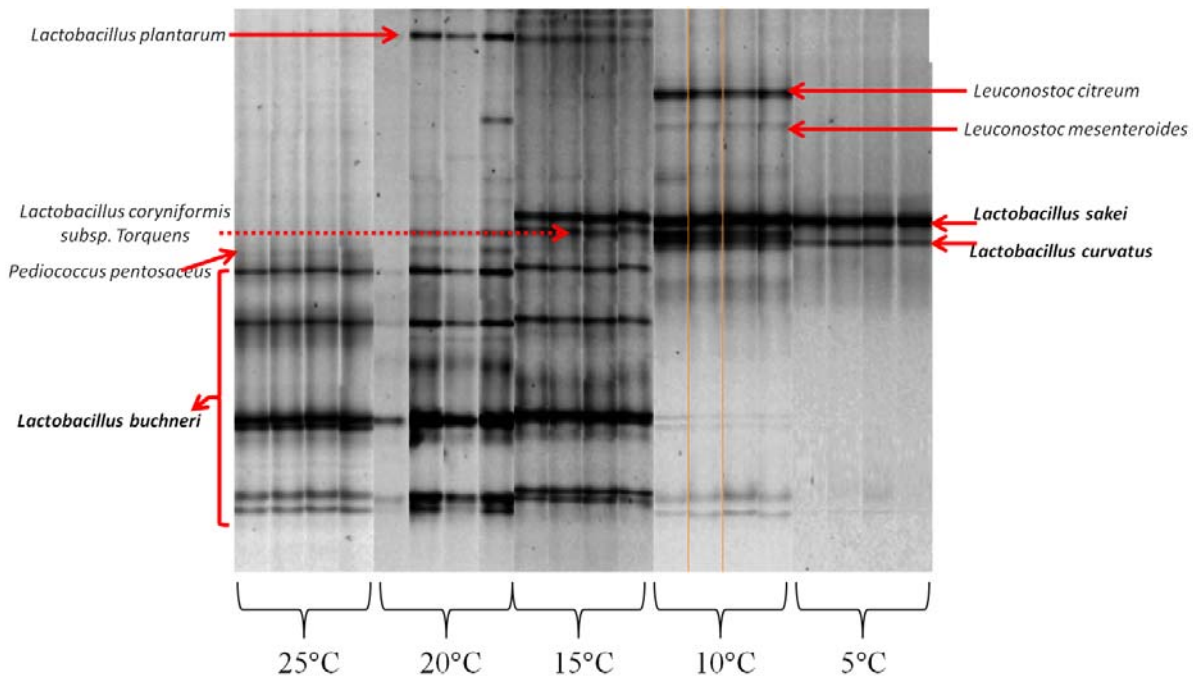
Température	pH après 60 jours	Acide lactique (g L ⁻¹)
25	4,0	42,8
20	3,8	63,3
15	3,9	51,0
10	4,0	32,4
5	4,3	30,6

Les silos incubés à 5°C se sont distingués de ceux des autres traitements de température en ayant permis de conserver une quantité beaucoup plus importante de sucres solubles (72,7 versus 36,5 g kg⁻¹ MS à 10°C – et 86,8 g kg⁻¹ MS pour le maïs avant ensilage).

Contrairement à ce qui a été observé au niveau de la caractérisation chimique des échantillons, l'étude de la diversité microbienne de l'ensemble des échantillons a montré d'importantes différences entre les traitements. L'analyse a été réalisée par une méthode d'évaluation de la diversité moléculaire, soit celle du PCR-DGGE, (denaturing gradient gel electrophoresis). La diversité de plusieurs types de microorganismes a été déterminée, mais seulement celle des bactéries lactiques sera présentée ici.

Pour chacun des traitements de température (figure 1), il est possible d'observer une évolution des espèces dominantes en relation avec le temps d'ensilage. Par exemple, lorsque la température d'incubation des silos expérimentaux est de 25°C, l'espèce *Lactobacillus buchneri* domine l'ensilage en moins de 28 jours. Lorsque la température d'incubation est de 20°C, le *Lactobacillus buchneri* domine toujours après 60 jours, mais l'espèce *Pediococcus pentoseus* a d'abord été importante, plus c'est le *Lactobacillus plantarum* qui a dominé à la moitié de la période d'incubation. La diversité globale était plus importante à 20 et 15°C. Ces modifications se poursuivent jusqu'à la température d'incubation la plus basse. Sous ce traitement de température, c'est une tout autre espèce qui domine l'environnement après 60 jours, soit le *Lactobacillus sakei*. Cette espèce domine de façon similaire à cette température que le *L. buchneri* pouvait le faire à 25°C.

Figure 1. Profil de la diversité moléculaire des bactéries lactiques dans les silos expérimentaux après 60 jours d'incubation.



Les formulations d'inoculant proposées commercialement fonctionnent bien lorsque la température est clémente ou légèrement chaude. La présence du *L. buchneri* dominant l'ensilage en fin d'incubation pour les traitements thermiques plus élevés est intéressante, parce qu'elle répond ainsi à un besoin d'assurer la stabilité aérobie au moment de l'ouverture. La présence de l'espèce *L. sakei* dans les ensilages lorsque la température d'incubation est basse n'a pas été rapportée par la littérature. Cette espèce est par contre adaptée à ces conditions fraîches puisqu'elle est souvent utilisée par l'industrie alimentaire selon différentes méthodes de fermentation. Bien que présente naturellement dans cet essai, cette souche pourrait être adaptée à une formulation d'inoculant d'automne, ce qui contribuerait à assurer l'efficacité de la fermentation.

