



Symposium sur les bovins laitiers
Choix d'aujourd'hui pour les défis de demain

Le mercredi 5 novembre 2014
Centre BMO, Saint-Hyacinthe

***Nouveautés sur l'ensilage de maïs,
un fourrage pas comme les autres***

Mario Boivin, M.Sc., agronome, nutritionniste en production laitière, La Coop fédérée

Collaborateurs :

Yvan Chouinard, Ph.D., agronome, professeur titulaire, FSAA, Université Laval

Alain Fournier, M.Sc., agronome, conseiller en production laitière et bovine, MAPAQ, Direction
régionale du Centre-du-Québec

Germain Lefebvre, agronome, Président, Agro-Bio Contrôle Inc.



CULTIVER L'EXPERTISE
DIFFUSER LE SAVOIR

Comité bovins laitiers

Nouveautés sur l'ensilage de maïs, un fourrage pas comme les autres

FAITS SAILLANTS

- **Récolter l'ensilage de maïs au bon stade de maturité est le facteur le plus important pour optimiser sa digestibilité.**
- **Un bon ajustement de la longueur de coupe théorique et de l'unité de conditionnement améliore la digestibilité de l'ensilage de maïs.**
- **Les nouvelles technologies de conditionnement montrent un potentiel intéressant.**
- **L'ensilage de maïs devrait être servi après 2 à 3 mois d'entreposage, puisqu'il est alors plus stable et que la digestibilité de son amidon augmente au cours de la période de conservation.**
- **L'ensilage de maïs est un fourrage de grande valeur énergétique et ses particularités (sa teneur en amidon, son profil en acides gras et la taille de ses particules) devraient être considérées lors du calcul de la ration.**

INTRODUCTION

L'ensilage de maïs est un fourrage de choix pour l'alimentation de la vache laitière pour plusieurs raisons. D'abord, sa contribution à l'énergie de la ration est importante et est généralement plus élevée que les autres fourrages. En début de lactation, les besoins sont tels que l'énergie constitue le facteur le plus limitant. Lorsque la production de lait est élevée et/ou que la consommation de matière sèche (MS) n'est pas à son maximum, le déficit énergétique engendré peut occasionner une baisse des performances laitières et de reproduction ainsi que des désordres métaboliques.

L'ensilage de maïs offre aussi un rendement élevé en matière sèche à l'hectare, ce qui libère des superficies pour la production d'autres cultures. Il facilite également l'accroissement du troupeau sans avoir à acheter des surfaces additionnelles. Ainsi, en même temps que le nombre de fermes laitières est en diminution au Québec, la taille des troupeaux ne cesse d'augmenter (Gouin, 2012). La régie de ces troupeaux est en évolution constante. L'ensilage de maïs est d'autant plus attrayant, particulièrement pour ces troupeaux qui ont besoin d'un volume considérable de fourrage entreposé à l'année. La culture de l'ensilage de maïs a augmenté de 80 % au cours des vingt dernières années (Figure 1). Cet accroissement est principalement observé dans les régions du Bas-Saint-Laurent, de l'Estrie, de Chaudière-Appalaches et du Centre-du-Québec. On note une certaine stabilité dans le nombre d'hectares utilisés pour la culture de l'ensilage de maïs en 2006 et 2011, à l'exception des régions de Chaudière-Appalaches et du Centre-du-Québec. Par contre, une diminution des superficies cultivées en luzerne, mélanges de luzerne et autres foin de 10 % pourrait indiquer que les éleveurs se sont probablement orientés un peu plus vers la culture de l'ensilage de maïs pour combler les besoins en fourrage de leur troupeau (Statistique Canada 2011b).

L'ensilage de maïs constitue donc une option intéressante puisqu'il nécessite une moins grande superficie pour une même quantité de MS récoltée. De plus, le chantier de récolte est très efficace puisqu'un seul passage est nécessaire de la coupe à l'entreposage réduisant ainsi le risque de détérioration au champ et facilitant la récolte d'un fourrage homogène.

Pour que la vache puisse tirer le maximum d'énergie de l'ensilage de maïs, ses principaux constituants et précurseurs d'énergie que sont la fibre NDF et l'amidon doivent être digestibles. Les progrès réalisés dans plusieurs sphères reliées à la production d'ensilage de maïs permettent aujourd'hui de mieux évaluer la digestibilité de ces constituants et même de l'améliorer. Les récentes avancées en génétique et en conditionnement à la récolte, ainsi que les connaissances récentes sur les transformations durant la période d'entreposage seront abordées dans ce document. Finalement, l'incorporation de l'ensilage de maïs dans la ration a un impact positif sur la performance des vaches laitières et sur l'efficacité de l'utilisation de l'azote non protéique des fourrages de légumineuses. Selon la littérature scientifique, cet impact peut varier en fonction de plusieurs paramètres.

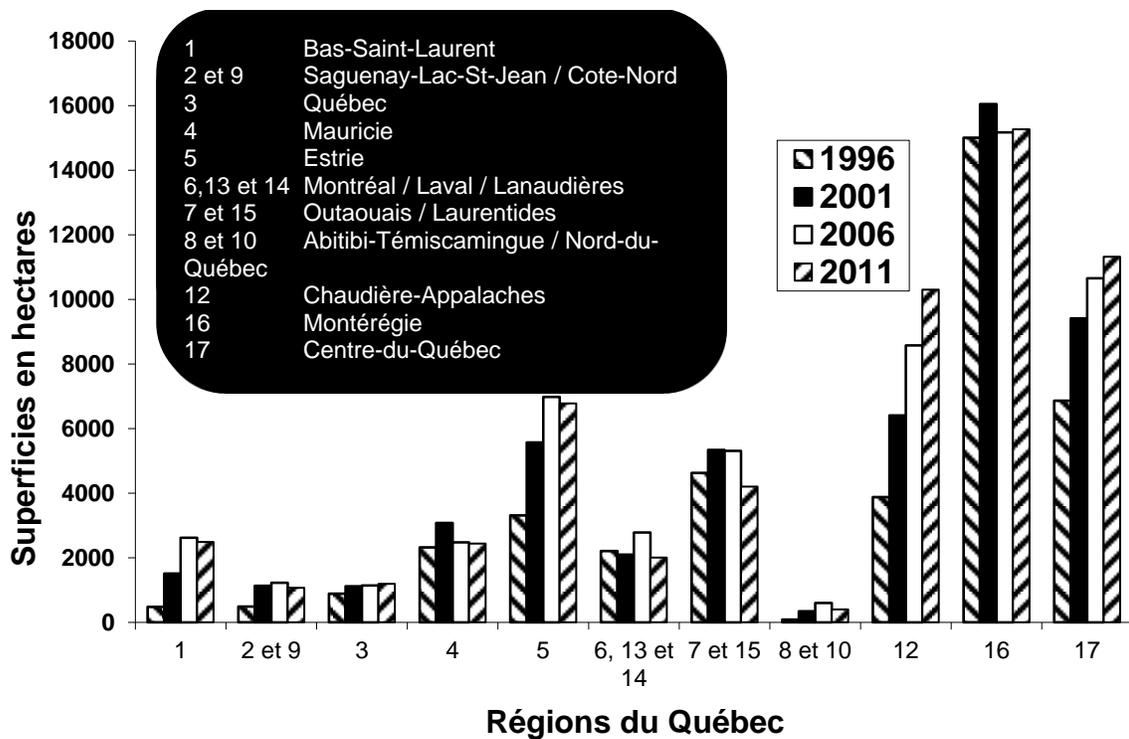


Figure 1. Superficies déclarées en ensilage de maïs par région du Québec pour les années 1996, 2001, 2006 et 2011. Source : Statistiques Canada 2011b.

PARTICULARITÉS DE L'ENSILAGE DE MAÏS

L'ensilage de maïs comporte son lot de particularités qui lui sont propres telles que ses grains, sa composition en acides gras insaturés, ainsi que la taille de ses particules. Ces particularités lui confèrent des caractéristiques qui le distinguent des autres fourrages.

Les grains

Contrairement aux autres fourrages, l'ensilage de maïs est composé de deux fractions distinctes. En 1954, Huffman et Duncan avancent que l'ensilage de maïs ne devrait pas être considéré comme un fourrage, mais plutôt comme un mélange de fourrage et de grains. Plus tard, Broderick (1985) poursuit dans le même sens en mentionnant que l'ensilage de maïs présente une composition semblable à un mélange de grains de maïs et d'un fourrage de graminées. Le fait que les plants de maïs puissent être récoltés et conservés sous forme d'ensilage, comme les autres fourrages, explique probablement pourquoi l'ensilage de maïs est encore considéré aujourd'hui simplement comme un fourrage. Pour illustrer l'importance des grains, une expérience réalisée à l'Université Laval (Boivin et al., 2013) a montré que la production laitière a été plus élevée de 3,9 kg/j lorsque des vaches ont été alimentées avec une ration à base d'ensilage de maïs entier comparativement à un ensilage dont les épis avaient été retirés avant la récolte.

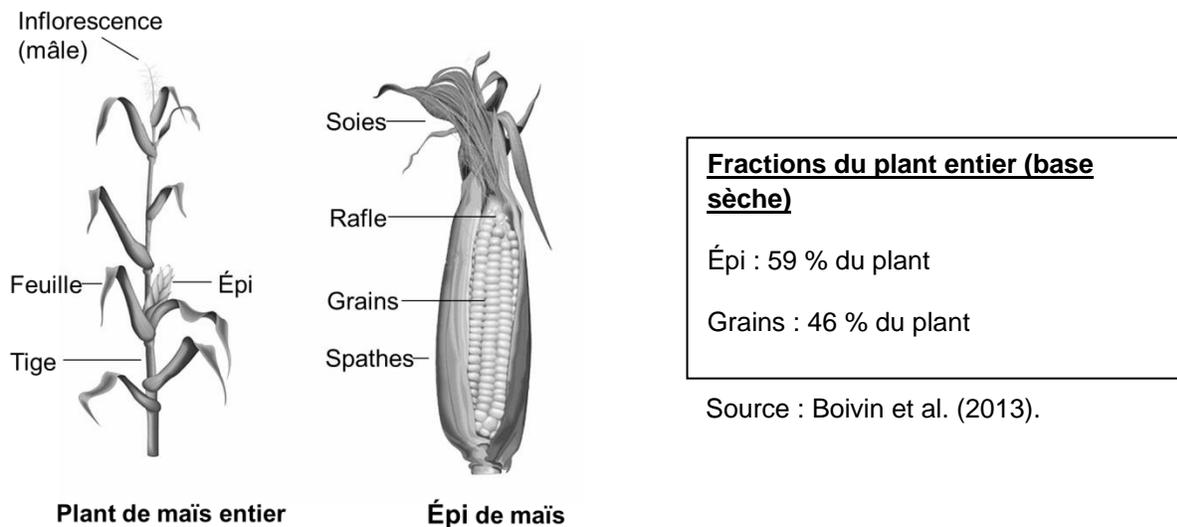


Figure 2. Parties d'un plant de maïs entier et de son épi.

L'examen d'un plant entier de maïs (Figure 2) permet de mieux distinguer les différentes parties qui le composent. On pourrait immédiatement diviser le plant de maïs en deux parties: l'épi et le reste du plant. D'abord, l'épi représente la partie qui différencie le plus un plant de maïs des autres plantes fourragères. L'épi est à son tour composé de grains, de spathes, de la raflé et des soies. Les grains ont une teneur élevée en amidon et faible en fibre NDF, et constituent la fraction « concentrés » de l'ensilage de maïs. Dans une parcelle située au Centre de Recherche en Sciences Animales de Deschambault récoltée entre 30 et 35 % de MS, Boivin et al. (2013) ont mesuré qu'en moyenne sur une base de MS, l'épi représentait 59 % et le grain 46 % du plant de maïs entier (base sèche) de type traditionnel. Des proportions similaires avaient aussi été rapportées par Shinnars et al. (2003). Ensuite, les autres parties de l'épi avec le reste du plant (la tige, les feuilles et l'inflorescence mâle) représentent la fraction « fourrage ». La proportion de chacune des parties du plant de maïs (pourcentage de la MS totale) changera selon la maturité. Par exemple, la fraction grain sera plus importante à mesure que le plant avancera en maturité, augmentant ainsi le rapport grains:fourrage (Shinnars et al., 2003).

