



Centre de référence en agriculture
et agroalimentaire du Québec

Comité bovins laitiers

31^e Symposium sur les bovins laitiers « *Repenser nos modèles* »

Jeudi 15 novembre 2007

Silo couloir pour l'herbe et le maïs

Philippe SAVOIE, agronome, ingénieur, Ph.D.

Agriculture et Agroalimentaire Canada
et Université Laval, Québec

Conférence préparée avec la collaboration de :

Luc D'AMOURS, ingénieur junior, M.Sc.

Note : Cette conférence a été présentée lors de l'événement et a été
publiée dans le cahier des conférences.

Pour commander le cahier des conférences, consultez
[le catalogue des publications du CRAAQ](http://www.agrireseau.qc.ca/publications)



Silo couloir pour l'herbe et le maïs

Résumé

Le silo couloir permet d'entreposer divers fourrages dans des cellules faciles à remplir et à vider, et avec une certaine flexibilité au niveau des dimensions. Ce texte illustre les résultats de travaux de recherche récents sur la densité, les pertes par oxydation et la mesure de la teneur en eau des ensilages. Il présente plusieurs recommandations pour assurer une bonne conservation de l'ensilage avec ce type de silo.

Introduction

Les principaux systèmes d'ensilage au Québec incluent le silo tour, le silo couloir, le silo meule et l'ensilage enrubanné, en balles rondes ou en grosses balles rectangulaires recouvertes d'un film de plastique étirable. Les entreprises laitières au Québec peuvent bien sûr tirer un avantage économique ou technique de différents systèmes d'entreposage des fourrages selon leur situation particulière (CRAAQ 2006a; 2006b). Le but de ce texte n'est pas de fournir une comparaison exhaustive de ces divers systèmes, mais plutôt de comprendre plus à fond un système en particulier, le silo couloir.

Les silos couloir sont devenus le principal système d'entreposage des ensilages sur les grandes exploitations laitières et bovines aux États-Unis au cours des 30 dernières années (Ruppel *et al.*, 1995). Plus récemment, les constructeurs québécois ont adapté ces silos aux fermes de plus petite taille (Dubreuil *et al.*, 2004). Ainsi, un silo couloir peut être construit en plusieurs cellules de dimensions adaptées à l'entreprise laitière. Il permet une expansion facile si l'emplacement a été bien planifié. Les silos couloir ont certains avantages par rapport aux silos tour, notamment en ce qui a trait au coût d'investissement et à la rapidité de remplissage et de reprise. Les silos couloir ne posent pas de problèmes de gaz toxiques contrairement aux silos tour et aux salles d'alimentation dans des aires fermées. Toutefois, ils requièrent une gestion attentive pour atteindre une bonne densité, minimiser les pertes et obtenir un ensilage d'aussi bonne qualité qu'en silo tour.

Le silo couloir exige un investissement estimé à 192 \$/t de matière sèche (MS) pour un troupeau type de 50 vaches laitières consommant 200 t MS d'ensilage par an. Un silo meule à capacité équivalente requiert un investissement estimé à 115 \$/t MS (CRAAQ 2006a; 2006b). Toutefois, le coût total de l'ensilage est de 163 \$/t MS en silo meule et de 162 \$/t MS en silo couloir. Malgré des frais d'investissement plus élevés pour le silo couloir, le coût annuel d'entreposage est équivalent à celui du silo meule, car les pertes en silo meule sont un peu plus élevées que les pertes en silo couloir.

Durant la période 2004-2007, une équipe de recherche formée de collaborateurs à Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), l'Université Laval et l'Institut de recherche et

de développement en agroenvironnement (IRDA) a bénéficié d'un soutien de Novalait, du MAPAQ et du FQRNT pour étudier divers aspects techniques des silos couloir. Quelques années auparavant (1999-2002), d'autres travaux de recherche menés par l'Université Laval et AAC, en collaboration avec l'IRDA et l'Institut Armand-Frappier, avaient porté sur les couvertures de silos et la gestion des écoulements (lixiviats) des ensilages trop humides.

Avant de se lancer dans la construction d'un silo couloir, il vaut la peine d'examiner certains détails de gestion et de conservation. Ensuite, la décision de choisir ou non ce type de silo peut être prise en connaissance de cause. Le texte de cette présentation suit le même cheminement. Il examine d'abord plusieurs résultats de recherche obtenus au Québec au sujet des silos couloir. Ensuite, des recommandations sont présentées afin de bien concevoir et gérer les silos couloir.

Partie I – Résultats de recherche faite au Québec

Masse volumique de l'ensilage

De 2003 à 2005, une étude sur le profil de densité d'ensilages de maïs et d'herbe dans les silos couloir a été menée sur neuf fermes laitières commerciales, quatre dans la région de Nicolet, quatre dans la région de Chaudière-Appalaches et une dans la région de Lotbinière (total de 13 silos couloir, sept pour l'herbe et six pour le maïs). Les méthodologies et résultats détaillés ont été publiés par D'Amours et Savoie (2004, 2005a, 2005b).

Lors du remplissage des silos, plusieurs facteurs ont été mesurés : la masse des tracteurs de compactage, la masse des wagons, les dimensions et la pression des pneus, le temps de compactage et d'étalement, le taux de récolte et les caractéristiques des plantes (longueur de hachage, teneur en eau et pourcentage de grain). Plusieurs mois après la récolte, les mêmes fermes ont été visitées deux fois chacune lors de la reprise hivernale. L'ensilage était échantillonné sur la face de reprise selon une grille de 24 trous : trois lignes verticales près d'un mur et trois lignes verticales près du centre, avec quatre hauteurs échantillonnées (à 0,5 m du plancher, à 0,5 m du sommet et à deux autres points intermédiaires). Deux échantillons étaient pris par trou, l'un en surface de 0 à 180 mm de la face, l'autre en profondeur de 180 à 360 mm de la face. Les 48 échantillons étaient prélevés avec une tarière de 73 mm de diamètre et jusqu'à 360 mm de profondeur.