LISTE DES OUVRAGES CITÉS

Kim S. C., A. T. Adesogan. 2006. Influence of ensiling temperature, simulated rainfall, and delayed sealing on fermentation characteristics and aerobic stability of corn silage. *J. Dairy Sci.* 89 :3122-3132.

Muck, R. E., J. T. Dickerson. 1988. Storage temperature effects on proteolysis in alfalfa silage. *Trans. ASAE.* 31:1005-1008.

Pahlow, G., R. E. Muck, F. Driehuis, S. J. W. H. Oude Elferink, S. F. Spoelstra. 2003. Microbiology of ensiling. In: Buxton, D. R., R. E. Muck, J. H. Harrison (eds). *Silage science and technology*. Am

MESURE DES PARTICULES DE FOURRAGE EN TROIS DIMENSIONS

PHILIPPE SAVOIE¹, MARC-ANTOINE AUDY-DUBÉ², CHARLES L. ST-ARNAUD², RENÉ MORISSETTE¹

¹Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2560 boul. Hochelaga, Québec, QC, G1V 2J3

²Département des sols et de génie agroalimentaire, Université Laval, Québec, QC G1V 0A6

Courriel : philippe.savoie@agr.gc.ca

RÉSUMÉ

La longueur moyenne des particules de fourrage haché est estimée traditionnellement par tamisage mécanique, mais certains chercheurs ont noté l'imprécision de la méthode et le nombre limité de paramètres mesurés. Par ailleurs, l'analyse d'images permet de mesurer non seulement la longueur, mais aussi la largeur et d'estimer l'épaisseur des particules. On a utilisé l'analyse d'images pour estimer les trois dimensions de luzerne et maïs fourrager récoltés à trois longueurs de hachage théoriques (LHT): 4,8, 9,5 et 11,1 mm. Les tamis de l'ASABE ont montré que les longueurs moyennes étaient de 7,2, 9,1 et 14,7 mm dans la luzerne, et de 8,4, 12,7 et 12,7 mm dans le maïs aux trois LHT. L'analyse d'images a fourni une information détaillée sur la distribution réelle de particules, la largeur (entre 1,9 à 4,6 mm pour la luzerne; entre 1,5 et 10,4 mm pour le maïs), l'épaisseur (entre 0,08 et 0,22 mm pour la luzerne; entre 0,13 et 0,43 mm pour le maïs), ainsi que la surface des particules. L'analyse d'images pourrait être ajoutée aux laboratoires pour mieux renseigner les producteurs et les conseillers dans le choix optimal de la longueur de hachage adaptée au mode d'entreposage et aux méthodes d'alimentation à la ferme.

INTRODUCTION

La longueur des particules de fourrage influence la récolte, la conservation et l'utilisation par les ruminants. Un hachage plus court requiert plus d'énergie au niveau de la fourragère (Savoie et al. 1989). Il facilite le tassement, l'exclusion de l'air et une bonne conservation des ensilages, en particulier pour le fourrage plus sec (McDonald et al. 1991). Quand le fourrage est riche en sucres fermentescibles et bien compacté lors du remplissage des silos, l'effet de la longueur devient moins important (Rinne et Seppälä, 2011). Pour l'alimentation des vaches laitières, un compromis est nécessaire entre les particules courtes qui sont faciles à digérer et les particules longues qui favorisent la mastication et une bonne digestion. Il y a plus de vingt ans, Shaver (1990) recommandait des rations fourragères contenant un minimum de 15% de particules « grossières », c'est-à-dire plus longues que 38 mm. Récemment, de Ondarza (2011) faisait la même recommandation (15% de particules plus longues que 38 mm). En effet, si toutes les fibres fourragères sont courtes, la prise alimentaire augmente; par contre, plus de nutriments se retrouvent dans le fumier et l'efficacité alimentaire diminue. Brouillette (2011) suggère de hacher le maïs ensilage assez grossièrement (19 à 25 mm), en utilisant l'ajustement le plus fin pour les silos tour et l'ajustement le plus grossier pour les silos couloir.

Il est donc important de prendre une bonne mesure de la longueur des particules de fourrage et de leur distribution. La norme de mesure pour les ingénieurs agricoles est le tamisage mécanique de l'ASABE (2012a) à partir de cinq tamis. En production laitière, on utilise parfois un système de tamisage simplifié, le « Penn State Separator » à deux tamis (Kononoff et al. 2003). Récemment,

Igathinathane et al. (2009) ont montré que, durant le tamisage, les particules basculaient et glissaient à travers les trous plus petits que leur longueur. Si les particules ont une surface carrée, il n'y a pas d'erreur car le tamis retient les particules selon leur longueur et leur largeur qui sont égales. Par contre, quand les particules sont oblongues, les tamis laissent passer les particules sur leur longueur et ne retiennent que celles dont la largeur est plus grande que l'ouverture diagonale des trous; on mesure alors la largeur plutôt que la longueur dans ce cas. Ces auteurs concluent que l'analyse d'images est préférable pour bien estimer les vraies dimensions des particules.

L'objectif de cette étude est de caractériser les longueurs de particules de fourrage haché dans au moins deux dimensions, c'est-à-dire celles qui peuvent être captées par une image statique. La troisième dimension est estimée à partir de la masse du fourrage et de sa masse volumique. Une procédure est proposée pour normaliser ces mesures afin qu'elles servent éventuellement à optimiser l'ensemble des opérations influencées par le hachage.

PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Récolte et entreposage des fourrages

On a récolté du maïs fourrager et de la luzerne au Centre de recherche en sciences animales de Deschambault (CRSAD) avec une fourragère traînée New Holland, modèle FP240, munie d'un cylindre hacheur à 12 couteaux. La longueur de hachage a été ajustée en changeant la roue d'engrenage des rouleaux d'alimentation selon la charte du fabricant. Les fourrages ont été récoltés à trois longueurs de hachage théoriques (LHT) : 3/16, 3/8 et 7/16 de pouce, c'est-à-dire 4,8, 9,5 et 11,1 mm. Le maïs a été récolté le 20 septembre 2012 ; la luzerne a été récoltée le 11 octobre 2012 après quatre heures au champ pour un léger séchage entre la fauche et le ramassage. Les fourrages hachés ont été conservés en chambre froide à 4°C. Une partie était mise à l'étuve à 103°C pendant 24 h pour mesurer la teneur en eau (ASABE, 2012b). Les mesures de longueurs de particules ont été faites avec les fourrages conservés à 4°C seulement, entre octobre 2012 et janvier 2013. Les fourrages séchés étaient trop fragiles et se pulvérisaient durant le tamisage.

Tamisage mécanique

Les échantillons de fourrage haché étaient d'abord triés à l'aide d'un tamiseur mécanique selon la norme de l'ASABE (2012a). Les trous des tamis étaient carrés, avec une mesure moyenne de côté de 19,16, 12,73, 6,40, 3,82 et 1,31 mm pour les cinq tamis. La moyenne des diagonales était de 25,37, 16,69, 8,57, 5,12 et 1,81 mm, respectivement. Les diagonales étaient plus courtes que la valeur théorique ($Côté \times 2^{1/2}$) parce que les coins étaient arrondis. Les plateaux étaient identifiés #6, 5, 4, 3, 2 et 1, du tamis supérieur le plus grossier (#6) au tamis le plus fin (#2), suivi du plateau de fond (#1). En arrondissant, la méthode des tamis suppose que le plateau #2 contient des particules entre 2 et 5 mm, le plateau #3, entre 5 et 9 mm, le plateau #4, entre 9 et 17 mm, le plateau #5, entre 17 et 25 mm, et le plateau #6 contient des particules plus grandes que 25 mm. Le plateau de fond contient des particules plus petites que 2 mm. Pour calculer une longueur moyenne par plateau, la norme de l'ASABE utilise la moyenne géométrique estimée à partir des diagonales (D) comme suit : $L_{\text{moy-plateau}\#i} = (D_{i+1} \times D_i)^{1/2}$. Pour le plateau du haut (#6), on mesure manuellement les longueurs d'un échantillon et on prend la moyenne arithmétique. Pour le plateau de fond (#1), la moyenne est la moitié de la diagonale du plateau au-dessus ($D_2/2$). La longueur moyenne géométrique et un écart-type géométrique pour l'ensemble des particules sont estimées à partir de la masse relative dans chaque plateau et la longueur moyenne par plateau. On retrouve les équations dans ASABE (2012a).

La procédure pour le tamisage consistait à sortir de la chambre froide une quantité suffisante de fourrage, soit environ 10 litres de fourrage haché (1500 g sur une base humide) par tamisage. Les particules étaient déposées sur le tamis du haut. Le tamiseur était opéré pendant 120 s avec une fréquence d'oscillation de 140 cycles par minute (2,3 Hz). Après la vibration, la masse nette de particules dans chaque plateau était pesée. Les fourrages tamisés étaient ensuite conservés dans une chambre froide (4°C) selon chaque plateau jusqu'à l'étape d'analyse d'images.

Procédure d'analyse d'images

Une petite quantité (normalement entre 100 et 600 particules) était placée sur une surface plane de 0,31 m par 0,45 m de couleur contrastée avec les particules. L'appareil photo était placé à environ 1,5 m au-dessus et au centre de la surface. La caméra est connectée à un ordinateur portable à partir duquel la prise d'images s'effectue. Afin d'éviter la recharge des piles et le réajustement fréquent du montage, un câble d'alimentation CA-PS700 a été utilisé. La caméra est un modèle CANON PowerShot S5IS de 8.0 mégapixels.

Le placement des particules est fait manuellement, de façon à ce que deux particules ne se touchent pas. L'analyse d'images est faite à partir du logiciel Matlab et son outil d'analyse «Image Processing Toolbox™». Les images de particules sont sauvegardées sous format jpg. Le logiciel estime la surface réelle de chaque particule en comptant des pixels qui contrastent avec la surface de la table (Figure 1). La procédure a été initialement mise en place pour mesurer des copeaux de bois (Pilon et Savoie, 2012). Certaines modifications adaptées aux particules de fourrages sont expliquées ci-après.