Les acides gras insaturés

Comme tout fourrage, l'ensilage de maïs contient des lipides. Cependant, contrairement aux plantes fourragères, une bonne partie des lipides de l'ensilage de maïs est apportée par les grains. La teneur en gras d'un ensilage de maïs contenant entre 32 à 38 % de MS est de 3,2 % ($\pm 0,7$ d'écart type) sur une base matière sèche (NRC, 2001).

Comme plusieurs gras d'origine végétale, l'huile de maïs contient une bonne proportion d'acides gras insaturés (environ 75 %). La concentration relativement élevée en acide linoléique (18:2 *cis*-9, *cis*-12; 48 %), un acide gras oméga-6, et faible en acide linoléique (18:3 *cis*-9, *cis*-12, *cis*-15; 8 %), un acide gras oméga-3, est une autre caractéristique de l'huile contenue dans ce fourrage. Les fourrages de plantes pérennes, comme les légumineuses et graminées cultivées au Québec contiennent beaucoup plus d'acide linoléique que l'ensilage de maïs (Boufaïed et al., 2003) L'ensilage de maïs ne représenterait donc pas un aliment de choix pour améliorer la teneur en acides gras oméga-3 du lait ou de la viande. Cependant, il est une source d'acide linoléique disponible dans le rumen.

La taille des particules

L'équipement qui sert à récolter les plants de maïs au champ est essentiellement le même que pour les plantes fourragères, mise à part la partie avant de la fourragère qui est adaptée selon le fourrage à

récolter, afin de faciliter l'alimentation de l'appareil. Aussi, il est possible d'ajuster les couteaux de la fourragère pour obtenir la longueur de particules d'ensilage désirée, ainsi qu'une unité de conditionnement pour briser les grains et augmenter leur accessibilité aux micro-organismes du rumen. Cependant, la longueur de particules obtenue devrait aussi assurer une bonne prise alimentaire et surtout éviter de perturber l'environnement ruminal.

Puisque l'ensilage de maïs contient des grains, il serait logique de supposer que la taille des particules ne soit pas semblable à celle des autres fourrages. Dans une étude visant à mesurer l'effet acidifiant des concentrés et l'impact de la taille des particules de fourrages chez la vache, Rustomo et al. (2006) ont comparé la distribution de la taille des particules de l'ensilage de maïs à celle de l'ensilage de luzerne. À l'aide d'un « Penn State Particle Separator » (PSPS) composé des tamis de 19,0, 8,0 et 1,18 mm de diamètre ainsi que du plateau, ils ont mesuré la distribution des particules des deux ensilages. Même si la taille moyenne pour l'ensilage de maïs ne différait pas beaucoup de celle de l'ensilage de luzerne (13,4 et 14,5 mm respectivement), la distribution des particules selon leur taille était différente. Les pourcentages (base MS) de particules d'ensilage de maïs retenu sur chaque tamis ont été 9,0, 67,4, 22,1 et 1,5 % respectivement, alors qu'ils ont été de 20,1, 56,3, 19,9 et 5,2 % pour l'ensilage de luzerne. Ces observations indiquent que c'est plus précisément dans la répartition des particules selon leur taille que l'ensilage de maïs diffère des autres fourrages, avec moins de particules longues. Un temps de mastication inférieur avec l'ensilage de maïs, par rapport à l'ensilage de luzerne, laisse sous-entendre qu'avec une même teneur en fibres, celles d'une ration à base d'ensilage de maïs pourraient ne pas être aussi efficaces (Clark et Armentano, 1999). Un pouvoir tampon naturel plus faible (Crawford et al., 1983) relié à sa teneur plus faible en minéraux et protéines et combiné aux effets associés à la taille des particules (discutés plus haut), confèrent à l'ensilage de maïs un statut particulier comparativement aux autres fourrages.

LES TYPES D'HYBRIDES DE MAÏS

Que ce soit à la suite d'une mutation naturelle, d'un transfert de gènes spécifiques dirigé, ou simplement de croisements, plusieurs types de maïs, en plus des hybrides de type traditionnel, sont maintenant disponibles sur le marché. Chacun de ces types de maïs a ses particularités qui les différencient du maïs traditionnel. Les principaux types de maïs qui sont utilisés pour la production d'ensilage seront décrits brièvement dans cette section.

Type Traditionnel (à deux fins)

Les hybrides de maïs de type traditionnel sont de loin les plus utilisés pour la production d'ensilage de maïs au Québec. Les termes « maïs conventionnels » ou « maïs à deux fins » sont aussi parfois employés. Le terme « Traditionnel » est utilisé ici pour désigner les hybrides qui n'ont pas fait l'objet de changements génétiques importants dans de la proportion relative des parties du plant et de leur composition chimique, ce qui ne veut pas dire que ses hybrides n'ont bénéficié d'aucune amélioration génétique. Au contraire, ceux-ci sont généralement sélectionnés pour offrir un grand potentiel de rendement en grains et en MS à l'hectare.

Habituellement composé d'une bonne proportion de grains et de fibres digestibles, le maïs de type traditionnel est aussi en mesure de produire un ensilage de qualité. Cependant, la sélection des hybrides destinés à la récolte de maïs grain ne considère pas la digestibilité de la fibre NDF alors que ce critère est en général maintenant pris en considération pour ceux destinés à la production d'ensilage. Quant aux grains, ils ont une composition relativement semblable à ceux des hybrides à grains et ont un poids spécifique élevé.

Plusieurs des hybrides traditionnels cultivés maintenant au Québec ont le gène *bt*. C'est-à-dire que par transgénèse, ces variétés sont en mesure de lutter contre certains insectes dont principalement la pyrale, la chrysomèle des racines du maïs, améliorant ainsi la tenue afin de réduire les pertes au champ et les blessures qui peuvent occasionner sa contamination par des moisissures. Certains maïs sont aussi tolérants à quelques herbicides afin de faciliter le désherbage et ainsi augmenter le rendement.

Type Feuillu (Leafy)

Comme le nom l'indique, les plants de maïs des hybrides de type feuillu contiennent plus de feuilles au-dessus de l'épi (Cox et Cherney, 2001) et par conséquent devraient avoir un rapport grains:fouillage plus faible. En effet, il est possible d'observer huit feuilles et plus dans la partie supérieure à l'épi chez les maïs de type feuillu, alors que le nombre maximal de feuilles est de sept pour les autres types de maïs.

Les premiers hybrides de type feuillu ont fait leur apparition au début des années 90 et ont d'abord été développés dans l'espoir de permettre au plant une meilleure croissance et afin d'obtenir plus de rendements au champ. Aussi, un plus grand nombre de feuilles par plant devait permettre d'améliorer la digestibilité de la fibre et ainsi améliorer les performances animales (Cox et Cherney, 2001). Toutefois les résultats sont partagés. Certaines études (Thomas et al., 2001; Clark et al., 2002) qui comparaient l'ensilage de maïs feuillu à l'ensilage de maïs traditionnel ont montré des améliorations de la production de lait, mais aucune différence sur la teneur et la quantité de matières grasses produites. Bal et al. (2000a) n'ont quant à eux obtenu aucune augmentation de la production de lait et de matières grasses, même si la teneur en matières grasses du lait avait tendance à être plus élevée. Plus récemment, Nennich et al. (2003), qui avaient pourtant mesuré une meilleure digestibilité de la fibre NDF, n'ont obtenu aucun effet sur la production de lait et de ses composants.

Type Brown midrib (bmr)

Le génotype Brown midrib (à nervure brune), communément appelé bmr, est issu d'une mutation génétique qui aurait été observée pour la première fois en 1924 sur des plants de maïs cultivés à la ferme de recherche de l'Université du Minnesota selon une revue de Barrière et Argillier (1993). Des gènes du bmr ont aussi été trouvés plus tard chez le sorgho (*bm6* et *bm12*) et le millet perlé. Jusqu'à maintenant, quatre gènes ont été trouvés pour le maïs (*bm1*, *bm2*, *bm3*, *bm4*) qui confèrent à la plante à peu près les mêmes propriétés selon cette revue. Une caractéristique spécifique permet de les identifier assez facilement au champ. Les auteurs indiquent que la couleur de la nervure centrale des feuilles et du centre de la tige est brune avec une légère teinte rouge. Les autres caractéristiques majeures ont trait à la composition chimique des tissus structuraux de la plante. Barrière and Argillier (1993) mentionnent que les gènes du bmr réduisent non-seulement la teneur en lignine de la plante, mais modifient aussi la composition de la lignine en réduisant le rapport des acides *p*-coumarique/*p*-fêrulique. Les mêmes auteurs rapportent que la réduction de la teneur en lignine peut aller jusqu'à 40 % par rapport aux plants de maïs traditionnels, et que le gène *bm3* semble être celui qui a le plus d'effet sur la lignine.

La digestibilité de la lignine est très faible, voire presque nulle chez les vaches, en plus de nuire à la digestion de la cellulose et des hémicelluloses. La fibre NDF du génotype bmr est donc plus digestible, ce qui permet d'espérer de meilleures performances zootechniques. Plusieurs études (Oba et Allen, 1999; Oba et Allen, 2000b; et Holt et al., 2013) ont confirmé l'amélioration de la digestibilité *in vitro* (30 heures) de la fibre NDF (environ +9 unités de pourcentage). Dans l'une de ces études, Oba et Allen (1999) observent aussi une meilleure digestibilité de la fibre NDF *in vivo* mais moins marquée qu'*in vitro*. Il se pourrait qu'à cause d'une plus grande ingestion, le temps de rétention dans le rumen soit plus faible, atténuant ainsi l'amélioration de la digestibilité qui est mesurée pour des temps identiques *in vitro*. Cette étude, ainsi que celle de Kung et al. (2008), montrent une meilleure production de lait, et de lait corrigé à 3,5 % de matières grasses avec de l'ensilage de maïs bmr (*bm3*). Le niveau total de fibre NDF et le type d'endosperme des grains de maïs de la ration pourraient modifier l'effet de l'ensilage de maïs bmr sur la teneur en matières grasses du lait. En effet, Oba et Allen (2000a) ont observé une réduction du taux de matières grasses lorsque le niveau de fibre NDF de la ration avec l'ensilage de maïs bmr était faible (29 vs 38 %). Dans une autre étude, les vaches alimentées avec une ration contenant de l'ensilage bmr et des grains de maïs à endosperme farineux ont eu tendance à produire du lait à teneur plus élevée en matières grasses et plus de lait corrigé à 3,5 % de matières grasses, que lorsque l'endosperme des grains était vitreux (Taylor et Allen, 2005a). Le concept d'endosperme et ses caractéristiques seront traités plus loin dans le texte.

Plus récemment, avec une ration composée de 35 % d'ensilage de maïs, 25 % de foin de luzerne et complétée par des concentrés, aucune augmentation d'ingestion de MS et de production laitière n'a été observée lorsque l'ensilage de maïs traditionnel a été remplacé par un maïs bmr pour la période de 0 à

60 jours en lactation (Holt et al., 2013). Cependant, de 60 à 180 jours en lactation, ils ont observé une augmentation significative de la consommation de MS (+1,1 kg/j) et de la production de lait (+2,2 kg/j) mais aussi une baisse importante du taux de matières grasses du lait (-0,33 unités de pourcentage) lorsque les vaches recevaient du maïs bmr. Par conséquent, la production laitière corrigée à 3,5 % n'a pas été différente durant la période de l'essai. Dans une autre étude (Stone et al., 2012), les vaches en transition pré et post-vêlage recevant une ration avec du maïs bmr au lieu du maïs traditionnel, ont augmenté leur ingestion de MS ainsi que leur production de lait après le vêlage, et ce même après le retrait du maïs bmr. Il est à noter que la digestibilité de la fibre NDF (30 heures) était beaucoup plus élevée (+17 unités de pourcentage) pour le maïs bmr que celle rapportée par la littérature.