Sur un total de 552 échantillons de maïs ensilage, la densité a varié de 115 à 361 kg de matière sèche (MS)/m³, avec une moyenne de 234 kg MS/m³. Sur un total de 591 échantillons d'herbe, la densité a varié de 61 à 470 kg MS/m³, avec une moyenne de 241 kg MS/m³. Les échantillons prélevés en profondeur étaient toujours plus denses que les échantillons en surface, de 9 % en moyenne pour le maïs et de 15 % pour l'herbe. La densité en profondeur était considérée plus représentative de la masse entreposée que la densité en surface à cause des perturbations dues à la reprise. En tenant compte seulement des échantillons en profondeur, on a observé que la densité de l'ensilage près du sommet

était toujours moins grande que la densité près du plancher, soit de 23 % et 58 % en moyenne pour le maïs et l'herbe, respectivement. De plus, les échantillons au centre étaient généralement plus denses que les échantillons près du mur, de 7 % en moyenne pour le maïs et de 9 % pour l'ensilage d'herbe. On a analysé la densité moyenne de chaque silo à chaque date de suivi par rapport à cinq facteurs : un facteur de compactage proportionnel à la masse du tracteur et inversement proportionnel au taux de récolte, la hauteur de l'ensilage, la teneur en eau, la longueur de hachage et le pourcentage de grain. Pour le maïs, seulement deux facteurs, le pourcentage de grain et la hauteur de l'ensilage, représentaient très bien la variation de densité moyenne (avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,945$). Les plages expérimentales étaient entre 196 et 293 kg MS/m³ pour la densité moyenne, entre 17 et 50 % pour le pourcentage de grain et entre 2,4 et 3,3 m pour la hauteur d'ensilage. La figure 1 illustre la variation expérimentale et théorique selon le modèle.

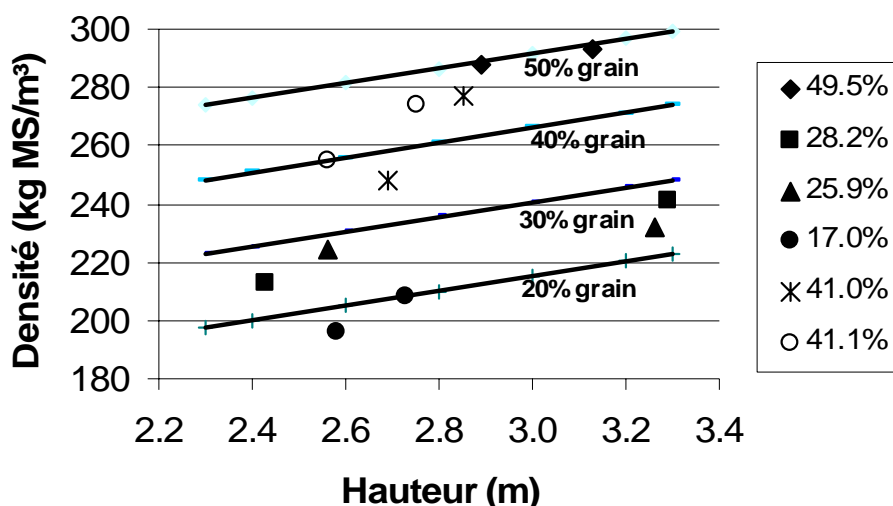


Figure 1. Densité d'ensilage de maïs selon le pourcentage de grain et la hauteur d'ensilage. Les points sont une moyenne de 24 échantillons en profondeur pour un pourcentage de grain à la récolte (entre 17,0 et 49,5 %). Les lignes représentent la densité selon un modèle à des pourcentages de grain de 20, 30, 40 et 50 %.

Pour l'ensilage d'herbe, les deux facteurs qui ont été retenus à la suite de l'analyse statistique étaient la teneur en eau (variant de 57,9 à 74,1 %) et l'indice de compaction (de 0,66 à 1,01 $t_{\text{tracteur}}/t_{\text{herbe-MS/h}}$). Cet indice est le ratio entre la masse du tracteur de compactage et le débit de récolte en tonnes de MS à l'heure. Par exemple, si un tracteur de 5 t compacte pendant que le taux de récolte est de 20 t humides à l'heure à 70 % de teneur en eau ou 30 % de MS (6 t MS/h), l'indice de compaction est de 0,83. La figure 2 permet de prédire la densité moyenne compactée ($R^2 = 0,916$) selon la teneur en eau et l'indice de compaction dans la plage de 215 à 354 kg MS/m³. La figure 2 montre aussi qu'un modèle développé au Wisconsin pour l'herbe prédit des densités plus faibles (entre 210 et 290 kg MS/m³) que celles observées au Québec pour le même indice de compaction.

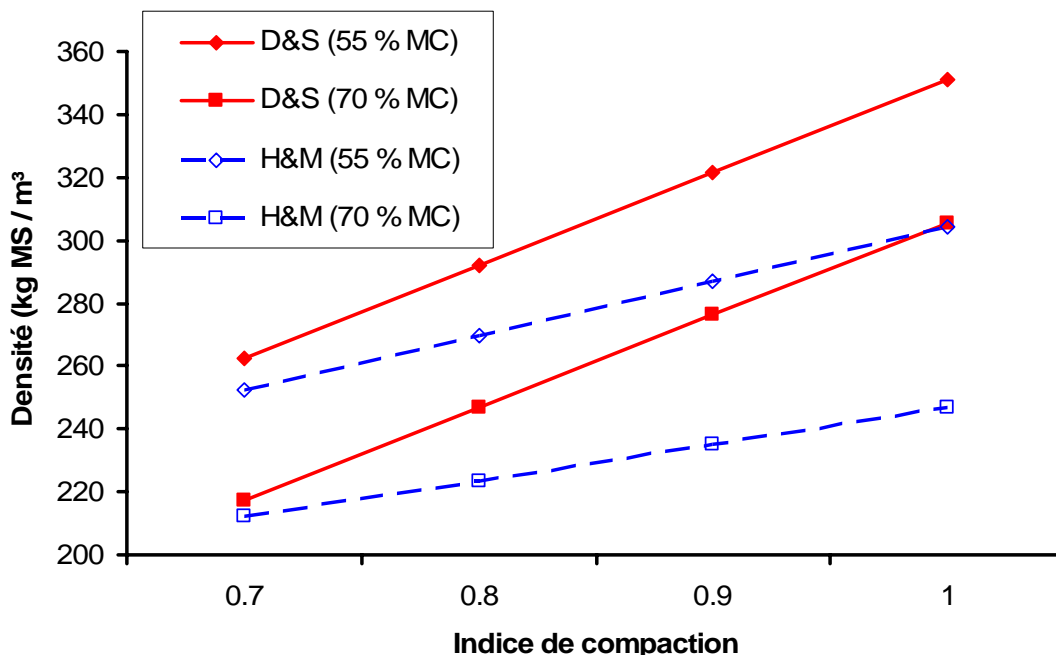


Figure 2. Prédiction de la densité moyenne de l'ensilage d'herbe dans les silos couloir en fonction de l'indice de compaction ($I = m_T/Q_r$, où I est l'indice de compaction [$t_{tracteur}/(t_{herbe} \text{ MS/h})$], m_T est la masse du tracteur ($t_{tracteur}$) et Q_r est le taux de récolte ($t_{herbe} \text{ MS/h}$). Les lignes pleines sont basées sur les résultats au Québec de D'Amours et Savoie (2005a); les lignes pointillées sont basées sur des résultats au Wisconsin (Holmes et Muck, 2005).