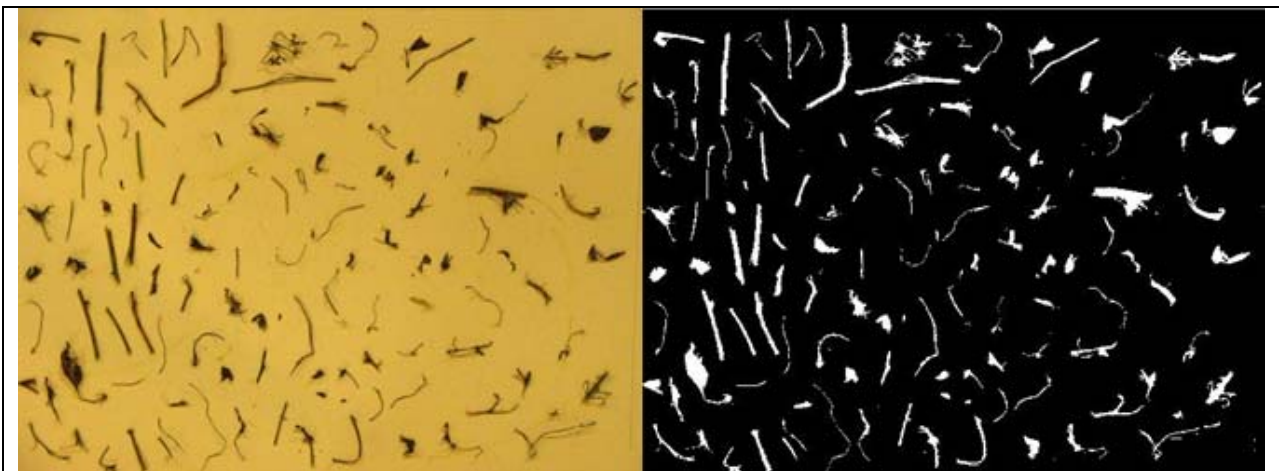


Figure 1. Image initiale et image convertie en format binaire pour la luzerne.

Le logiciel applique une forme géométrique à chaque particule. Une forme courante est l'ellipse qui est positionnée autour de la surface de chaque particule. Les dimensions de chaque particule sont alors estimées comme le grand diamètre (longueur) et le petit diamètre (largeur) de l'ellipse correspondant à la surface mesurée en pixels. Les données générées sont obtenues en format .txt et transférées dans un fichier Excel pour le traitement. Ainsi on a traité par analyse d'images les particules des plateaux de tamisage #2, 3, 4, 5 et 6. On n'a pas analysé par images les particules du plateau de fond (#1) car celles-ci étaient trop fines pour une mesure valable (en moyenne < 1

mm). La précision de l'analyse d'images est un paramètre qui peut être contrôlé. On définit la longueur minimale à traiter, habituellement 1 mm. Les particules plus petites que ce seuil sont considérées comme des poussières et ne sont pas comptabilisées.

Dans cette expérience, on a fait 3 tamisages mécaniques de chaque espèce fourragère (maïs, luzerne) et pour chaque longueur de hachage théorique (3/16, 3/8 et 7/16 pouce). On a pris 3 échantillons par plateau de tamisage pour trois images distinctes. Ainsi, on a analysé un total de 270 images pour deux fourrages, trois LHT, 3 tamisages, 5 plateaux et 3 échantillons par plateau.

Surface pour prise des photos

Pour obtenir un bon contraste, les fibres de maïs ont été photographiées sur un fond bleu très homogène (couvercle pour bac de plastique) mais l'éclairage devait être ajusté précisément pour éviter les reflets. Les fibres de luzerne ont été photographiées sur un fond blanc (table de travail). Malgré les imperfections de la surface, il était possible d'ajuster l'appareil photo pour qu'il ne considère que les fibres de fourrage. Quatre paramètres ont été utilisés lors de ces essais : i) Balance des blancs : Flash; ii) Correction exposition : +2/3; iii) Niveau expo flash : -1; iv) Sensibilité ISO : 200. Afin que cette surface blanche puisse être utilisée également avec les particules de maïs, des filtres photographiques doivent être programmés sur le logiciel Matlab pour permettre de mieux délimiter le contour des particules.

Estimation des trois dimensions des particules

Le logiciel estime la surface ou l'aire (A) de chaque particule (mm^2). À partir de la forme d'une ellipse, il estime une longueur (L) et obtient ensuite la largeur (l) par calcul ($A = \pi * L * l / 4$). Une autre forme géométrique parfois utilisée est la croix à douze points qui est superposée sur la surface. La croix permet de calculer avec précision la plus grande distance entre deux extrémités de la particule; on l'appelle la longueur vectorielle. Les valeurs rapportées en général sont la longueur et la largeur de la forme elliptique, à moins d'indication contraire.

Après chaque analyse d'images, toutes les particules étaient recueillies dans un contenant pour être séchées à l'étuve à 103°C pendant 24 heures et pesées. Ainsi on a mesuré la masse sèche réelle de toutes les particules. La masse volumique des fourrages a été estimée à partir de mesures dans la littérature. Savoie et al. (2004) ont mesuré à l'aide d'un pycnomètre (appareil diffusant de l'hélium autour des particules de fourrage) le volume réel de particules hachées de masse connue. Ils ont trouvé que la masse volumique de tiges et de feuille était de 635 kg MS/m^3 . La masse volumique de rafles et de spathes de maïs était de 825 kg MS/m^3 . Une masse volumique moyenne de 730 kg MS/m^3 a été utilisée dans la présente étude, tant pour la luzerne que pour le maïs fourrager. Des futures mesures devraient être faites pour valider si une seule et même masse volumique peut servir aux deux espèces. Ainsi on a estimé le volume (V) de toutes les particules pour une image donnée. Connaissant la surface de toutes les particules (surface moyenne par particule multipliée par le nombre de particules par image), on a estimé la troisième dimension (épaisseur = e) en supposant un polyèdre régulier ($V = A \times e$).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Mesures par tamisage mécanique

Les tableaux 1 et 2 montrent la distribution de masse des particules dans chaque plateau après le tamisage pour les trois LHT et les deux espèces. Chaque valeur est une moyenne de trois tamisages. Les longueurs géométriques moyennes étaient de 7,15, 9,07 et 14,72 mm dans la luzerne hachée théoriquement à 4,8, 9,5 et 11,1 mm, respectivement. Pour le maïs, les longueurs géométriques étaient de 8,39, 12,69 et 12,65 mm, respectivement. Dans le maïs, il n'y avait pratiquement pas de différence entre 9,5 et 11,1 mm de LHT. Les fractions cumulées sont illustrées aux figures 2 et 3 pour les deux fourrages. On note que seulement la luzerne hachée à 11,1 mm rencontrait la norme alimentaire d'au moins 15% de particules plus longues que 38 mm.