L'utilisation de l'ensilage de maïs bmr pour l'alimentation des vaches laitières est moins répandue que celle de l'ensilage de maïs traditionnel. Pourtant, la quantité de lait produite par tonne d'ensilage de maïs (base MS) est souvent plus élevée (Kung et al., 2008). Cependant, le plus faible rendement aux champs (environ 10 %) des variétés bmr (Eastridge, 1999) atténue cet avantage, et peut même diminuer la production de lait par hectare (Kung et al., 2008). Aussi, la plus grande sensibilité aux insectes et à la verse, qui est probablement liée à la faible teneur en lignine, peut compliquer la récolte (voir même la rendre impossible) et représenter un inconvénient.

Type Cireux (Waxy)

C'est la composition unique de l'amidon du maïs de type cireux (waxy) qui distingue cet hybride des autres. L'amidon des hybrides cireux est presque entièrement composé d'amylopectine contrairement à l'amidon des autres types de maïs formé d'environ 75 % d'amylopectine et de 25 % d'amylose (Barlow et al., 2012). Les chaînes ramifiées de glucose de l'amylopectine augmentent la digestibilité de l'amidon des grains du type cireux (Mohd et Wootton, 1984). Peu d'essais ont permis d'évaluer les effets de ce type de maïs chez la vache. Des améliorations dans la production de lait, corrigé ou non pour la teneur en matières grasses, ont été observées en comparaison à un maïs traditionnel, sans pour autant affecter le taux de matières grasses (Akay et Jackson, 2001). Pourtant, Barlow et al. (2012) n'ont pas obtenu de différence de consommation volontaire de matière sèche (CVMS) et de production de lait avec une ration à base d'ensilage de maïs cireux par rapport à un hybride traditionnel.

Types Dentés ou Cornés

Les maïs de types dentés ou cornés se distinguent par la forme du grain. La composition de l'endosperme, qui est la partie du grain qui renferme l'amidon, permet également de les différencier. On retrouve dans le maïs des endospermes vitreux et farineux. Le ratio de ces deux types d'endospermes diffère entre les maïs de types dentés et cornés (Ngonyamo-Majee et al., 2008a; Ngonyamo-Majee et al., 2008b). La proportion d'endosperme vitreux est plus élevée chez les génotypes cornés que chez les génotypes dentés (Philippeau et al., 2000). La couleur jaune-orangée, l'aspect lustré et translucide ainsi que la dureté sont des caractéristiques qui permettent de distinguer facilement l'endosperme vitreux de l'endosperme farineux. De plus, le ratio peut changer selon les variétés ainsi que selon la maturité (Correa et al., 2002), car la proportion d'endosperme vitreux augmentera avec la maturité du grain. Les granules d'amidon contenus dans l'endosperme du grain sont recouverts d'une matrice de protéine qui les unit les uns aux autres, un peu comme le mortier retient les briques d'une structure. Ici, le mortier c'est la prolamine. Les granules d'amidon du type vitreux sont recouverts d'une pellicule plus épaisse de prolamine (Larson et Hoffman, 2008). Au contraire, le contenu en prolamine d'un maïs de type farineux peut représenter seulement 30 % de celui du type vitreux (Lopes et al., 2009). Une mutation génétique serait probablement responsable de l'avènement du type d'endosperme farineux. Les gènes *opaque-2* et *floury-2* sont responsables de la structure d'amidon plus lâche et blanche de l'endosperme de type farineux en réduisant la synthèse et le dépôt de prolamine. Cependant cette caractéristique est plus prononcée avec le gène *opaque-2* (Christianson et al., 1974). Le terme opaque vient du fait que ces grains laissent passer moins la lumière que ceux de type vitreux dont la structure est plus regroupée et dense. Une fertilisation plus riche en azote augmente le dépôt de protéine et de prolamine dans l'endosperme du grain (Tsai et al., 1980). Toutefois, la fertilisation ne devrait pas être orientée pour augmenter cette protéine, mais bien sur le potentiel de rendement et varier en fonction des conditions culturales et environnementales.

La prolamine est une protéine hydrophobe qui constitue une barrière physique à l'hydratation de l'amidon et aux micro-organismes qui la digèrent. En plus de contenir moins de prolamine, la matrice d'amidon de l'endosperme de type farineux est moins dense, ce qui facilite le travail des micro-organismes. D'ailleurs, Lopes et al. (2009) ont mesuré une digestibilité *in vitro* et une digestibilité totale de l'amidon plus élevées avec le type farineux. De plus, Taylor et Allen (2005b) ont obtenu une amélioration de 22 unités de pourcentage de la digestibilité ruminale de l'amidon avec des vaches.

La dégradation ruminale plus rapide de l'amidon du type farineux favorise une baisse du pH ruminal plus marquée (Lopes et al., 2009) et une réduction du rapport acétate:propionate. Cependant, ceci n'a pas conduit à une amélioration de production de lait, ni à une détérioration de la teneur en matières grasses du lait.

Type Feuillu et Farineux

Ce nouveau type d'hybride est issu du croisement d'un maïs d'une lignée parentale de type feuillu avec un maïs d'une lignée ayant le gène *opaque* (Glenn, 2013). L'objectif est d'allier les avantages des deux lignées (voir plus haut). Par contre, étant donné que le gène *opaque* est récessif, ce ne sont pas tous les grains de l'épi qui sont de type farineux lors des premiers croisements. Des travaux de sélection semblent avoir permis d'augmenter la proportion de grains de type farineux afin d'obtenir des épis entièrement composés de grains de type farineux. Récemment, Ferraretto et al. (2014) ont mesuré une digestibilité de l'amidon plus élevée après des incubations *in vitro* et *in situ* (dans le rumen d'une vache) de 5 à 10 unités de pourcentage comparé à un maïs bmr récolté à la même maturité. Lors d'un essai d'alimentation subséquent, le maïs bmr, qui avait une fibre plus digestible, a favorisé une meilleure production de lait, mais une teneur plus faible en matières grasses. Comme ce type d'hybride est nouveau, des essais d'alimentation sont nécessaires pour mesurer s'il y a des effets à la suite de son incorporation dans la ration comparativement à d'autres types de maïs.

AMÉLIORER LA DIGESTIBILITÉ DE L'ENSILAGE DE MAÏS

La digestibilité de l'ensilage de maïs variera selon plusieurs facteurs. La section précédente montre bien que le génotype peut influencer la digestibilité des deux fractions qui composent le plant de maïs et qui seront précurseurs d'énergie chez la vache. En effet, la composition de la fraction fibre (NDF) et de la fraction grain (endosperme i.e. amidon) a un impact sur leur digestibilité respective. Cependant, une fois que l'hybride de maïs a été choisi et mis en terre, il est encore possible d'influencer la digestibilité de l'ensilage de maïs qui sera incorporé dans la ration. Les principaux points sur lesquels il est possible d'intervenir sont résumés dans cette section.

La maturité (le taux de MS)

Effectuer la récolte au bon stade de maturité est primordial; c'est le facteur numéro un. Ce point de régie peut définitivement améliorer la digestibilité de l'ensilage et être appliqué dans toutes les fermes du Québec sans égard à la variété de maïs, à la machinerie de récolte ou à la structure d'entreposage, et ce, sans aucun investissement supplémentaire.

Dans une étude réalisée durant plusieurs années avec différents hybrides de maïs traditionnels, Johnson et al. (2003) ont récolté l'ensilage de maïs à différents stades de maturité allant de 1/3 de la ligne de lait jusqu'au point noir. Après avoir incubé les échantillons dans le rumen de vaches porteuses de canule, ils ont observé que la disparition *in situ* (donc la digestibilité ruminale) de la MS, de la fibre NDF, de l'amidon et de la protéine brute diminuait lorsque la maturité augmentait. Une plante plus mature pourrait avoir déposée plus de lignine et ainsi expliquer une digestibilité plus faible de la fibre NDF. Par contre, il semble que ce ne soit pas le cas pour tous les types de maïs. Une étude récente montre en effet que la digestibilité *in vitro* en 30 heures de la fibre NDF est plus élevée lorsque la MS est de 32 vs 41 % pour un maïs de type bmr, mais aucune différence n'a été observée pour un maïs de type traditionnel (Der Bedrosian et al., 2012).

Dans le même essai, la digestibilité *in vitro* en 7 heures de l'amidon du maïs traditionnel a été moins élevée lorsque l'ensilage était plus mature lors de la mise en silo, alors qu'elle n'était pas différente pour le maïs de type bmr. Le remplissage du grain, c'est-à-dire le dépôt d'amidon dans l'endosperme, progresse avec la maturité. Tel que mentionné dans la section précédente, la formation de la matrice de protéine (prolamine) et la proportion d'amidon de type vitreux augmente en même temps. Par conséquent, la digestibilité de l'amidon diminue progressivement. Ali et al. (2014) explique de cette façon l'augmentation de la teneur en amidon des grains de maïs de différents génotypes avec la maturité, mais en même temps la réduction de la dégradation ruminale.

Quel est le stade de maturité idéale à viser pour maximiser la digestibilité de l'ensilage de maïs? Bien sûr, il est important de prendre en considération le type de structure dans laquelle sera entreposé les plants de maïs récoltés afin d'optimiser les conditions de fermentation pour obtenir un ensilage de qualité et limiter les pertes. Il existe plusieurs ouvrages de références sur le sujet (Fournier et al., 2009). À partir de la compilation des données de plusieurs essais, St-Pierre (2009) résume bien l'impact de la teneur en MS sur la digestibilité de l'ensilage de maïs. Dans la Figure 3, la digestibilité est exprimée en valeur relative de celle de l'ensilage de maïs dont la MS est de 32 à 34 %. Il est intéressant de voir qu'il n'est pas avantageux de récolter en bas de 28 % de MS car la digestibilité diminue (en plus du risque élevé d'écoulement du silo). La digestibilité diminue aussi lorsque la MS est supérieure à 34 %. Dans une méta-analyse récente de Ferraretto et Shaver (2012b), la perte de digestibilité totale de l'amidon observée lorsque la MS de l'ensilage de maïs était supérieure à 40 % s'est traduite par une réduction de la production de laitière de 2 kg/j (Tableau 1). La notion de digestibilité est à tenir en compte, mais la quantité d'aliments ingérée est tout aussi importante dans l'apport en énergie à la vache. La compilation de St-Pierre (2009) montre aussi que la teneur en MS de l'ensilage peut influencer la prise alimentaire. L'optimum de consommation est atteint lorsque la teneur en MS de l'ensilage se situe entre 30 et 35 % (exprimée en valeur relative de consommation d'ensilage contenant entre 32 et 34 % de MS). Même si dans cette compilation l'ensilage de maïs n'avait subi aucun conditionnement à la récolte, il n'en demeure pas moins que cela montre l'impact majeur de la teneur en MS lors de la récolte. Malheureusement, beaucoup d'ensilage de maïs est récolté à chaque année au Québec à une teneur en MS plus élevée que la plage optimum.

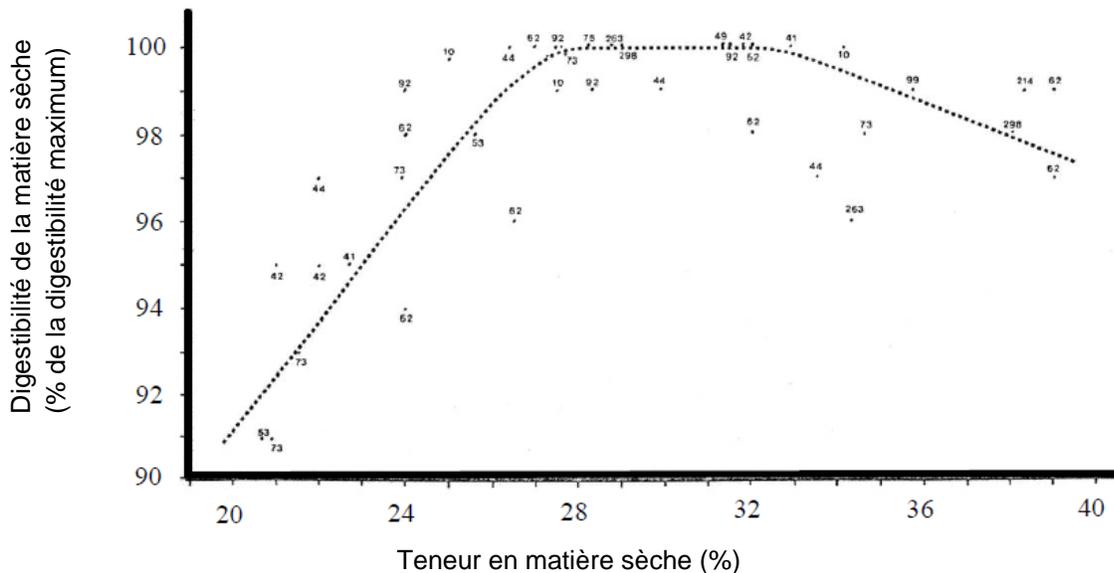


Figure 3. Digestibilité de l'ensilage de maïs en fonction de la teneur en matière sèche exprimée en valeur relative de la valeur maximale observée entre 32 et 34 % de matière sèche. Adaptée de St-Pierre, (2009).