Pertes d'ensilage par oxydation

En octobre 2004 à l'IRDA de Deschambault, une autre étude a été menée pour quantifier l'effet de la couverture, la densité, la profondeur et le temps sur les pertes de MS de l'ensilage de maïs dans un silo couloir. La méthodologie et les résultats détaillés ont été présentés par Savoie *et al.* (2006). Au total, 54 mini-silos avec un diamètre intérieur de 100 mm et une hauteur de 660 mm ont été remplis en trois segments de 200 mm chacun avec du maïs fourrager haché à une longueur de coupe théorique de 9 mm. Trois facteurs ont été considérés : la densité à trois niveaux (160, 240 et 320 kg MS/m³), le temps de reprise à trois moments (après un mois, deux mois et six mois) et la couverture selon deux options (silo fermé avec un couvercle en PVC vissé ou silo ouvert à l'air).

L'analyse des résultats a montré que seulement la couverture avait une influence significative sur les pertes. Quand le silo était étanche (avec couvercle vissé), les pertes étaient relativement faibles (0 à 3 % dans le premiers 600 mm pendant six mois). Elles étaient très peu influencées par le niveau de densité, la profondeur ou le temps d'entreposage, jusqu'à six mois. Dans un silo sans aucune couverture, les pertes étaient très élevées et atteignaient plus de 50 % près de la surface après six mois (figure 3).

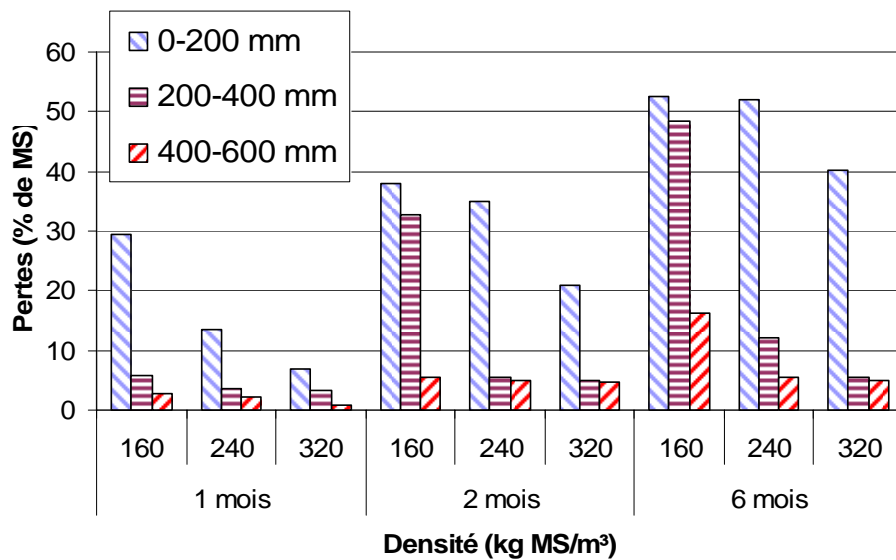


Figure 3. Pertes expérimentales de MS de maïs fourrager dans des silos non couverts en fonction de la profondeur (3 segments entre 0 et 600 mm de la surface), de la densité (160 à 320 kg MS/m³) et de la durée d'entreposage (1 à 6 mois).

À partir de ces résultats, un modèle de prédiction a été développé pour simuler les pertes en silos couloir en fonction de la profondeur. La figure 4 montre que les pertes moyennes dans un silo couloir étanche sont d'environ 3 % après six mois d'entreposage, indépendamment de la densité entre 160 et 320 kg MS/m³. Si le silo est ouvert, alors les pertes sont très élevées et variables selon la densité et la profondeur totale du silo. Par exemple, pour une profondeur de 1,5 m, les pertes sont de 10 % dans un silo très dense (320 kg MS/m³) et de 20 % dans un silo peu dense (160 kg MS/m³). Il est donc très important de recouvrir rapidement et de façon étanche l'ensilage. Une densité élevée est utile pour accroître la capacité du silo, mais elle n'empêche pas des pertes importantes si le silo est mal scellé.

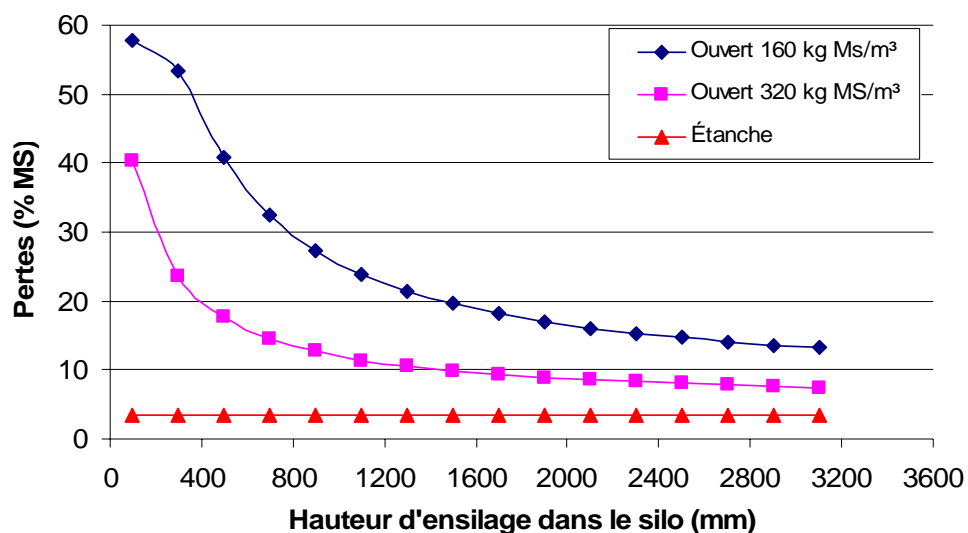


Figure 4. Pertes (% de MS) simulées pour de l'ensilage de maïs en fonction de la hauteur du silo, après 6 mois d'entreposage.

En 2001-2002, on a couvert des ensilages avec des résidus organiques afin d'évaluer leur potentiel à remplacer le film de polyéthylène difficile à recycler (Savoie *et al.*, 2003). La figure 5 illustre les pertes d'ensilage dans un segment de 0 à 90 mm de la surface. Les six couvertures étaient : un témoin positif pratiquement étanche (bouchon sur un mini-silo tubulaire), un témoin négatif (ouvert à l'air), de la pulpe de pomme et du beurre d'arachide, à deux épaisseurs chacune. Durant les 15 premiers jours, le silo ouvert a perdu 30 % de sa masse dans ce segment; les couches organiques ont perdu moins de masse (3 % avec une couche épaisse de beurre d'arachide). Il peut être tentant d'utiliser des résidus organiques déclassés de l'industrie alimentaire. Par contre, les résultats montrent que les couvertures organiques ont simplement retardé le processus d'oxydation. Après 45 jours, les ensilages sous toutes les couvertures organiques avaient perdu entre 25 et 45 % de leur masse tandis que le silo étanche n'avait pas perdu 2 % de sa masse. Les couvertures organiques se fissuraient à la longue et laissaient passer l'air.