Le but principal de l'expérience étant de comparer les longueurs avec l'analyse d'image, on a ensuite procédé à compiler les images de particules. Les tableaux 3, 4 et 5 montrent la distribution des particules de luzerne hachée aux trois LHT. On remarque que l'analyse d'images procure une abondance de renseignements détaillés. On obtient ainsi une estimation de la largeur qui varie entre 1,8 et 4,4 mm tandis que l'épaisseur varie entre 0,08 et 0,22 mm pour la luzerne. La surface de chaque particule permettrait de calculer le rapport surface/masse. Quand les particules sont plus mince (rapport élevé), il est probable que la digestion des particules se fait plus rapidement. De même, les tableaux 7, 8 et 9 montrent les mêmes mesures pour les particules de maïs fourrager. Ainsi la largeur a varié entre 1,5 et 10,4 mm tandis que l'épaisseur a varié entre 0,13 et 0,43 mm. Les particules de maïs fourrager peuvent être beaucoup plus épaisses, à cause des rafles et tiges grossières, que les particules de luzerne, généralement fines. Les tableaux 5 et 10 comparent les longueurs par analyse d'image et les longueurs dans les plateaux de tamisage. Les longueurs moyennes obtenues par des mesures manuelles des particules sur les gros plateaux (D_6) sont surestimées par rapport aux analyses d'images. Cette surestimation reflète probablement la tendance à choisir de grosses particules pour le tri manuel. L'analyse d'image montre qu'un grand nombre de particules au-dessus du plateau aux plus grandes ouvertures sont quand même plus courtes que la diagonale des trous.

La figure 4 illustre un exemple de la distribution de la longueur de toutes les particules par plateau. Chaque plateau contient donc une bonne proportion de particules plus fine que les trous du tamis et plus grossières que les trous du plateau au-dessus. La figure 4 représente seulement une petite partie des particules analysées (moyenne de 3 images pour un seul tamisage de luzerne à une LHT de 3/8 pouce). Il reste encore beaucoup de travail à faire pour simplifier l'interprétation des données et incorporer leur utilisation dans les entreprises agricoles. Une fois qu'on établit la bonne longueur et la bonne distribution de particules souhaitées, on peut prévoir un ajustement automatique de la LHT dans les fourragères (Savoie et Shinnars, 2009). Ainsi la formulation de rations pourra tenir compte de la géométrie des particules afin de préparer des rations qui optimisent l'ensemble des ingrédients disponibles.

Tableau 1. Distribution de particules de luzerne par tamisage mécanique, pour trois longueurs de hachage théoriques (LHT), selon la norme de l'ASABE (2012a).

	LHT = 3/16 po (4,8 mm)		LHT = 3/8 po (9,5 mm)		LHT = 7/16 po (11,1 mm)	
	% de masse	L _{moy} (mm)	% de masse	L _{moy} (mm)	% de masse	L _{moy} (mm)
Plateau 6	5,18%	64,40	5,05%	61,54	21,83%	77,25
Plateau 5	12,09%	20,58	15,55%	20,58	18,44%	20,58
Plateau 4	27,37%	11,96	39,51%	11,96	32,75%	11,96
Plateau 3	25,57%	6,62	22,11%	6,62	14,41%	6,62
Plateau 2	20,82%	3,04	11,99%	3,04	8,67%	3,04
Plateau 1	8,96%	0,90	5,79%	0,90	3,89%	0,90
L-moy-géom*		7,15		9,07		14,72
ET-géom*		1,24		1,19		1,31

*La longueur moyenne géométrique (L-moy-géom) et l'écart-type géométrique (ET-géom) sont calculés en fonction de la masse et de la longueur de chaque fraction (ASABE, 2012a).

Tableau 2. Distribution de particules de maïs fourrager par tamisage mécanique, pour trois longueurs de hachage théoriques (LHT), selon la norme de l'ASABE (2012a).

	LHT = 3/16 po (4,8 mm)		LHT = 3/8 po (9,5 mm)		LHT = 7/16 po (11,1 mm)	
	% de masse	L _{moy} (mm)	% de masse	L _{moy} (mm)	% de masse	L _{moy} (mm)
Plateau 6	2,15%	67,49	7,24%	69,27	7,87%	88,81
Plateau 5	9,10%	20,58	16,48%	20,58	17,77%	20,58
Plateau 4	43,80%	11,96	58,89%	11,96	54,05%	11,96
Plateau 3	26,69%	6,62	11,21%	6,62	12,48%	6,62
Plateau 2	15,49%	3,04	5,64%	3,04	6,44%	3,04
Plateau 1	2,77%	0,90	0,55%	0,90	1,40%	0,90
L-moy-géom*		8,39		12,69		12,65
ET-géom*		1,12		1,10		1,15

*La longueur moyenne géométrique (L-moy-géom) et l'écart-type géométrique (ET-géom) sont calculés en fonction de la masse et de la longueur de chaque fraction (ASABE, 2012a).