Tableau 1. Effet de la teneur en matière sèche de l'ensilage de maïs sur la consommation de matière sèche, les digestibilités apparentes totales et les performances.

Paramètre*	Matière sèche, %					SEM
	≤ 28	28,1-32,0	32,1-36,0	36,1-40,0	>40,0	
CVMS, kg/j	24,2	23,6	24,1	23,8	24,1	0,5
NDFd, %	42,4	42,5	44,6	44,4	48,9	2,5
Amidon d, %	93,2 ^{abc}	94,0 ^{ab}	92,1 ^{bc}	93,4 ^a	91,3 ^c	1,3
Lait, kg/j	36,1 ^{ab}	37,3 ^a	36,4 ^a	36,2 ^a	34,5 ^b	0,7
Lait à 4%, kg/j	33,5 ^{abc}	34,7 ^a	33,5 ^{ab}	33,0 ^b	31,0 ^c	0,9
Gras, %	3,58	3,59	3,51	3,45	3,42	0,09
Protéine, %	3,05	3,07	3,11	3,10	3,10	0,03

^{abc} Les valeurs sur la même ligne avec des lettres différentes sont significativement différentes ($P < 0,05$).

* CVMS: Consommation volontaire de matière sèche; NDFd: Fibre NDF digestible; Amidon d: Amidon total digestible; Lait à 4%: Lait corrigé à 4% de matières grasses. Adapté de Ferraretto et Shaver (2012b).

Comment mieux déterminer le temps de la récolte? La ligne de lait ou ligne d'amidon est souvent utilisée comme indicateur de maturité. C'est la démarcation entre les parties pâteuse et laiteuse et elle progresse à partir du haut vers le bas du grain. Même s'il est souvent recommandé de récolter entre 1/3 (plus près du haut) et 2/3 (plus près du bas du grain), la ligne de lait n'est pas d'une fiabilité absolue. La MS étant un bon indicateur de la maturité (Jensen et al., 2005), c'est en se référant à celle-ci qu'il sera possible de récolter au bon stade de maturité dans la majorité des cas. Il est possible de mesurer la MS à la ferme assez rapidement. Il suffit de prélever des plants qui sont représentatifs du champ (en évitant ceux en périphérie) et en les hachant avec la fourragère ou un hachoir stationnaire, puis en déterminer soigneusement la teneur en MS avec les méthodes appropriées. Que ce soit à l'aide d'un séchoir Koster ou d'autres types, il faut s'assurer de bien sécher, sinon la valeur obtenue pourrait laisser croire que l'ensilage est prêt à être récolté alors qu'il ne l'est pas encore. Il est recommandé de considérer 2 % d'eau résiduelle. Par exemple, un résultat de 32 % de MS devrait être corrigé à 30 % de MS. Le fabricant John Deere a mis récemment au point le HarvestLab^{mc}, un appareil qui utilise le proche infrarouge qui peut être utilisé pour déterminer la MS de l'ensilage. Il peut être utilisé en mode stationnaire ou être installé sur la chute de la fourragère avec un adaptateur spécial. Dans ce cas, il est possible d'obtenir une évaluation en continu et d'être en mesure de réagir en temps réel selon les lectures. Cet appareil est actuellement aussi en mesure d'évaluer les teneurs en protéine brute, les fibres ADF et NDF ainsi qu'en amidon de l'ensilage de maïs. Lorsque la ligne de lait atteint ¼ du grain, il est temps de commencer à mesurer la MS et de répéter périodiquement jusqu'à ce que la plage optimum soit atteinte.

Le conditionnement à la récolte

Le conditionnement consiste à faire subir un traitement mécanique au plant de maïs par l'équipement de récolte, la fourragère. L'objectif premier du conditionnement est d'améliorer la digestibilité de l'ensilage obtenu.

La longueur de coupe théorique (LCT)

La LCT réfère à la taille des morceaux de tiges et de feuilles du plant de maïs qui auront été sectionnées par l'action d'un rouleau muni de couteaux bien aiguisés passant près d'une barre de coupe. L'action des couteaux est aussi efficace sur les épis et contribue à augmenter la proportion de grains brisés.

En plus de favoriser l'accès aux micro-organismes du rumen et ainsi contribuer à améliorer la digestibilité de l'ensilage de maïs, les avantages d'une taille adéquate des particules sont multiples. Une LCT optimale permet une meilleure compaction et favorise ainsi de bonnes conditions de fermentation de l'ensilage. De plus, un bon contrôle de la taille des particules réduit le risque de triage par la vache et

optimise l'efficacité de la fibre pour favoriser la rumination. En effet, la vache pourra écarter plus facilement des morceaux trop longs pour ne pas les consommer. Au contraire, les morceaux plus petits seront ingérés, mais auront un effet stimulant moins important sur la rumination.

La LCT recherché est généralement d'environ 3/8 de pouce (9,5 mm). Lorsque la fourragère est équipée de rouleaux craqueurs, il est recommandé d'allonger la LCT à environ 3/4 de pouce (19 mm). Avec l'utilisation de rouleaux craqueurs, le fait d'allonger la LCT de 3/8 à 3/4 de pouce a permis de retrouver chez les vaches un matelas ruminal normal tel que celui obtenu lorsque l'ensilage de maïs avait une LCT de 3/8 sans rouleaux craqueurs (Bal et al., 2000b).

Lorsque la récolte est effectuée à un taux de MS plus élevé (plants plus matures) que l'optimum, il est suggéré de réduire la LCT pour permettre un meilleur tassement au silo. Ce qui veut dire de 3/8 vers 1/4 de pouce (sans rouleaux craqueurs) et de 3/4 vers 1/2 pouce environ avec rouleaux craqueurs. Il est recommandé de se référer aux manufacturiers pour apporter les modifications requises aux fourragères afin d'atteindre la LCT désirée et selon la taille des particules obtenue.

Rouleaux craqueurs

Comme leur nom l'indique, l'ajout de ces rouleaux a pour objectif de briser les grains de l'ensilage de maïs. Situés après les couteaux, les plants de maïs déjà hachés passent entre ces deux rouleaux qui n'ont pas la même vitesse de rotation afin de briser les constituants de l'épi (Figure 4). Tous les grains devraient être atteints et 100 % de la rafle devrait être réduite en petits morceaux.

Les dommages aux grains augmentent la surface de contact et favorisent la digestion de l'amidon. Sans avoir d'impact sur la digestibilité de la fibre NDF, (Ferraretto et Shaver, 2012b) ont rapporté une meilleure (94,8 vs 92,0 %) digestibilité totale de l'amidon *in vitro* lorsque l'ensilage de maïs était récolté avec des rouleaux craqueurs (espacement de 1 à 3 mm) vs sans rouleaux. L'ensilage de maïs récolté avec des rouleaux craqueurs espacés de 1 à 3 mm n'a pas eu d'effet sur la production de lait mais a eu un impact négatif sur le taux de matières grasses (-0,1 unité de pourcentage). Un espacement plus grand (4 à 8 mm) a eu tendance à réduire (-1,8 kg/j) la production de lait, dont la teneur en matières grasses se situait entre celles obtenues avec un espacement de 1 à 3 mm et sans rouleaux. Cette étude met en évidence l'importance d'une MS optimale à la récolte, car l'utilisation des rouleaux craqueurs n'a pas permis d'améliorer la digestibilité de l'amidon lorsque celle-ci était au-delà de 40 %. Également, aucun effet sur la digestibilité de l'amidon n'a été mesuré lorsque la LCT était très petite (<6,4 mm ou 1/4 de pouce) et très longue (>32 mm ou 1 1/4 pouce).

Le conditionnement provoqué par les rouleaux craqueurs se situe surtout sur les grains et l'impact sur la digestibilité de l'amidon et la production de lait est souvent positive (Bal et al., 2000b; Ferraretto et Shaver, 2012b), mais demeure variable (Johnson et al., 2003). L'espacement entre les rouleaux qui est généralement recommandé est de 1 à 3 mm, mais pourrait varier selon la forme et l'usure de la surface des rouleaux.



Figure 4. Rouleaux craqueurs conventionnels (A) et rouleaux de la technologie Shredlage^{mc} (B).
Sources A : Dion-AG Inc., B : Shredlage LLC.

Un nouveau conditionnement, le « Shredlage^{mc} »

Le terme Shredlage est une marque de commerce enregistrée au États-Unis pour désigner non seulement la technologie, mais aussi l'ensilage produit grâce à celle-ci. La technologie Shredlage^{mc} désigne en fait le système de rouleaux Loren Cut^{mc} distribué par la compagnie Shredlage LLC.

La particularité de ces rouleaux est qu'en plus des rainures présentes sur leur largeur, comme la technologie conventionnelle, on y retrouve également des rainures longitudinales (Figure 4). Ainsi, il est possible d'obtenir des bris sur la largeur et la longueur des particules d'ensilage. L'objectif des concepteurs était d'obtenir un bon conditionnement des grains et aussi de la fibre lorsque l'ensilage est haché plus long dans l'espoir d'améliorer l'efficacité de la fibre du maïs et de pouvoir retirer des sources de fibres coûteuses de la ration. Les premiers prototypes ont fait leur apparition en 2008 et étaient conçus pour des fourragères automotrices de marque Claas. Par la suite, des modifications ont été apportées afin d'en améliorer l'efficacité et aussi de l'adapter aux nouveaux modèles de fourragères de la compagnie Claas. Selon les informations disponibles actuellement, les rouleaux de la technologie Shredlage^{mc} sont aussi maintenant adaptés pour les équipements de marques John Deere (série 7000 et plus), Krone (Big X) et New Holland (série FR). Cependant, le directeur technique de Shredlage LLC mentionnait lors du 2014 Symposium (de Midwest Forage Association Wisconsin Custom Operators et Professional Nutrient Applicators Association of Wisconsin) que même après avoir modifié ces équipements pour recevoir les rouleaux Loren Cut^{mc}, il est possible que la production d'ensilage de type Shredlage^{mc} entraîne des dommages à l'unité de conditionnement. Seulement les fourragères automotrices peuvent recevoir ce type de rouleaux à cause de leur poids et dimensions.

Puisque cette technologie est très récente, il existe peu de données scientifiques sur l'impact du Shredlage^{mc} sur la digestibilité des nutriments et la performance des vaches. Toutefois, une équipe de recherche de l'Université du Wisconsin s'est intéressée à cette nouvelle technologie et a publié récemment des résultats (Ferraretto et Shaver, 2012a). Ce groupe de recherche a comparé l'ensilage de maïs récolté avec des rouleaux craqueurs conventionnels au Shredlage^{mc} sur l'aspect des ensilages, leur conservation, leur digestibilité et les performances des vaches qui les reçoivent. Il est important de noter ici qu'aucune mention n'est faite sur l'usure des rouleaux craqueurs conventionnels alors que ceux de la Technologie Shredlage^{mc} était très récents. Le même hybride de maïs (type traditionnel) a été récolté à la même maturité dans le même champ pour les deux types de conditionnement. La LCT du Shredlage^{mc} était de 30 mm comparativement à 19 mm avec les rouleaux craqueurs conventionnel, alors que l'espacement entre les rouleaux était de 2,5 mm et 3 mm respectivement. Ensuite, les deux ensilages ont été entreposés (sans inoculant) dans des silos tubes, pour une durée de six semaines avant de les servir aux vaches. La composition chimique ainsi que le profil de fermentation des deux ensilages étaient similaires. Malgré une LCT plus élevée et une répartition différente des particules, la compaction du

Shredlage^{mc} fut similaire à l'autre ensilage avec une densité d'environ 17 livres/pieds cube. En effet, la proportion de particules longues (>19 mm) était plus élevée pour le Shredlage^{mc} (31,5 % vs 5,6 %) tout en ayant aussi une plus grande proportion de grains plus petits que 4,75 mm (75,0 % vs 60,3 %). Ces résultats suggèrent un apport plus grand en fibre efficace et un meilleur conditionnement des grains.