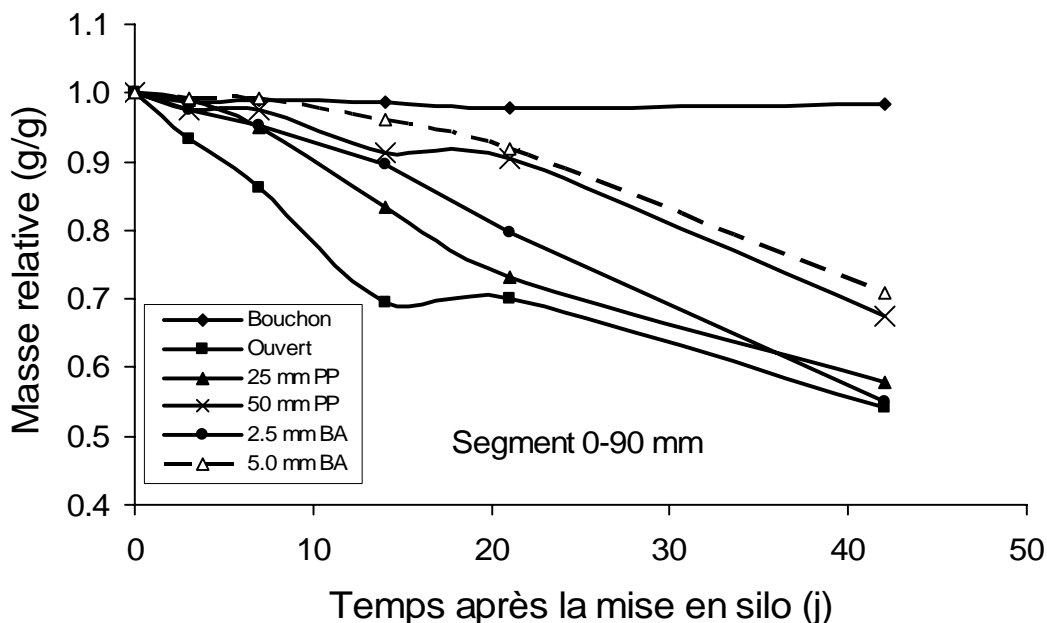


Figure 5. Masse relative d'ensilage dans le segment du haut (0 à 90 mm de la surface) en fonction du temps pour différentes couvertures : étanche (bouchon), ouvert à l'air, recouvert de 25 ou 50 mm de pulpe de pomme (PP) ou recouvert de 2,5 ou 5 mm de beurre d'arachide (BA).

D'autres travaux ont porté sur le développement de nouveaux bioenrobages à base de protéine de soya et de caséine (Amyot *et al.*, 2003). Ces bioenrobages ont limité l'infiltration d'eau, la détérioration associée à l'infiltration d'air (chauffage, pertes, moisissures) et la baisse de valeur nutritive en surface (0 à 130 mm) par rapport à aucune couverture. Par contre, la détérioration sous bioenrobage était plus prononcée que sous film plastique après 4 et 8 semaines d'entreposage. En pratique, le film de polyéthylène demeure un matériau à privilégier pour obtenir une bonne protection de l'ensilage, surtout pour de longues durées d'entreposage de plusieurs mois. Il faut bien sûr s'assurer de

disposer du plastique souillé selon les règles environnementales en vigueur (collecte sélective, combustion si la chaudière utilisée respecte les seuils d'émission de particules et de gaz en vigueur, etc.).

Teneur en eau des ensilages

Pour les fourrages non fermentés (herbe fraîche ou foin sec), la méthode recommandée pour doser la teneur en eau (TEE) consiste à faire sécher l'échantillon dans une étuve à 103 °C pendant 24 heures (ASABE, 2007). Dans le cas des fourrages fermentés (ensilages), la méthode recommandée pour doser la TEE consiste à faire sécher l'échantillon à 60 °C pendant 72 heures (ASABE, 2007). Une température plus basse est requise pour les ensilages pour minimiser l'évaporation des acides gras volatils (AGV). Avec des ensilages bien fermentés, le séchage à 103 °C peut occasionner une surestimation de la TEE de 1 à 2 % par rapport à un séchage à 60 °C.

Diverses sondes électroniques sont disponibles commercialement pour mesurer la TEE des fourrages. Leur utilisation requiert toutefois de répéter plusieurs fois les mesures et d'effectuer un étalonnage régulier. La meilleure façon d'étalonner ces sondes est de comparer les mesures électronique avec des mesures à l'étuve, avec un testeur d'humidité à l'air chaud commercial (de type Koster avec élément chauffant et ventilateur) ou avec un four micro-ondes. Joannis *et al.* (2005) ont montré la difficulté d'avoir une calibration régulière avec une mesure électronique dans des fourrages très humides. Cormier *et al.* (2007) ont indiqué que la précision de certaines sondes électroniques dans du foin humide était de $\pm 2,1$ % avec 5 mesures et de $\pm 1,2$ % avec 10 mesures répétées. Il est donc important de prendre plusieurs mesures pour améliorer la précision de l'estimation. Dix mesures répétées devraient normalement donner une bonne estimation.

Un problème supplémentaire lié à l'estimation de la TEE est la variation naturelle de la concentration d'eau dans les fourrages. En particulier dans les silos couloir, le fourrage est parfois récolté durant plusieurs jours. La TEE du fourrage au moment de la récolte peut alors varier considérablement. Ce fourrage est ensuite mélangé dans le silo, mais des gradients de TEE vont subsister dans la masse entreposée. Les figures 6 et 7 montrent deux exemples de variation de la TEE dans des silos couloir échantillonnés au Québec en 2004-2005. À la figure 6, la TEE a varié entre 54 et 63 % (moyenne de 58 %, écart-type de 2,0 %). À la figure 7, la TEE a varié entre 52 et 75 % (moyenne de 65 %, écart-type de 5,9 %). Dans le deuxième silo, il y avait beaucoup plus de variation naturelle. Il est donc important d'échantillonner régulièrement la TEE de l'ensilage dans un silo pour avoir une mesure représentative de l'ensilage servi aux animaux.