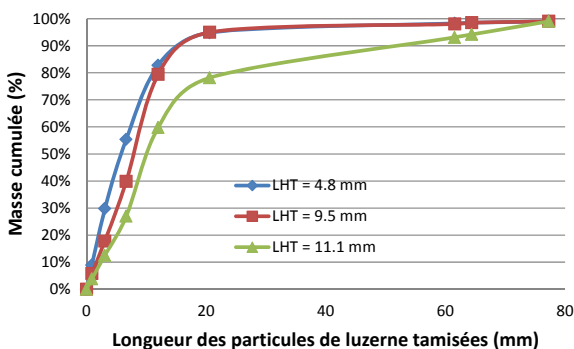


Figure 2. Distribution cumulative des particules de luzerne à 3 longueurs de hachage théorique (LHT) suite au tamisage mécanique.

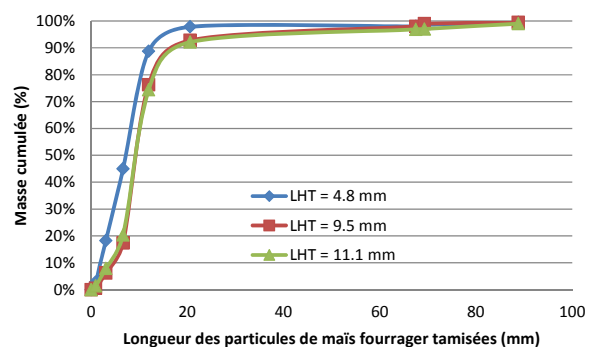


Figure 3. Distribution cumulative des particules de maïs fourrager à 3 longueurs de hachage théorique (LHT) suite au tamisage mécanique.

Tableau 3. Données mesurées par analyse d'images des particules de **luzerne** hachées théoriquement à 3/16 po (4,8 mm) et tamisées selon la norme de l'ASABE (2012a). Chaque valeur est une moyenne de 9 images (3 tamisages mécaniques x 3 images par tamisage).

Plateau	Nombre de particules par image	Longueur des particules (mm)			Aire moy. (mm ²)	Largeur moy. (mm)	Masse par image (g MS)	Épaisseur moy. (mm)
		Moy.	ÉT	Max.				
6	140	20,5	26,0	114,5	52,8	3,20	0,964	0,179
5	207	14,9	14,5	80,0	34,5	2,95	0,881	0,169
4	298	11,6	8,96	57,2	26,0	2,84	0,782	0,138
3	327	8,03	5,23	34,0	15,5	2,46	0,489	0,132
2	603	4,91	3,13	25,1	7,40	1,91	0,366	0,112

Tableau 4. Données mesurées par analyse d'images des particules de **luzerne** hachées théoriquement à 3/8 po (9,5 mm) et tamisées selon la norme de l'ASABE (2012a).

Plateau	Nombre de particules par image	Longueur des particules (mm)			Aire moy. (mm ²)	Largeur moy. (mm)	Masse par image (g MS)	Épaisseur moy. (mm)
		Moy.	ÉT	Max.				
6	76	26,2	37,2	165,9	90,4	4,36	1,104	0,221
5	118	21,4	19,3	75,0	66,2	3,93	0,929	0,163
4	131	15,2	10,4	63,0	47,5	4,02	0,645	0,141
3	216	9,69	5,00	28,0	21,2	2,75	0,482	0,144
2	451	5,03	3,58	27,2	7,9	1,96	0,259	0,099

Tableau 5. Données mesurées par analyse d'images des particules de **luzerne** hachées théoriquement à 7/16 po (11,1 mm) et tamisées selon la norme de l'ASABE (2012a).

Plateau	Nombre de particules par image	Longueur des particules (mm)			Aire moy. (mm ²)	Largeur moy. (mm)	Masse par image (g MS)	Épaisseur moy. (mm)
		Moy.	ÉT	Max.				
6	138	20,6	27,0	123,1	72,8	4,58	1,156	0,156
5	207	13,7	16,1	70,6	40,2	3,78	0,938	0,155
4	190	12,9	10,8	53,3	40,6	3,98	0,723	0,128
3	241	9,17	6,76	39,0	20,1	2,79	0,447	0,126
2	502	4,63	3,69	26,9	6,64	1,82	0,199	0,082

Tableau 6. Comparaison des longueurs moyennes de particules de **luzerne** par plateau à trois longueurs de hachage théoriques (LHT).

	Longueur moyenne des particules au tamis ou par analyse d'images (mm)					
	LHT = 3/16 po (4,8 mm)		LHT = 3/8 po (9,5 mm)		LHT = 7/16 po (11,1 mm)	
	Tamis	Images	Tamis	Images	Tamis	Images
Plateau 6	64,4	20,5	61,5	26,2	77,3	20,6
Plateau 5	20,58	14,9	20,58	21,4	20,58	13,7
Plateau 4	11,96	11,6	11,96	15,2	11,96	12,9
Plateau 3	6,62	8,03	6,62	9,69	6,62	9,17
Plateau 2	3,04	4,91	3,04	5,03	3,04	4,63
Plateau 1	0,90	-	0,90	-	0,90	-

Tableau 7. Données mesurées par analyse d'images des particules de **maïs fourrager** hachées théoriquement à 3/16 po (4,8 mm) et tamisées selon la norme de l'ASABE (2012a). Chaque valeur est une moyenne de 9 images (3 tamisages mécaniques x 3 images par tamisage).