Ces deux ensilages ont ensuite été incorporés dans des rations totales mélangées (RTM) de façon à représenter 50 % de la MS des régimes qui étaient identiques par ailleurs. La RTM avec le Shredlage^{mc} avait plus de particules longues (>19 mm) qu'avec les rouleaux craqueurs conventionnels (15,9 vs 3,5 %), sans affecter significativement le triage. Les vaches ont eu tendance à consommer plus d'aliments (+0,7 kg MS/j) et à produire plus de lait (+1 kg/j lait corrigé à 3,5 % de matières grasses) avec le Shredlage^{mc}, sans toutefois affecter les composants du lait et l'efficacité alimentaire. Cependant, la durée de la période durant laquelle les vaches ont consommé la ration a influencé la réponse aux traitements puisque l'écart de production devient de plus en plus marqué de la semaine 2 jusqu'à la fin de l'essai (Figure 5).

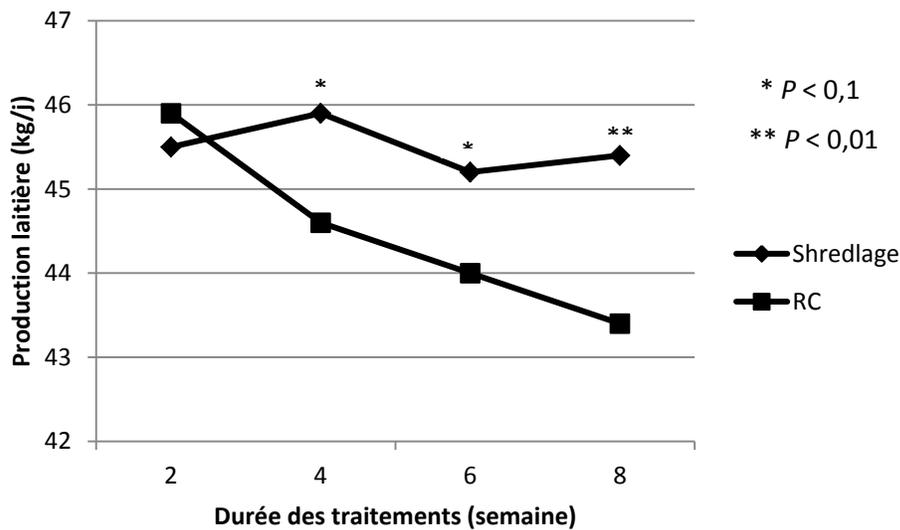


Figure 5. Production de lait corrigé à 3,5 % de matières grasses de vaches alimentées pendant 8 semaines avec une ration à base de Shredlage^{mc} ou d'ensilage de maïs conditionné avec des rouleaux conventionnels (RC). Adaptée de Ferraretto et Shaver (2012a).

La consommation plus élevée de la RTM avec Shredlage^{mc} pourrait laisser sous-entendre une meilleure digestibilité de la fibre NDF. Effectivement la digestibilité totale de la fibre NDF de la RTM avec le Shredlage^{mc} a été plus élevée (+4 unités de pourcentage), mais pas la digestibilité *in vitro* du Shredlage^{mc} seul. Toutefois, la digestibilité totale de l'amidon de la ration fut plus élevée de 1,5 unité de pourcentage lorsqu'elle contenait du Shredlage^{mc} comparé à l'autre mode de conditionnement. Ce résultat est en accord avec une mesure d'un amidon plus digestible du Shredlage^{mc} par rapport à l'autre ensilage lors d'incubations *in situ* durant 12 et 24 heures (+17 et +7 % respectivement) et peut s'expliquer par les différences observées de la proportion de particules fines entre les deux ensilages.

Dans un autre essai récent, Vanderwerff et al. (2014) ont comparé des rations à base d'ensilage de maïs bmr ayant subi un conditionnement avec des rouleaux craqueurs conventionnels ou avec la technologie Shredlage^{mc}. Dans un troisième traitement, du foin de luzerne a été ajouté à la ration à base d'ensilage conventionnel afin d'évaluer l'effet d'un apport en fibre efficace. La récolte a été effectuée avec le même espacement entre les rouleaux (2 mm). La LCT était de 19 mm pour le traitement conventionnel et de 26 mm pour le Shredlage^{mc}. Cette LCT plus longue du Shredlage^{mc} n'a pas amélioré l'efficacité de la fibre puisque le temps de rumination a été similaire, et que la teneur en matières grasses du lait a été plus

faible comparativement au traitement avec foin. Il est important de noter que la production laitière a été inférieure pour les vaches ayant reçu le foin comparativement avec le Shredlage^{mc}. Au contraire, le temps de rumination, la production de lait et sa teneur en matières grasses ont été similaires pour le traitement conventionnel sans foin et le Shredlage^{mc}.

Il est encore trop tôt pour généraliser ces conclusions basées seulement sur quelques essais. L'interprétation de ces résultats doit tenir compte du contexte de l'expérience. Le Shredlage^{mc} démontre toutefois un potentiel intéressant et mérite d'être étudié. D'autres études sont nécessaires afin de mieux déterminer l'impact de ce nouveau type de conditionnement, en particulier sur la fibre NDF (digestibilité et degré d'efficacité au rumen), sur la production de lait et aussi sur le plan technique et de l'efficacité du chantier de récolte. Hutjens (2014) de l'Université de l'Illinois mentionne que cette technologie pourrait être plus énergivore (+7,5 litres/heure de diesel) de sorte à augmenter le coût d'opération. Les premiers utilisateurs aux États-Unis ont fait mention de problèmes de vibration qui pourrait occasionner l'usure prématurée de certaines pièces de la fourragère. Toujours selon Hutjens (cité par Holin, 2013), des rouleaux craqueurs conventionnels bien ajustés peuvent aussi effectuer un bon travail sur le grain. Selon lui, il est important d'obtenir 70 % de la masse de l'ensilage de maïs dans les deux premiers plateaux du PSPS et aucun grain retenu dans ces derniers. Dans l'étude de Ferraretto et Shaver (2012a), la distribution de l'ensilage de maïs sur les plateaux (19, 8, 1,18 mm et fond) était 31,5; 41,5; 26,2; 0,8 % vs 5,6; 75,6; 18,4; 0,4 % pour les ensilages de maïs Shredlage^{mc} et rouleaux craqueurs conventionnels respectivement. Au total, 73,0 et 81,2 % de ces ensilages ont été retenus sur les deux premiers plateaux, mais plus d'ensilage a été retenue sur le premier plateau pour le Shredlage^{mc}. Il est cependant important que la taille des particules sur le premier plateau ne soit pas plus grande que 2 pouces ou 51 mm.

Rouleaux KernelStar (John Deere)

Le fabricant John Deere propose une nouvelle unité de conditionnement pour l'ensilage de maïs pour leur fourragère automotrice. La technologie KernelStar est d'origine Européenne et comprends deux rouleaux gaufrés de formes concave et convexe, dont la vitesse relative de rotation est différente (environ 50 %) pour un bon conditionnement (Figure 6). Selon le fabricant, cet arrangement augmente la surface de contact de 270 % comparativement à des rouleaux conventionnels. Il est suggéré de commencer par régler l'espacement entre les rouleaux et ensuite la LCT qui varie généralement entre ¾ et 1 pouce (19 et 25,4 mm) selon le résultat obtenu versus désiré. Avec un ajustement optimum, le KernelStar améliorerait le rendement de récolte à l'heure tout en étant moins énergivore que les rouleaux craqueurs conventionnels (selon des essais internes) pour un meilleur conditionnement des grains et une tige plus brisée. Comme cette technologie est très récente, il n'y a pas encore de données de recherche disponibles sur la digestibilité et sur la production laitière. Des essais sont en cours actuellement et plus d'information est à venir.



Figure 6. Rouleaux de la technologie KernelStar. Source : John Deere.

La durée d'entreposage (ensilages)

Dégradation de la prolamine

La fermentation de l'ensilage implique nécessairement une activité microbienne et l'utilisation de certains nutriments. En retour, des acides organiques seront produits en grandes quantités et ce sont eux qui permettront d'atteindre le pH de stabilité pour pouvoir conserver les fourrages sous forme d'ensilages. Ce processus amène donc forcément des changements de la composition et de la valeur nutritive. Newbold et al. (2006) ont observé que la dégradabilité (*in situ*) de la protéine brute et de l'amidon de l'ensilage de maïs augmente en même temps que la durée de l'entreposage entre 2 et 10 mois après la récolte. Plus récemment, des essais *in vitro* ont aussi confirmé que l'amidon devient plus digestible à mesure que le temps d'entreposage augmente (Hallada et al., 2008; Der Bedrosian et al., 2012). De plus, la concentration en protéine soluble et en azote ammoniacal augmente en même temps que l'amidon devient plus digestible, indiquant ainsi une activité protéolytique (Figure 7, Der Bedrosian et al., 2012). La dégradation d'une partie de la matrice de protéine qui lie les granules d'amidon (la prolamine) durant l'entreposage a déjà été observée dans un essai avec du maïs humide (Hoffman et al., 2011) où la concentration en azote ammoniacal et la digestibilité *in vitro* de l'amidon ont augmenté simultanément. Selon le cas, la dégradation de la prolamine pourrait aller jusqu'à 60 %. D'autre part, la digestibilité de la fibre NDF est relativement constante au long de l'entreposage.