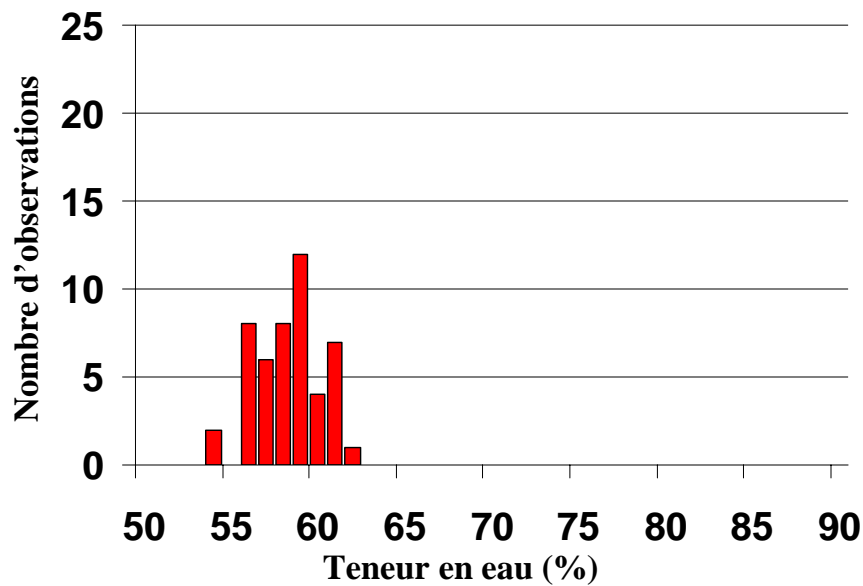


Figure 6. Distribution de teneur en eau dans un silo couloir relativement homogène (moyenne de 58,3 %, écart-type de 1,95 %).

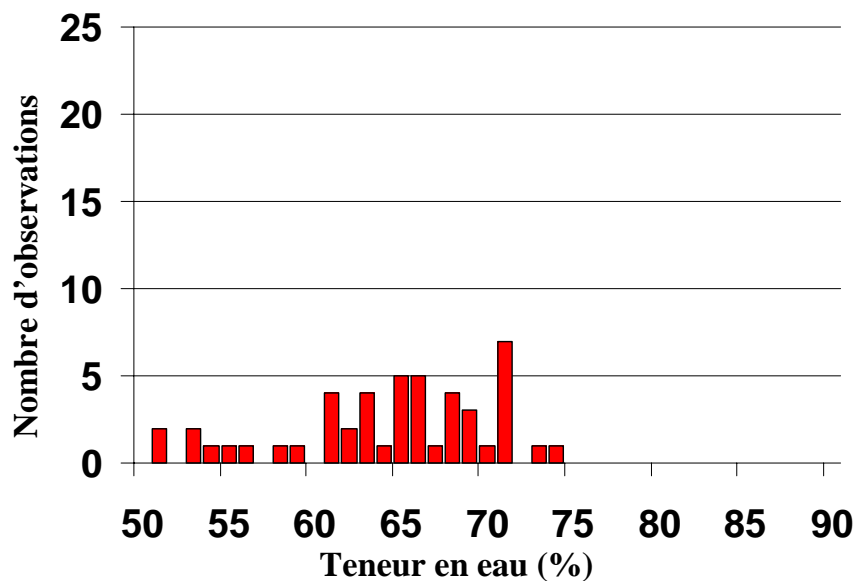


Figure 7. Distribution de teneur en eau dans un silo couloir relativement hétérogène (moyenne de 65,4 %, écart-type de 5,92 %).

L'importance économique de la précision de la mesure de la TEE a été évoquée par Joannis et Savoie (2006). Elle est expliquée aux tableaux 1 et 2. Le tableau 1 illustre la différence de composition des rations selon le niveau de production de lait (entre 10 et 50 kg de lait/jour). On observe que la proportion d'ensilage à ajouter dans la RTM varie entre 33 et 74 % et que le coût des rations varie entre 134 et 175 \$/t MS.

Tableau 1. Exigences d'énergie nette de lactation (EN_L) et de protéines brutes (PB), et composition de rations totales mélangées (RTM) pour rencontrer ces exigences.

Production de lait (kg/jour)	Exigences		Composition de la RTM			Coût de la ration (\$/t MS)
	EN _L (Mcal/kg MS)	PB (% MS)	Mais ensilage (%)	Mais grain (%)	Tourteau de soya (%)	
50	1,72	18	32,9	42,3	24,8	174,98
40	1,72	17	32,9	45,0	22,1	171,20
30	1,62	16	46,6	32,4	21,0	161,44
20	1,52	15	60,3	19,9	19,8	151,54
10	1,42	12	74,0	12,6	13,4	134,36

Hypothèses de calcul : - Maïs ensilage à 1,23 Mcal/kg MS, 5,9 % PB et 100 \$/t MS.
 - Maïs grain à 1,96 Mcal/kg MS, 10,0 % PB et 160 \$/t MS.
 - Tourteau de soya à 1,96 Mcal/kg MS, 47,7 % PB et 300 \$/t MS.

Sources : - NRC, 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle.
 - La Terre de chez nous (avril 2006) pour le prix des provendes.

Si on se trompe dans l'estimation de la TEE, il y aura nécessairement une erreur dans la préparation de la RTM. Le tableau 2 montre l'impact d'une erreur d'estimation absolue de ± 10 % de la TEE. Si on sous-estime la TEE (55 % quand la TEE réelle est 65 %), on mettra moins d'ensilage dans la RTM et il y aura relativement plus de concentrés. La ration sera alors trop riche en énergie et en protéine; il y aura un gaspillage d'aliments achetés, au coût supplémentaire d'environ 6 \$/t MS. Ce coût supplémentaire représente environ 42 \$/vache/an. Une ration trop riche peut aussi occasionner des problèmes de rumination dus au manque de fibre et des frais vétérinaires imprévus.

Tableau 2. Effet d'une erreur absolue d'estimation de la teneur en eau (TEE) pour la RTM destinées aux hautes productrices (50 kg lait/jour).

	Erreur d'estimation de la TEE		
	- 10 %	0 %	+ 10 %
TEE réelle (%)	65	65	65
TEE estimée (%)	55	65	75
Masse d'ensilage humide mélangée dans « une tonne MS » de RTM (kg)	731	940	1312
MS d'ensilage ajoutée aux concentrés dans « une tonne de MS » de RTM (kg)	256	329	459
EN _L de la RTM (Mcal/kg MS)	1,76	1,72	1,66
PB de la RTM (% MS)	19,0	18,0	16,6
Coût de la RTM (\$/t MS)	180,89	174,98	166,26

Si on surestime la TEE (75 % quand la TEE réelle est 65 %), on mettra alors trop d'ensilage dans la RTM et il y aura relativement moins de concentrés. La ration sera alors trop pauvre pour maintenir la production laitière. Dans cet exemple, la production de lait pourrait chuter de 50 kg/jour à 35 kg/jour. Sur une base annuelle, la production de lait pourrait baisser de 10 % (900 kg sur un potentiel de 9000 kg) si on surestime souvent la TEE et qu'on retarde à la corriger. Une telle baisse représente une perte de revenu de lait d'environ 550 \$/vache/an. Il y aura en revanche une économie sur le coût de la ration de 8,72 \$/t MS selon le tableau 2, ou environ 60 \$/vache/an. La perte nette serait de 490 \$/vache/an.