Plateau	Nombre de particules par image	Longueur des particules (mm)			Aire moy. (mm ²)	Largeur moy. (mm)	Masse par image (g MS)	Épaisseur moy. (mm)
		Moy.	ÉT	Max.				
6	62	26,7	31,2	125,6	173,1	8,39	1,646	0,209
5	115	23,5	18,3	88,7	85,3	4,65	1,323	0,185
4	252	11,6	7,72	60,8	30,4	3,32	1,282	0,229
3	352	7,88	3,47	31,3	16,2	2,62	0,575	0,138
2	319	5,60	2,32	25,5	6,53	1,48	0,202	0,132

Tableau 8. Données mesurées par analyse d'images des particules de **maïs fourrager** hachées théoriquement à 3/8 po (9,5 mm) et tamisées selon la norme de l'ASABE (2012a).

Plateau	Nombre de particules par image	Longueur des particules (mm)			Aire moy. (mm ²)	Largeur moy. (mm)	Masse par image (g MS)	Épaisseur moy. (mm)
		Moy.	ÉT	Max.				
6	56	40,3	36,8	143,6	240,5	7,70	4,294	0,432
5	173	23,8	18,1	101,2	98,2	5,25	2,783	0,224
4	249	12,3	5,73	44,5	39,0	4,00	1,994	0,281
3	422	9,16	3,46	28,1	15,6	2,17	1,045	0,217
2	387	6,33	3,57	42,7	8,83	1,78	0,486	0,195

Tableau 9. Données mesurées par analyse d'images des particules de **maïs fourrager** hachées théoriquement à 7/16 po (11,1 mm) et tamisées selon la norme de l'ASABE (2012a).

Plateau	Nombre de particules par image	Longueur des particules (mm)			Aire moy. (mm ²)	Largeur moy. (mm)	Masse par image (g MS)	Épaisseur moy. (mm)
		Moy.	ÉT	Max.				
6	53	43,5	43,4	217,4	362,2	10,4	3,979	0,283
5	142	24,5	18,1	110,2	118,8	6,11	2,259	0,183
4	205	13,3	6,27	42,9	46,6	4,45	2,470	0,355
3	375	10,2	3,99	31,0	19,4	2,42	1,362	0,257
2	407	5,84	2,90	22,3	7,73	1,69	0,654	0,285

Tableau 10. Comparaison des longueurs moyennes de particules de **maïs fourrager** par plateau à trois longueurs de hachage théoriques (LHT).

	Longueur moyenne des particules au tamis ou par analyse d'images (mm)					
	LHT = 3/16 po (4,8 mm)		LHT = 3/8 po (9,5 mm)		LHT = 7/16 po (11,1 mm)	
	Tamis	Images	Tamis	Images	Tamis	Images
Plateau 6	67,5	26,7	69,3	40,3	88,8	43,5
Plateau 5	20,58	23,5	20,58	23,8	20,58	24,5
Plateau 4	11,96	11,6	11,96	12,3	11,96	13,3
Plateau 3	6,62	7,88	6,62	9,16	6,62	10,2
Plateau 2	3,04	5,60	3,04	6,33	3,04	5,84
Plateau 1	0,90	-	0,90	-	0,90	-