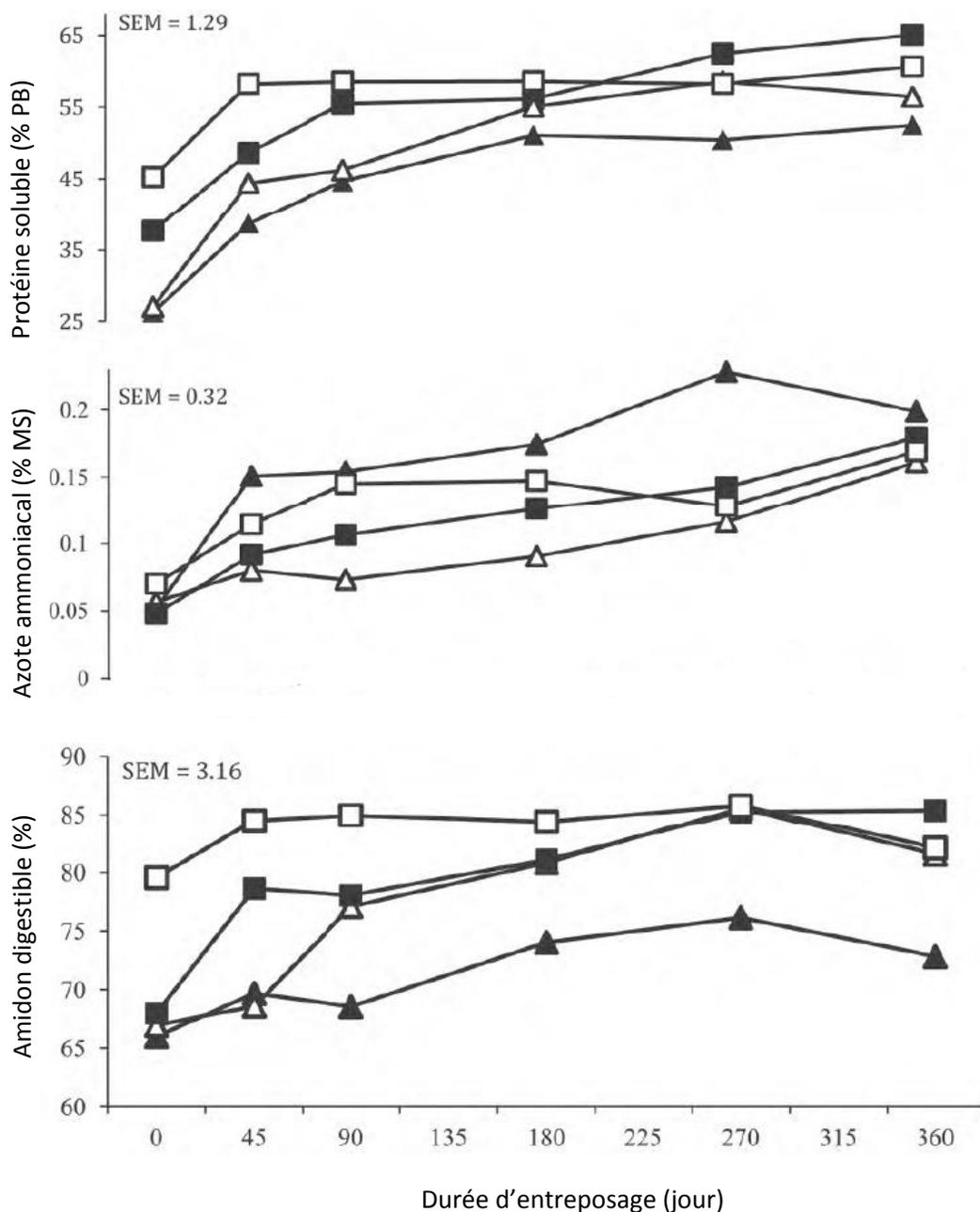


Figure 7. Teneur en protéine soluble (% de la protéine brute) et en azote ammoniacal (% MS) et digestibilité de l'amidon (% *in vitro*, 7 heures) dans l'ensilage de maïs en fonction du temps d'entreposage dans des mini-silos. □ : 32 % MS, hybride conventionnel; Δ : 32 % MS, hybride bmr; ■ : 41 % MS, hybride conventionnel; ▲ : 41 % MS, hybride bmr. Adaptée de Der Bedrosian et al. (2012).

Évaluation de la digestibilité de l'amidon

Ces changements physico-chimiques des grains de l'ensilage de maïs n'auraient donc pas seulement lieu durant la phase intense de fermentation, mais aussi durant une bonne partie de la période de conservation. Il est maintenant possible d'évaluer l'intensité de ces changements par le biais d'analyse par réflectance à l'infrarouge. Certains laboratoires sont en mesure d'évaluer la digestibilité de l'amidon

ainsi que la teneur en azote ammoniacal et en protéine soluble de l'ensilage de maïs sur une base régulière. La méthode d'analyse par infrarouge a l'avantage d'être peu coûteuse, rapide et d'une bonne fiabilité. Il est aussi possible d'estimer la digestibilité de la NDF par infrarouge depuis quelques années. À l'aide de ces informations et d'un suivi régulier des indicateurs de performance et de santé du troupeau habituels, il est possible d'apporter des ajustements judicieux à la ration dans le temps lorsque nécessaire. Toutefois il n'existe pas encore vraiment de valeurs cibles en amidon et fibre NDF digestibles dans les rations.

L'entreposage de l'ensilage de maïs améliore ainsi l'accessibilité des micro-organismes du rumen et des enzymes digestifs aux granules d'amidon au fil du temps. Auparavant, la principale raison qui motivait la recommandation de ne pas servir de l'ensilage de maïs frais aux vaches était basée sur le manque de stabilité aérobie, le chauffage et probablement une moins bonne appétence de l'ensilage. Maintenant, ces résultats indiquent que les ensilages frais, dont l'amidon est moins digestible, ont par conséquent une valeur énergétique moins élevée que lorsqu'ils sont fermentés et entreposés depuis un certain temps. La baisse de production souvent rapportée à la ferme suivant le changement d'ensilage de maïs à la récolte n'est probablement pas seulement causée par la baisse de consommation occasionnée par l'alimentation d'un aliment non-fermenté, mais aussi par la source d'amidon moins digestible. À partir de ces données et d'un point de vue nutritionnel, il est donc avantageux de pouvoir disposer de structures d'entreposages nécessaires, selon la taille du troupeau, pour commencer à inclure l'ensilage de maïs dans la ration après un minimum de deux à trois mois de conservation. À défaut de ne pas être en mesure d'attendre ce délai avant de le servir aux vaches, il faudrait tenir compte d'une plus faible digestibilité de l'amidon dans le calcul de la ration.

IMPACT DE L'ENSILAGE DE MAÏS SUR LES PERFORMANCES

Les effets de l'incorporation de l'ensilage de maïs dans la ration sur les performances sont variables (Tableau 2). En comparant des rations dont le seul fourrage était l'ensilage de maïs, comparativement à l'ensilage ou le foin de luzerne, Broderick (1985) a obtenu la meilleure production de lait avec l'ensilage de maïs. Toutefois, dans un autre essai du même type, où le fourrage représentait aussi 60 % de la matière sèche de la ration, il a obtenu la même production de lait avec l'ensilage de luzerne de bonne qualité qu'avec l'ensilage de maïs, mais avec un taux de matières grasses plus élevé. Par contre, il est très rare que l'ensilage de maïs soit utilisé comme la seule source de fourrage. Brito et Broderick (2006) concluent en faisant varier le ratio ensilage de luzerne:ensilage de maïs de la ration, que l'ensilage de maïs est complémentaire à l'ensilage de luzerne. Un ratio de 24:27 a été celui qui a offert la meilleure combinaison pour une utilisation efficace de l'azote (protéine) et la production de lait. Le taux de protéine du lait a été amélioré avec l'augmentation de la proportion d'ensilage de maïs dans la ration, alors que le taux de matière grasse a diminué. Il faut toutefois prendre en considération que le niveau de fibre NDF était plus bas que recommandé. Ces résultats sont intéressants puisque dans le contexte du Québec où la production de luzerne est très répandue, l'utilisation de l'ensilage de maïs en combinaison avec cette plante fourragère semblent favoriser l'utilisation des nutriments par la flore ruminale et les performances, lorsqu'il y a suffisamment de fibre efficace dans la ration. En 2004, Onetti et al. ont observé que la baisse du taux de matières grasses était plus prononcée pour les rations à haute teneur en ensilage de maïs suivant l'ajout de suif. Ruppert et al. (2003) rapportent qu'un supplément de suif pourrait mener à une réduction de la teneur en matières grasses du lait de façon plus prononcée avec une ration à base d'ensilage de maïs qu'avec une ration à base d'ensilage de luzerne. Toutefois, il faut noter que dans cette expérience, la teneur en fibre NDF était plus faible et la teneur en amidon plus élevée dans les rations à base d'ensilage de maïs (3,7 et 4,4 unités de pourcentage respectivement). Staples et Cullens (2005) ont aussi tenté d'établir un lien entre l'ensilage de maïs et la dépression du taux de matières grasses du lait à la suite d'une compilation de six études publiées de 1993 à 2004. Leurs résultats montrent que les effets de l'ensilage de maïs sur la teneur en matières grasses du lait ne sont pas constants, et peuvent être affectés par plusieurs variables. Cependant, dans plusieurs de ces essais, les chercheurs n'ont pas corrigé entièrement les niveaux de glucides non-fibreux ou de potassium lors de l'ajout d'ensilage de maïs dans la ration en remplacement d'autres fourrages, ce qui peut constituer un biais important.

Tableau 2. Résultats d'essais sur l'effet de l'incorporation d'ensilage de maïs dans la ration sur les performances laitières.

Essai*	Traitement	Production laitière		Matières grasses	
		kg/j	kg corrigé/j	%	kg/j
#1	0 % EM : 60 % EL	26,3 ^a	25,1 ^a	3,72 ^a	0,97 ^a
	60 % EM : 0 % EL	26,1 ^a	24,1 ^a	3,50 ^b	0,91 ^b
	79 % EM : 0 % EL	23,9 ^b	22,9 ^b	3,74 ^a	0,89 ^b
#2	0 % EM : 63 % EL	29,8 ^a	28,3 ^a	3,68	1,09 ^{ab}
	0 % EM : 60 % FL	29,4 ^{ab}	28,0 ^{ab}	3,70	1,08 ^{ab}
	60 % EM : 0 % EL	30,3 ^a	29,2 ^a	3,86	1,14 ^a
	76 % EM : 0 % EL	28,0 ^b	26,9 ^b	3,84	1,05 ^b
#3	0 % EM : 51 % EL	41,5 ^a	43,3 ^a	3,81 ^a	1,56 ^a
	13 % EM : 37 % EL	42,0 ^a	42,7 ^{ab}	3,58 ^{ab}	1,51 ^{ab}
	27 % EM : 24 % EL	41,5 ^a	40,5 ^{bc}	3,38 ^{bc}	1,40 ^{bc}
	40 % EM : 10 % EL	39,5 ^b	38,7 ^c	3,34 ^c	1,33 ^c
#4	1) 50 % EM : 0% EL	44,9	-	3,12	1,38
	2) 50 % EM : 0 % EL + 2 % Suif	44,3	-	2,68	1,17
	3) 25 % EM : 25 % FLC + 2 % Suif	44,8	-	3,17	1,39
	4) 25 % EM : 25 % FLL + 2 % Suif	44,3	-	2,96	1,31
	5) 25 % EM : 25 % EL + 2 % Suif	43,6	-	3,32	1,45
	<i>1 vs 2</i>	<i>n.s.</i>	-	<i><0,01</i>	<i><0,01</i>
	<i>2 vs 3 + 4 + 5</i>	<i>n.s.</i>	-	<i><0,01</i>	<i><0,01</i>
<i>3 vs 4</i>	<i>n.s.</i>	-	<i>0,03</i>	<i>0,10</i>	
<i>3 vs 5</i>	<i>n.s.</i>	-	<i>0,10</i>	<i>n.s.</i>	
#5	40 % EM : 10 % EL	32,3	30,6	3,18	1,03
	40 % EM : 10 % EL + 2 % Suif	33,2	30,0	2,89	0,97
	40 % EM : 10 % EL + 4 % Suif	33,4	29,1	2,70	0,91
	10 % EM : 40 % EL	33,3	32,7	3,39	1,12
	10 % EM : 40 % EL + 2 % Suif	33,2	32,8	3,44	1,14
	10 % EM : 40 % EL + 4 % Suif	34,2	33,7	3,41	1,17
	<i>Proportion des fourrages</i>	<i>0,31</i>	<i><0,01</i>	<i><0,01</i>	<i><0,01</i>
	<i>Suif</i>	<i>0,18</i>	<i>0,81</i>	<i>0,06</i>	<i>0,38</i>
<i>Fourrages x Suif</i>	<i>0,76</i>	<i>0,40</i>	<i>0,12</i>	<i>0,21</i>	
#6	23 % EME	42,8	38,3	3,41	1,43
	12,4 % EMSE + 10,6 % MGH (EMR)	39,3	37,3	3,57	1,42
	23 % EMSE	38,9	36,4	3,52	1,38
	23 % EF	40,7	37,3	3,50	1,41
	<i>EME vs EMR</i>	<i><0,01</i>	<i>0,20</i>	<i>0,18</i>	<i>0,84</i>
	<i>EME vs EMSE</i>	<i><0,01</i>	<i>0,03</i>	<i>0,36</i>	<i>0,24</i>
	<i>EMSE vs EF</i>	<i>0,07</i>	<i>0,30</i>	<i>0,82</i>	<i>0,45</i>

*Essai #1 = Broderick (1985) (expérience 1); Essai #2 = Broderick (1985) (expérience 2); EM = ensilage de maïs, EL = ensilage de luzerne, FL = foin de luzerne; ^{a,b} = $P < 0,05$.

Essai #3 = Brito et Broderick (2006); EM = ensilage de maïs, EL = ensilage de luzerne; ^{a,b,c} = $P \leq 0,05$.

Essai #4 = Onetti et al. (2004); EM = ensilage de maïs, EL = ensilage de luzerne, FLC = foin de luzerne court (haché), FLL = foin de luzerne long (non haché), Contrastes et valeurs de P en italique.

Essai #5 = Ruppert et al. (2003); EM = ensilage de maïs, EL = ensilage de luzerne; Contrastes et valeurs de P en italique.

Essai #6 = Boivin et al. (2013); EME = ensilage de maïs entier, EMSE = ensilage de maïs sans épi, MGH = maïs grain humide, EMR = ensilage de maïs reconstitué, EF = ensilage de fléole; Contrastes et valeurs de P en italique.