Si on généralise cet exemple (de façon simplifiée), on peut dire qu'une erreur de $\pm 1\%$ de la TEE occasionnera une perte d'environ 4 \$/vache/an (en sous-estimation) et 49 \$/vache/an (en surestimation). Avec un troupeau de 60 vaches et une imprécision de $\pm 5\%$ sur la TEE, la perte moyenne sera de $5 \times (4 + 49)/2 = 132,50$ \$/vache/an, soit 7 950 \$ par an. En comparaison, une imprécision de $\pm 1\%$ sur la TEE amènera une perte moyenne de 1 590 \$ par an. Une gestion avec une erreur de $\pm 1\%$ au niveau de l'estimation de la TEE au lieu de $\pm 5\%$ permet de réaliser une économie annuelle de plus de 6 000 \$. Donc, ça vaut la peine de mesurer régulièrement la TEE des ensilages, et d'étalonner correctement les instruments de mesure de cette TEE.

Partie II – Recommandations pour les silos couloir

Cette deuxième partie reprend quelques recommandations publiées par divers auteurs (Bodman et Holmes, 1997; Holmes et Muck, 2004; Savoie et Jofriet, 2003) et les met en contexte avec les résultats de recherche discutés précédemment.

Remplissage

Les principaux facteurs qui influencent la stabilité et la qualité de l'ensilage sont : la longueur de coupe, la TEE, la maturité du fourrage à la récolte, la technique de remplissage et l'étanchéité de la couverture. Une récolte effectuée à un bon niveau d'humidité (67 % TEE pour le maïs et 63 % TEE pour l'herbe conservés en silo couloir) et hachée court (environ 13 mm) facilite le compactage. Une récolte trop humide (TEE supérieure à 70 %) occasionne l'écoulement d'effluents et la perte d'éléments nutritifs solubles. À l'inverse, un fourrage trop sec est plus difficile à compacter; il favorise une plus grande présence d'oxygène et la prolifération de microorganismes.

Le compactage du fourrage fraîchement récolté doit s'effectuer de façon continue, sans délai. Quand le remplissage se poursuit durant plusieurs jours, il est conseillé de commencer à circuler sur l'ensilage déjà entreposé la veille une heure avant le premier déchargement et de terminer une heure après le dernier. La grosseur du tracteur de compactage devrait être ajustée au taux de récolte afin d'obtenir une bonne densité de MS. Le niveau de densité recherché est généralement d'au moins 240 kg MS/m³ (15 lb MS/pi³).

On peut utiliser une feuille de calcul Excel développée par Holmes et Muck (2005) <http://www.uwex.edu/ces/crops/uwforage/storage.htm> pour vérifier si le tracteur de compactage est assez lourd compte tenu du taux de récolte.

Une bonne technique pour remplir le silo consiste à pousser le fourrage selon une pente progressive en couches de 150 mm d'épaisseur (figure 8) et à circuler deux fois sur la surface étalée entre chaque voyage. Il est possible de grimper avec une pente de 1/3, mais durant le remplissage normal, il est plus facile d'utiliser une pente plus douce d'environ 1/5. Un tracteur à quatre roues motrices offrira une bonne traction et un meilleur contrôle qu'un tracteur à deux roues motrices. Certains détails, comme la façon de déplacer le tracteur sur le silo, peuvent influencer la densité finale et l'homogénéité (figures 9 et 10).

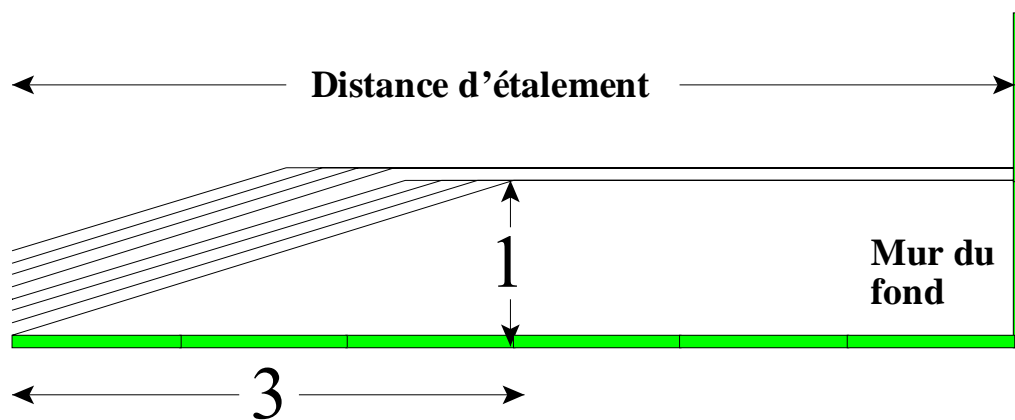


Figure 8. Montée progressive de l'ensilage en couches d'environ 150 mm d'épaisseur, avec une pente maximale de 1/3 (plus souvent 1/4 ou 1/5).

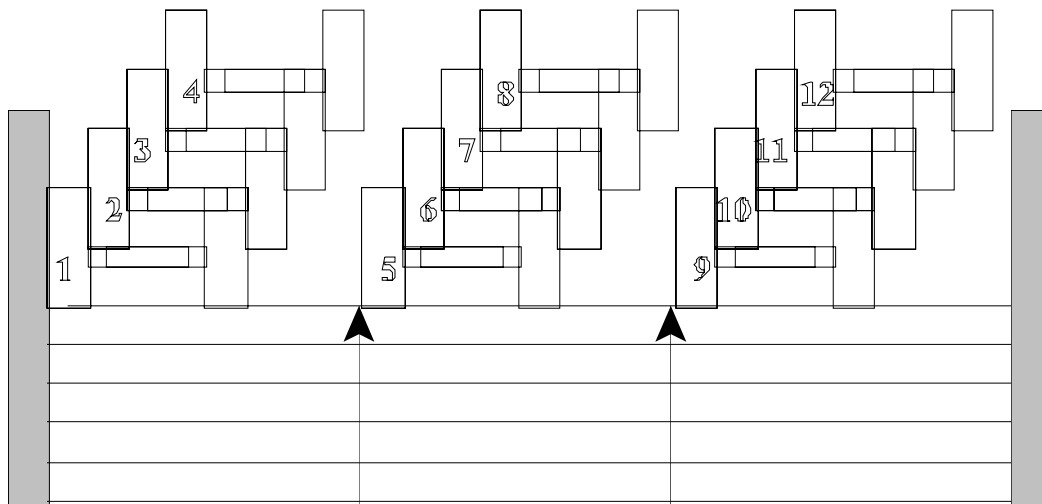


Figure 9. Illustration d'une séquence de 12 mouvements latéraux du tracteur de compactage pour obtenir un compactage relativement homogène.