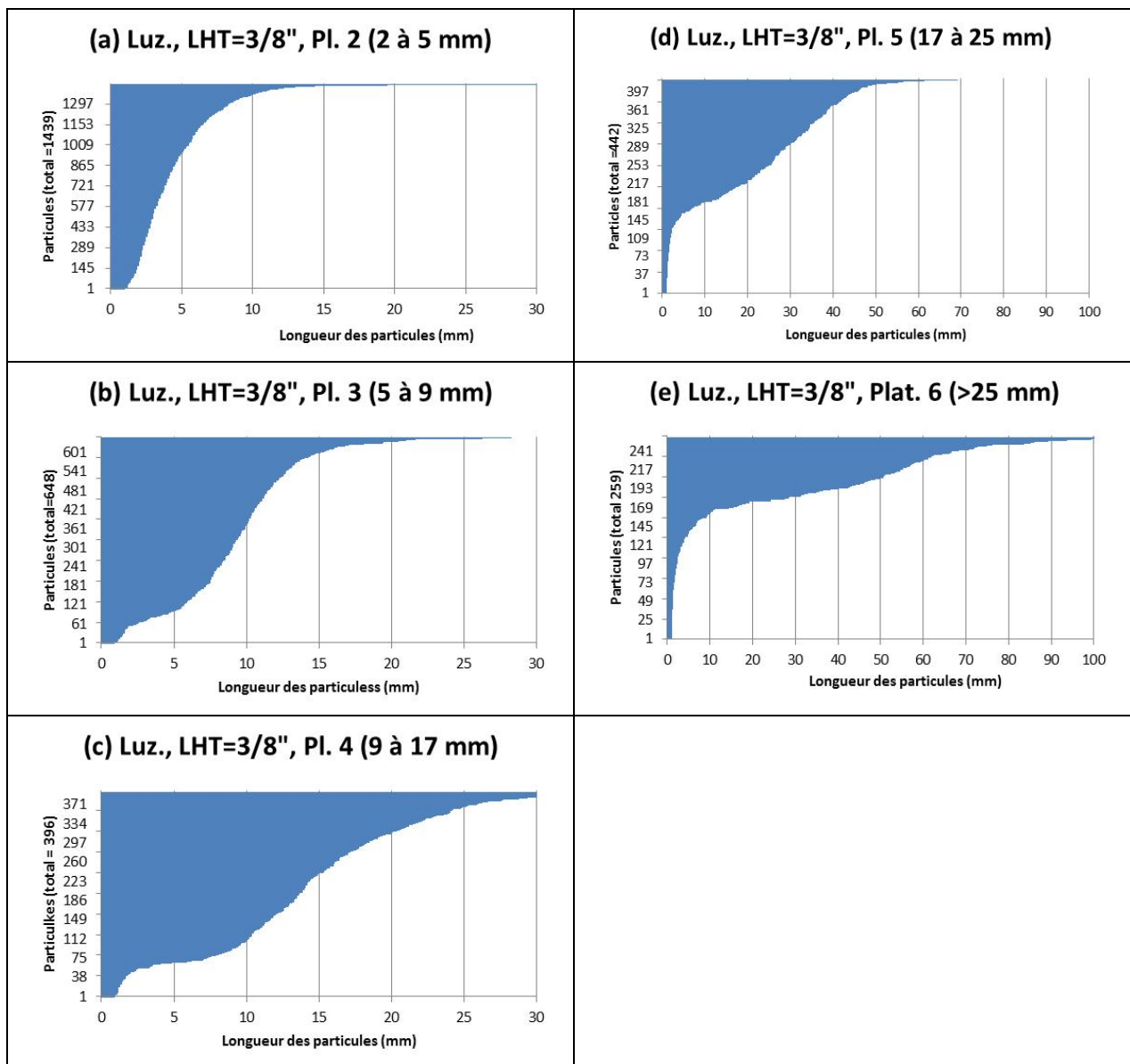


Figure 4. Exemple de distributions des particules dans les cinq plateaux de tamisage suite à l'analyse d'images (luzerne, LHT de 3/8 pouce ou 9 mm, répétition #1, longueurs vectorielles).

CONCLUSION

L'analyse d'images fournit des données très détaillées sur la géométrie des particules de fourrages hachées, y compris la longueur, la largeur, l'épaisseur, la surface et le ratio masse/surface. Ces données sont possiblement trop détaillées par rapport aux connaissances actuelles sur l'ingestion et la digestion des aliments. Par contre, la technique peut commencer à être implantée dans les laboratoires d'analyses de fourrages et servir éventuellement à diagnostiquer des problèmes de conservation ou des troubles digestifs chez les animaux. Ces informations complémentaires sur les particules seront utiles aux fabricants de fourragères pour intégrer des algorithmes d'optimisation de la longueur de hachage en temps réel durant la récolte.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Agriculture et Agroalimentaire Canada pour son soutien du prix du mérite scientifique ainsi que Ressources Naturelles Canada pour les fonds du programme d'innovation en énergie écologique (ecoEII, piste A). M. Guillaume Pilon a mis en place les logiciels et le système d'analyse d'images, d'abord pour les biomasses arbustives. Finalement, les auteurs remercient le personnel du CRSAD, en particulier le regretté Guy Julien, qui nous a quitté le 2 novembre 2012, quelques semaines après avoir organisé la récolte des fourrages au champ.

LISTE DES OUVRAGES CITÉS

- ASABE. 2012a. Method of Determining and Expressing Particle Size of Chopped Forage Materials by Screening. Standard S424.1. 3 pages. ASABE, St. Joseph, MI.
- ASABE. 2012b. Moisture Measurement – Forage. ANSI/ASABE Standard S358.2. 1 page. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI.
- Brouillette, J. 2011. Forage particle size: What's ideal? Progressive Dairyman. <http://www.progressivedairy.com/>
- de Onarza, M. B. 2011. La digestibilité des fourrages. Colloque sur les plantes fourragères. Pages 33 à 37. Drummondville, 11 novembre 2011. CRAAQ, Québec, QC.
- Igathinathane, C., Pordesimo, L.O., Columbus, E.P., Batchelor, W.D., Sokhansanj, S. 2009. Sieveless particle size distribution analysis of particulate materials through computer vision. *Computer and Electronics in Agriculture*, 66, 147–158.
- Kononoff, P. J., A. J. Heinrichs and D. R. Buckmaster. 2003. Modification of Penn State forage and total mixed ration particle separator and the effects of moisture content on its measurements. *Journal of Dairy Science* 86:1858-1863.
- MacDonald, P., A. R. Henderson, and S. J. E. Heron. 1991. *The Biochemistry of Silage*. Chalcombe Publications, 2nd Edition, 340 pages. Bucks, UK.
- Pilon, G. et P. Savoie. 2012. Étude de la mesure de particules de biomasse plus petites que 150 mm en une et deux dimensions. Rapport de recherche. Mai 2012. 104 pages. Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2560 boulevard Hochelaga, Québec, QC, Canada, G1V 2J3.
- Rinne, M. and A. Seppälä. 2011. Particle size effects of forages on the ensiling process and animal performance. Pages 233-256 in *Proceedings of the II International Symposium on Forage Quality and Conservation*. Sao Pedro, Brazil. November 16-19. Editors: J. L. P. Daniel, M. Zopollatto and L. G. Nussio. University of Sao Paulo, ESALQ, Piracicaba.
- Savoie, P., D. Tremblay, R. Thériault, J.M. Wauthy and C. Vigneault. 1989. Forage chopping energy versus length of cut. *Transactions of the ASAE* 32(2):437-442.
- Savoie, P., K.J. Shinnars and B.N. Binversie. 2004. Hydrodynamic separation of grain and stover components in corn silage. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 113: 41-54.
- Savoie, P. et K. J. Shinnars. 2009. Les progrès en récolte des ensilages. *Info-Fourrages*, déc. 2009 (numéro 3), pages 6 à 8. Conseil québécois de plantes fourragères, Québec, QC.
- Shaver, R. 1990. Forage particle length in dairy rations. Proc. from the Dairy Feeding Systems Symposium.