Selon Lechartier et Peyraud (2010), la fermentescibilité ruminale des concentrés et leur contenu en amidon devraient être pris en considération lors du calcul de ration pour pouvoir prévenir l'acidose ruminale subaigüe. Cette recommandation est particulièrement importante si la ration contient une grande proportion d'ensilage de maïs. De plus, sachant que l'amidon devient plus digestible au cours de la période de conservation de l'ensilage, la quantité d'amidon qui sera fermentée par les micro-organismes du rumen sera plus élevée. Par conséquent, ceci devrait entraîner une production supérieure d'acides gras volatiles qui devront être tamponnés et pris en charge par le rumen lui-même et l'organisme. Ceci pourrait en partie expliquer qu'occasionnellement au printemps (après plusieurs mois d'entreposage de l'ensilage) certains troupeaux voient leur taux de matières grasses du lait fléchir légèrement. Un autre exemple de ce phénomène est illustré dans l'expérience de Boivin et al. (2013) qui ont montré qu'une ration avec de l'ensilage de maïs sans épis supplémentée avec du maïs grain humide diminuait la teneur en acides gras volatils dans le rumen et la production laitière comparativement à un ensilage de maïs entier. Ces différences pourraient s'expliquer par le fait que le maïs grain humide était plus sec, et donc moins digestible que les grains de maïs de l'ensilage entier.

Pour illustrer l'importance des changements provoqués par le processus de fermentation des grains de maïs durant l'entreposage, nous avons effectué des calculs théoriques en se basant sur des teneurs généralement observées d'amidon digestible en 7 heures (amidon-d7). Le Tableau 3 montre les résultats pour des rations contenant différentes proportions de maïs grain humide et d'ensilage de maïs avec des valeurs d'amidon-d7 observés sur le matériel frais (70 %) ou fermenté (85 %). Dans cet exemple théorique, seulement la digestibilité de l'amidon différencie les aliments frais de ceux qui ont été fermentés. Nous avons considéré que le maïs grain humide (MGH) qui complète l'apport en amidon, est aussi frais ou fermenté avec les mêmes valeurs d'amidon-d7. Le niveau de fibre NDF a été maintenu constant à 32 % dans les quatre rations, ce qui a alloué une concentration en amidon de 25 et 27 % pour les rations avec 15 et 30 kg d'ensilage de maïs, respectivement. Notre exemple montre que l'évolution de la digestibilité de l'amidon durant l'entreposage peut faire augmenter d'environ 1 kg la quantité d'amidon qui sera digéré dans le rumen.

Cependant, il n'existe pas de valeur de référence pour la teneur en amidon d'une ration selon son degré de disponibilité dans le rumen, un domaine de recherche encore à explorer. La dynamique de la fermentation ruminale est complexe et est influencée par une foule de facteurs nutritionnels, environnementaux et physiologiques. Les apports en sucres, fibres solubles, fibres digestibles et fibres efficaces, ainsi que la répartition de la taille des particules de la ration, la consommation de MS, le niveau de production et la température ambiante en sont quelques-uns. Il est important de noter que même si la plus grande partie de l'amidon est digérée au rumen, l'amidon y ayant échappé pourra être digéré dans le petit intestin par la sécrétion d'amylase et les fractions restantes seront finalement fermentées dans le gros intestin. L'ensemble du système digestif est relativement efficace pour digérer l'amidon, mais seule la partie qui est fermentée au rumen pourra contribuer à la production de protéines microbiennes métabolisables. Par contre, cette fraction de l'amidon a le potentiel d'affecter les conditions ruminales.

Tableau 3. Charge quotidienne théorique totale en amidon-d7 pour une vache recevant une ration à base d'ensilage de maïs (EM) et de maïs grain humide (MGH) frais comparé aux mêmes aliments fermentés.

Paramètre	15 kg d'ensilage de maïs 8,7 kg de maïs grain humide		30 kg d'ensilage de maïs 7,2 kg de maïs grain humide	
	Frais	Fermentés	Frais	Fermentés
Amidon EM, kg	1,5	1,5	3,0	3,0
Amidon MGH, kg	4,3	4,3	3,5	3,5
Amidon-d7 EM, kg	1,1	1,3	2,1	2,6
Amidon-d7 MGH, kg	3,0	3,7	2,5	3,0
Amidon total, kg	5,8	5,8	6,5	6,5
Charge totale d'amidon-d7, kg	4,1	5,0	4,6	5,6
Charge additionnelle, kg		+0,9		+1,0

L'ensilage de maïs est aussi une source de gras (environ 3,2 %) dont les acides gras sont majoritairement insaturés, comme les autres fourrages. Il contribue donc à augmenter l'apport en acides gras au rumen, surtout dans les rations à forte teneur en ensilage de maïs. Jenkins et al. (2009) rapporte que la charge en acides gras insaturés dans le rumen peut nuire au cours normal de la fermentation. Auparavant, (Bauman et Griinari, 2001) proposent que, sous des conditions ruminales altérées par certaines rations qui apportent aussi des acides gras insaturés, des isomères spécifiques issus de la biohydrogénation (processus de saturation des acides gras au rumen) seraient alors produits et inhiberaient directement la synthèse des matières grasses dans la glande mammaire. Cependant, la contribution en acides gras insaturés n'apparaît pas plus importante par l'ensilage de maïs que bien d'autres fourrages. Par contre, la répartition différente de la taille des particules de l'ensilage de maïs pourrait avoir plus d'impact sur l'environnement ruminal, Aussi, la faible teneur en potassium diminuera la différence alimentaire cations-anions des rations à base d'ensilage de maïs, comparativement à la luzerne, et pourrait influencer le processus de biohydrogénation. Or, il a été démontré par Jenkins et al. (2014), que le niveau de potassium de la ration a un effet sur la biohydrogénation des acides gras polyinsaturés dans le rumen. C'est une des raisons pour lesquelles la recherche n'a pas encore été en mesure d'établir un niveau maximal d'apport en acides gras insaturés au rumen, il faudra encore d'autres travaux dans ce domaine.

AVANTAGES ET RISQUES LIÉS À L'ENSILAGE DE MAÏS

Puisque l'apport en énergie alimentaire est le facteur limitant en début de lactation, l'ensilage de maïs est un fourrage très intéressant de par sa composition particulière qui lui confère une valeur énergétique élevée. Cependant, même s'il y a plusieurs avantages à l'utiliser à la ferme, il y a aussi des risques à prendre en considération.

Avantages

- Présence de grains conférant une haute valeur énergétique et permettant plus facilement d'améliorer le bilan en énergie de la vache et de favoriser sa production de lait.
- Rendement élevé de MS à l'hectare, permettant de réduire la superficie nécessaire à l'alimentation du troupeau.
- Courte fenêtre de récolte permettant habituellement d'éviter les intempéries et d'entreposer rapidement la récolte pour produire un ensilage de qualité.
- Fermentation rapide et faible pH de stabilité.

Risques

- Un hybride dont les besoins en énergie thermique ne correspondent pas à la longueur de la saison de croissance pourrait empêcher la récolte d'ensilage de maïs au bon stade de maturité avec le rendement attendu. De plus, une récolte tardive après un gel peut se traduire par une moins bonne fermentation et une digestibilité plus faible en raison du dépérissement du plant avec le temps.
- Le risque d'un effet négatif sur le taux et la production de matières grasses du lait augmente avec la proportion qu'occupe l'ensilage de maïs dans la ration, la charge en acides gras insaturés au rumen, et un apport insuffisant en fibres efficaces et une différence alimentaire cations-anions plus faible.
- Un ensilage de maïs sur-conditionné combiné avec une ration ne contenant pas suffisamment de fibres efficaces augmentent le risque d'un effet négatif sur le taux de matières grasses du lait.
- Un conditionnement insuffisant de l'ensilage de maïs risque de réduire les performances des vaches qui le reçoivent.

LES 5 POINTS POUR MIEUX TIRER AVANTAGE DE L'ENSILAGE DE MAÏS

- Le choix de l'hybride de maïs devrait privilégier le rendement à l'hectare de nutriments digestibles, tout en s'assurant de pouvoir être en mesure de le récolter au bon stade de maturité selon les conditions à la ferme.
- La maturité à la récolte est le facteur numéro un. La mesure de la MS au champ effectuée régulièrement est la meilleure façon de récolter au bon moment pour optimiser la fermentation en silo, la consommation, la digestibilité et la valeur nutritive de l'ensilage de maïs pour de meilleures performances.
- L'ensilage de maïs ne devrait pas être servi rapidement après la récolte, car il pourrait entraîner une baisse de consommation et de production puisque son amidon est moins digestible, résultant en un apport plus faible en énergie pour la vache. Comme la digestibilité de l'amidon augmente durant la conservation, une période d'attente d'au moins deux à trois mois est recommandée afin d'obtenir un amidon plus digestible et une meilleure stabilité de l'ensilage.
- On ne devrait pas retrouver de grains entiers dans l'ensilage. Le conditionnement permettra de bien briser les grains en autant que l'espacement entre les rouleaux et la LCT soient appropriés. Les nouvelles technologies de rouleaux sont prometteuses afin de contribuer à améliorer la digestibilité de l'amidon (et potentiellement des fibres) l'ensilage de maïs et la performance des vaches.
- Les particularités de l'ensilage de maïs, ainsi que son apport en nutriments et leur digestibilité devraient être pris en considération avec ceux des autres aliments de la ration lors du calcul de celle-ci afin d'optimiser les performances et réduire le risque de baisse du taux de matières grasses du lait.

BIBLIOGRAPHIE

- Akay, V. et J. A. Jackson, Jr. 2001. Effects of NutriDense and waxy Corn hybrids on the rumen fermentation, digestibility and lactational performance of dairy cows. *J. Dairy Sci.* 84(7):1698-1706.
- Ali, M., J. W. Cone, W. H. Hendriks et P. C. Struik. 2014. Starch degradation in rumen fluid as influenced by genotype, climatic conditions and maturity stage of maize, grown under controlled conditions. *Animal Feed Science and Technology* 193:58-70.
- Bal, M. A., R. D. Shaver, H. Al-Jobeile, J. G. Coors et J. G. Lauer. 2000a. Corn silage hybrid effects on intake, digestion, and milk production by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 83(12):2849-2858.
- Bal, M. A., R. D. Shaver, A. G. Jirovec, K. J. Shinnors et J. G. Coors. 2000b. Crop processing and chop length of corn silage: effects on intake, digestion, and milk production by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 83(6):1264-1273.
- Barlow, J. S., J. K. Bernard et N. A. Mullis. 2012. Production response to corn silage produced from normal, brown midrib, or waxy corn hybrids. *J. Dairy Sci.* 95(8):4550-4555.
- Barrière, Y. et O. Argillier. 1993. Brown-midrib genes of maize: a review. *Agronomie* 13(10):865-876.
- Bauman, D. E. et J. M. Griinari. 2001. Regulation and nutritional manipulation of milk fat: low-fat milk syndrome. *Livestock Production Science* 70(1-2):15-29.
- Boivin, M., R. Gervais et P. Y. Chouinard. 2013. Effect of grain and forage fractions of corn silage on milk production and composition in dairy cows. *Animal* 7(2):245-254.
- Boufaïed, H., P.Y. Chouinard, G.F. Tremblay, H.V. Petit, R. Michaud, et G. Bélanger. 2003. Fatty acids in forages. I. Factors affecting concentrations. *Can. J. Anim. Sci.* 83:501-511.
- Brito, A. F. et G. A. Broderick. 2006. Effect of varying dietary ratios of alfalfa silage to corn silage on production and nitrogen utilization in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89(10):3924-3938.
- Broderick, G. A. 1985. Alfalfa silage or hay versus corn silage as the sole forage for lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 68(12):3262-3271.
- Christianson, D. D., U. Khoo, H. C. Nielsen et J. S. Wall. 1974. Influence of opaque-2 and floury-2 genes on formation of proteins in particulates of corn endosperm. *Plant Physiology* 53(6):851-855.
- Clark, P. W. et L. E. Armentano. 1999. Influence of particle size on the effectiveness of the fiber in corn silage. *J. Dairy Sci.* 82(3):581-588.
- Clark, P. W., S. Kelm et M. I. Endres. 2002. Effect of feeding a corn hybrid selected for leafiness as silage or grain to lactating dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 85(3):607-612.
- Correa, C. E. S., R. D. Shaver, M. N. Pereira, J. G. Lauer et K. Kohn. 2002. Relationship between corn vitreousness and ruminal in situ starch degradability. *J. Dairy Sci.* 85(11):3008-3012.
- Cox, W. J. et D. J. R. Cherney. 2001. Influence of brown midrib, leafy, and transgenic hybrids on corn forage production. *Agron. J.* 93(4):790-796.
- Crawford, R. J., Jr., B. J. Shriver, G. A. Varga et W. H. Hoover. 1983. Buffer requirements for maintenance of pH during fermentation of individual feeds in continuous cultures. *J. Dairy Sci.* 66(9):1881-1890.