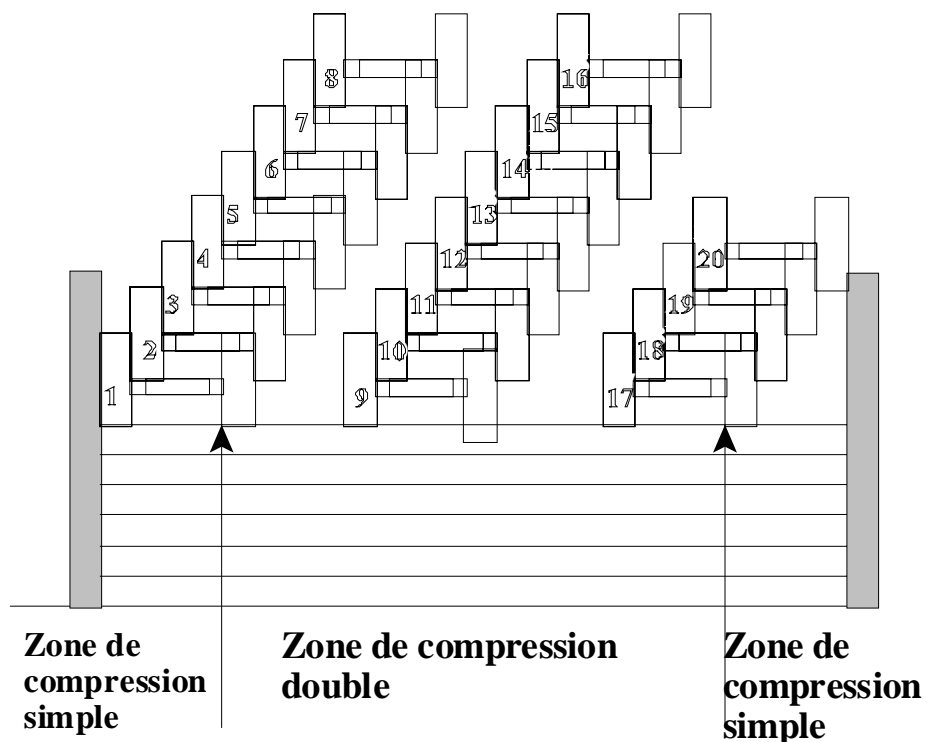


Figure 10. Illustration d'une séquence de 20 mouvements latéraux du tracteur de compaction qui peut résulter en un compactage hétérogène.

À la fin du remplissage, il est courant de créer un débordement de l'ensilage devant les murs latéraux sur une distance d'environ 1,5 fois la hauteur des murs (figure 11). La pente naturelle qui correspond à peu près au maximum pratique lors de la circulation avec un tracteur, sans encourir un risque excessif de renversement, est d'environ une unité verticale pour trois unités horizontales (pente 1/3). En utilisant une telle pente, on commence à faire baisser le tas à une distance de 1,5 fois la hauteur avant la fin de la cellule. Le recouvrement à l'intérieur de la cellule pourra se faire avec une seule toile, mais il faudra ajouter de petits bouts de toile de plastique sur les débordements à l'avant du silo.

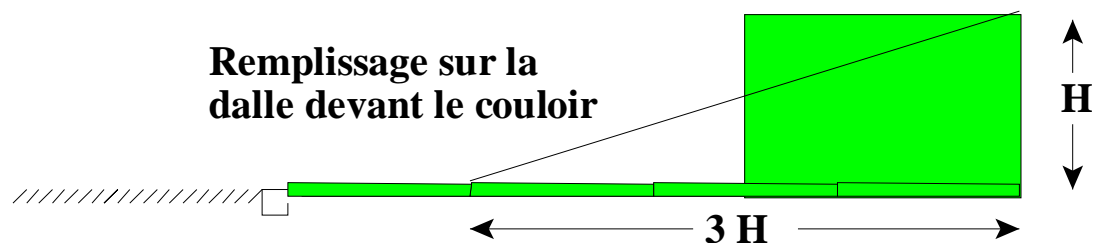


Figure 11. Illustration de la fin du remplissage d'une cellule. Le tas d'ensilage s'étend sur la plateforme à une distance horizontale d'environ 1,5 fois la hauteur (H). La plateforme de circulation devrait mesurer au moins 2,5 fois H devant la cellule.

Couverture

La masse d'ensilage au sommet du silo devrait avoir la forme d'un léger dôme pour permettre à l'eau de pluie de s'écouler de chaque côté du silo et ensuite vers l'avant (figure 12). Une fois que le silo est rempli et bien compacté, il est essentiel de le couvrir immédiatement avec une toile d'au moins 150 microns (0,006 po) d'épaisseur. Le tableau 3 illustre les dimensions et les prix des toiles de polyéthylène couramment disponibles en mai 2007.

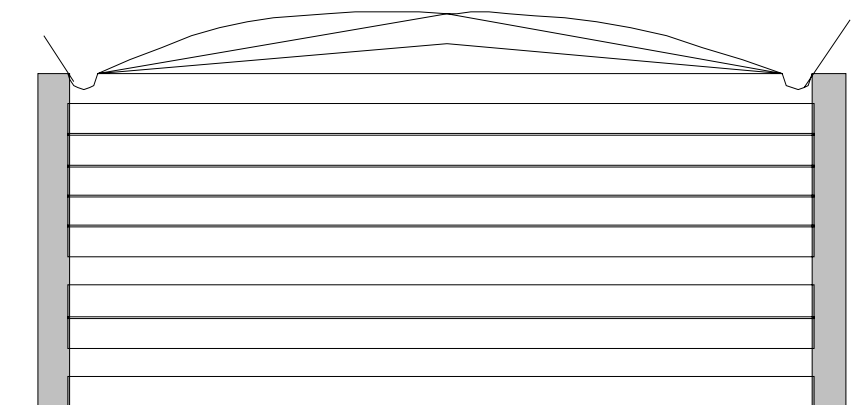


Figure 12. Placement de la toile de polyéthylène avec un petit creux contre les murs pour l'écoulement de l'eau de pluie et un léger dépassement latéral pour maintenir l'étanchéité après le remplissage et un tassement possible. Il faut replacer des pneus ou du ballast au besoin pour maintenir la toile tendue.

Tableau 3. Toiles de polyéthylène × couramment disponibles sur le marché (mai 2007).