Der Bedrosian, M. C., K. E. Nestor, Jr. et L. Kung, Jr. 2012. The effects of hybrid, maturity, and length of storage on the composition and nutritive value of corn silage. *J. Dairy Sci.* 95(9):5115-5126.

Eastridge, M. L. 1999. Brown midrib corn silage. Pages 179-190 dans proceeding. Tri-State Dairy Nutrition Conference, Ohio State University, Columbus, OH. Ohio State University, Columbus, OH.

Ferraretto, L. F., C. J. Fonseca, C. J. Sniffen, A. Formigoni et R. D. Shaver. 2014. Effect of corn silage hybrids differing in starch and NDF digestibility on lactation performance and total tract nutrient digestibility by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 97(Suppl. 1):304 (Abst.).

Ferraretto, L. F. et R. D. Shaver. 2012a. Effect of corn Shredlage on lactation performance and total tract starch digestibility by dairy cows. *The Professional Animal Scientist* 28(6):639-647.

Ferraretto, L. F. et R. D. Shaver. 2012b. Meta-analysis: Effect of corn silage harvest practices on intake, digestion, and milk production by dairy cows. *The Professional Animal Scientist* 28(2):141-149.

Fournier, A., G. Tremblay, G. Bélanger et G. Allard. 2009. Les quatre facteurs de succès de l'ensilage de maïs. Pages 71-106 dans 33^e Symposium sur les bovins laitiers: Cap sur la pérennité, CRAAQ, Drummondville, Québec.

Glenn, F. B. 2013. Introducing leafy flourey hybrids for improved silage yield and quality. Pages 49-58. dans proceeding Cornell Nutrition Conference for feed manufacturers, Syracuse, NY, Cornell University, Ithaca, NY.

Gouin, D.-M. 2012. Entre le lait et le poulet, qu'est-ce qui balance? Pages 11-22 dans Le rendez-vous laitier AQINAC. AQINAC. Drummondville, Québec.

Hallada, C. M., D. A. Sapienza et D. Taysom. 2008. Effect of length of time ensiled on dry matter, starch and fiber digestibility in whole plant corn silage. *J. Dairy Sci.* 91(E-Suppl. 1):T87 (Abst.).

Hoffman, P. C., N. M. Esser, R. D. Shaver, W. K. Coblenz, M. P. Scott, A. L. Bodnar, R. J. Schmidt et R. C. Charley. 2011. Influence of ensiling time and inoculation on alteration of the starch-protein matrix in high-moisture corn. *J. Dairy Sci.* 94(5):2465-2474.

Holin, F. 2013. Shredlage vs. kernel processing. Page 10. Hay and Forage Grower. Volume 28, numéro 7.

Holt, M. S., J. S. Eun, C. R. Thacker, A. J. Young, X. Dai et K. E. Nestor, Jr. 2013. Effects of feeding brown midrib corn silage with a high dietary concentration of alfalfa hay on lactational performance of Holstein dairy cows for the first 180 days of lactation. *J. Dairy Sci.* 96(1):515-523.

Huffman, C. F. et C. W. Duncan. 1954. The nutritive value of corn silage for milking cows. *J. Dairy Sci.* 37:957-966.

Hutjens, M. 2014. Forage and Shredlage. <https://www.youtube.com/watch?v=qGJNjQDvoIE>. Page consultée le 15-06-2014.

Jenkins, T. C., C. M. Klein, et G. D. Mechor. 2009. Managing milk fat depression : interactions of ionophores, fat supplements, and other risk factors. Pages 1-11 dans Proceeding de 20th Annual Florida Ruminant Nutrition Symposium. Gainesville, Florida.

Jenkins, T. C., W. C. Bridges Jr., J. H. Harrison et K. M. Young. 2014. Addition of potassium carbonate to continuous cultures of mixed ruminal bacteria shifts volatile fatty acids and daily production of biohydrogenation intermediates. *J. Dairy Sci.* 97:975–984.

Jensen, C., M. R. Weisbjerg, P. Nørgaard et T. Hvelplund. 2005. Effect of maize silage maturity on site of starch and NDF digestion in lactating dairy cows. *Animal Feed Science and Technology* 118(3–4):279-294.

Johnson, L. M., J. H. Harrison, D. Davidson, C. Hunt, W. C. Mahanna et K. Shinnars. 2003. Corn Silage Management: Effects of hybrid, maturity, chop length, and mechanical processing on rate and extent of digestion. *J. Dairy Sci.* 86(10):3271-3299.

Kung, L., Jr., B. M. Moulder, C. M. Mulrooney, R. S. Teller et R. J. Schmidt. 2008. The effect of silage cutting height on the nutritive value of a normal corn silage hybrid compared with brown midrib corn silage fed to lactating cows. *J. Dairy Sci.* 91(4):1451-1457.

Larson, J. et P. C. Hoffman. 2008. Technical Note: A method to quantify prolamin proteins in corn that are negatively related to starch digestibility in ruminants. *J. Dairy Sci.* 91(12):4834-4839.

Lechartier, C. et J. L. Peyraud. 2010. The effects of forage proportion and rapidly degradable dry matter from concentrate on ruminal digestion in dairy cows fed corn silage-based diets with fixed neutral detergent fiber and starch contents. *J. Dairy Sci.* 93(2):666-681.

Lopes, J. C., R. D. Shaver, P. C. Hoffman, M. S. Akins, S. J. Bertics, H. Gencoglu et J. G. Coors. 2009. Type of corn endosperm influences nutrient digestibility in lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 92(9):4541-4548.

Mohd, B. M. N. et M. Wootton. 1984. In vitro digestibility of hydroxypropyl maize, waxy maize and high amylose maize starches. *Starch-Stärke* 36:273-275.

Nennich, T. D., J. G. Linn, D. G. Johnson, M. I. Endres et H. G. Jung. 2003. Comparison of feeding corn silages from leafy or conventional corn hybrids to lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 86(9):2932-2939.

Newbold, J. R., E. A. Lewis, J. Lavrijssen, H. J. Brand, H. Vedder et J. Bakker. 2006. Effect of storage time on ruminal starch degradability in corn silage. *J. Dairy Sci.* 84(Suppl. 1):T94 (Abst.).

Ngonyamo-Majee, D., R. D. Shaver, J. G. Coors, D. Sapienza, C. E. S. Correa, J. G. Lauer et P. Berzaghi. 2008a. Relationships between kernel vitreousness and dry matter degradability for diverse corn germplasm: I. Development of near-infrared reflectance spectroscopy calibrations. *Animal Feed Science and Technology* 142(3-4):247-258.

Ngonyamo-Majee, D., R. D. Shaver, J. G. Coors, D. Sapienza et J. G. Lauer. 2008b. Relationships between kernel vitreousness and dry matter degradability for diverse corn germplasm: II. Ruminal and post-ruminal degradabilities. *Animal Feed Science and Technology* 142(3-4):259-274.

NRC, N. R. C. 2001. Nutrient Requirements for Dairy Cattle. 7th rev. ed. Natl. Acad. Sci. ed., Washington, DC.

Oba, M. et M. S. Allen. 1999. Effects of brown midrib 3 mutation in corn silage on dry matter intake and productivity of high yielding dairy cows. *J. Dairy Sci.* 82(1):135-142.

Oba, M. et M. S. Allen. 2000a. Effects of brown midrib 3 mutation in corn silage on productivity of dairy cows fed two concentrations of dietary neutral detergent fiber: 1. Feeding behavior and nutrient utilization. *J. Dairy Sci.* 83(6):1333-1341.

Oba, M. et M. S. Allen. 2000b. Effects of brown midrib 3 mutation in corn silage on productivity of dairy cows fed two concentrations of dietary neutral detergent fiber: 3. Digestibility and microbial efficiency. *J. Dairy Sci.* 83(6):1350-1358.

Onetti, S. G., S. M. Reynal et R. R. Grummer. 2004. Effect of alfalfa forage preservation method and particle length on performance of dairy cows fed corn silage-based diets and tallow. *J. Dairy Sci.* 87(3):652-664.

Philippeau, C., J. Landry et B. Michalet-Doreau. 2000. Influence of the protein distribution of maize endosperm on ruminal starch degradability. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 80(3):404-408.

Ruppert, L. D., J. K. Drackley, D. R. Bremmer et J. H. Clark. 2003. Effects of tallow in diets based on corn silage or alfalfa silage on digestion and nutrient use by lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 86(2):593-609.

Rustomo, B., O. AlZahal, N. E. Odongo, T. F. Duffield et B. W. McBride. 2006. Effects of rumen acid load from feed and forage particle size on ruminal pH and dry matter intake in the lactating dairy cow. *J. Dairy Sci.* 89(12):4758-4768.

Shinners, K. J., B. N. Binversie et P. Savoie. 2003. Harvest and storage of wet and dry corn stover as a biomass feedstock. dans *Proceeding. Annual Meeting of the American Society of Agricultural engineers.* ASAE Paper No 036088. , Las Vegas, Nevada.

St-Pierre, N. R. 2009. Economical value of corn silage. Pages 119-128 dans *proceeding Tri-State Dairy Nutrition Conference*, Ohio State University, Columbus, OH. Ohio State University, Columbus, OH.

Staples, C. R. et F. M. Cullens. 2005. Implications of fat-feeding practices for lactating dairy cows - effects on milk fat. Pages 277-295 dans *Proceeding. Advances in Dairy Technology.*

Statistique Canada. 2011a. Tableau par géographie sur les exploitations et les exploitants agricole de 2011. <http://www29.statcan.gc.ca/ceag-web/fra/transpose-var-transposer?geold=240000000&selectedVarlds=155%2C>. Page consultée le 29-09-2014.

Statistique Canada. 2011b. Données sur les exploitations et les exploitants agricoles de 2011. <http://www29.statcan.gc.ca/ceag-web/fra/community-agriculture-profile-profil-agricole?geold=240000000&selectedVarlds=167%2C>. Page consultée le 29-09-2014.

Stone, W. C., L. E. Chase, T. R. Overton et K. E. Nestor. 2012. Brown midrib corn silage fed during the peripartur period increased intake and resulted in a persistent increase in milk solids yield of Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 95(11):6665-6676.

Taylor, C. C. et M. S. Allen. 2005a. Corn grain endosperm type and brown midrib 3 corn silage: feeding behavior and milk yield of lactating cows. *J. Dairy Sci.* 88(4):1425-1433.

Taylor, C. C. et M. S. Allen. 2005b. Corn grain endosperm type and brown midrib 3 corn silage: site of digestion and ruminal digestion kinetics in lactating cows. *J. Dairy Sci.* 88(4):1413-1424.

Thomas, E. D., P. Mandebvu, C. S. Ballard, C. J. Sniffen, M. P. Carter et J. Beck. 2001. Comparison of corn silage hybrids for yield, nutrient composition, in vitro digestibility, and milk yield by dairy cows. *J. Dairy Sci.* 84(10):2217-2226.

Tsai, C. Y., D. M. Huber et H. L. Warren. 1980. A proposed role of zein and glutelin as N sinks in maize. *Plant Physiology* 66(2):330-333.

Vanderwerff, L. M., L. F. Ferraretto et R. D. Shaver. 2014. Impact of brown-midrib corn Shredlage^R on lactation performance. <https://asas.confex.com/asas/jam2014/webprogram/paper10735.html>. Page consultée le 12-09-2014.