Dimensions des toiles		Prix (\$/toile)	Largeur de cellule compatible	
Courantes (pi × pi)	Métriques (m × m)		Courante (pi)	Métrique (m)
I. Plastique blanc (0,006" ou 150 microns d'épaisseur)				
24 × 100	7,3 × 30,5	148	20	6,1
32 × 100	9,8 × 30,5	197	28	8,5
40 × 100	12,2 × 30,5	246	35	10,7
50 × 100	15,2 × 30,5	306	45	13,7
II. Plastique noir (0,006" ou 150 microns d'épaisseur)				
20 × 100	6,1 × 30,5	112	16	4,9
24 × 100	7,3 × 30,5	144	20	6,1
32 × 100	9,8 × 30,5	178	28	8,5
40 × 100	12,2 × 30,5	240	35	10,7
50 × 100	15,2 × 30,5	301	45	13,7
III. Plastique noir (0,008" ou 200 microns d'épaisseur)				
32 × 100	9,8 × 30,5	248	28	8,5
40 × 100	12,2 × 30,5	332	35	10,7

Il est recommandé d'utiliser une toile qui dépasse d'environ 0,6 m (2 pi) de chaque côté des murs de la cellule. Par exemple, un silo de 6,1 m (20 pi) de largeur devrait utiliser une toile de 7,3 m (24 pi) de largeur. Cela facilitera le placement de la toile sur toute la largeur, avec une certaine flexibilité de chaque côté. Pour les couvertures plus larges (40 et 50 pi), il est sage d'ajouter la perte de 2 % de la longueur pour suivre la forme arrondie du dôme. En pratique, la largeur des toiles de plastique utilisées pour recouvrir des cellules de 10,7 m (35 pi) et plus devrait être la largeur de la cellule plus 1,5 m (5 pi). Compte tenu des largeurs de toile couramment disponibles sur le marché (20, 24, 32, 40 et 50 pi), les largeurs de cellules à recommander se limitent à 16, 20, 28, 35 et 45 pi (4,9, 6,1, 8,5, 10,7 et 13,7 m). Si on choisit des largeurs de cellules différentes de celles-ci, on pourra être obligé d'utiliser deux toiles de polyéthylène lors du recouvrement, ou encore des fractions de toiles.

Pour empêcher que la toile se soulève au vent, des pneus doivent être placés au nombre de 15 à 20 par 10 m². Les pneus devraient être coupés en deux parallèlement aux flancs et percés de trous pour éviter l'accumulation d'eau à l'intérieur. On peut aussi lester la toile de plastique avec des sacs cylindriques (environ 100 mm de diamètre et 600 mm de longueur) munis d'une gaine et contenant du gravier. Ces sacs peuvent être plus propres que des pneus, et particulièrement appropriés à la jonction des murs et de la toile. Après avoir placé la couverture, on devrait revenir inspecter la toile une ou deux fois durant les jours suivants. On pourra alors rétablir la tension de la toile et replacer le lest entre la toile, le mur et la surface d'ensilage, au besoin. Par la suite, on devrait normalement attendre au moins trois semaines avant de rouvrir le silo pour l'alimentation, c'est-à-dire lorsque la fermentation sera complétée.

Reprise de l'ensilage

Il existe différentes techniques et divers équipements pour reprendre l'ensilage dans les silos couloir. La méthode la plus courante est l'utilisation d'un chargeur frontal à l'avant d'un tracteur. Il faut faire débouler lentement l'ensilage et le récupérer avec la pelle. La fraiseuse est un équipement spécialisé composé d'un rotor muni de nombreuses dents fines qui laissent une surface relativement verticale et unie. Peu importe l'équipement utilisé, la face de reprise devrait demeurer lisse et pratiquement verticale pour minimiser les infiltrations d'air. À chaque jour, tout l'ensilage détaché de la face et sur le plancher du silo devrait être retiré. Le taux de reprise doit être au minimum l'équivalent d'une tranche verticale de 100 mm d'épaisseur par jour en hiver et de 150 mm par jour en été.

On peut retirer la toile sur une longueur équivalant à trois jours d'alimentation pour faciliter la reprise tout en limitant les pertes. Durant le retrait de la toile, il faut faire attention aux crevasses et au risque d'effondrement. Si on doit prélever des échantillons d'ensilage pour fins d'analyse, il est conseillé de les prendre directement dans le chargeur au lieu de grimper sur la face du silo.

Dimensionnement et construction

On a discuté jusqu'ici de plusieurs détails tactiques pour assurer une bonne conservation des ensilages en silos couloir. La principale décision stratégique est de bien estimer les dimensions. Le volume entreposé dépend des besoins alimentaires du troupeau. Les estimations devraient être basées sur la MS qui sert au calcul des rations. La première étape consiste à bien établir les besoins d'ensilage sur la ferme. Le tableau 4 donne un exemple de calcul des besoins d'ensilage sur une ferme laitière. Les hypothèses de calcul considèrent une production moyenne de 45, 30 et 15 kg de lait/jour pour les groupes 1, 2 et 3, respectivement. Sur une base annuelle, on servira ainsi 366 t MS de fourrages (1003 kg/j x 365 j/an).

Pour dimensionner les besoins d'entreposage, il faut tenir compte des pertes. Elles sont estimées entre 13 et 15 % dans les silos couloir (Savoie et Jofriet, 2003). De plus, Holmes et Muck (2004) suggèrent d'ajouter 5 à 10 % de pertes à la mangeoire. Il est prudent de supposer des pertes totales de 25 % pour estimer le volume d'entreposage nécessaire. Dans l'exemple du tableau 4, on devrait donc prévoir entreposer 488 t MS de fourrage par année.

Tableau 4. Exemple d'estimation des besoins fourragers sur une ferme laitière avec 60 vaches en lactation.

	Nombre d'animaux	RTM consommée (kg MS/j)	Fourrages (kg MS/j)	% fourrages
Groupe 1	20	509	168	33,0
Groupe 2	20	420	197	47,0
Groupe 3	20	293	196	67,0
Vaches tarries	10	127	102	80,0
Génisses	50	425	340	80,0
Total	120	1774	1003	56,6

Le tableau 5 illustre les étapes à suivre pour dimensionner les cellules d'un silo couloir. Le tableau 6 présente un exemple de calcul. Plusieurs combinaisons sont possibles. Pour une entreprise avec une centaine d'animaux, il est généralement satisfaisant de limiter la hauteur d'ensilage à 2,4 m (8 pi). De même, sur des fermes de cet ordre de grandeur, on suggère généralement une longueur de 30 à 36 m (100 à 120 pi) pour ne pas passer trop de temps à avancer et reculer dans les cellules. Dans l'exemple du tableau 6, on trouve un choix entre deux cellules de 13,7 m (45 pi), trois cellules de 8,5 m (28 pi) et quatre cellules de 6,1 m (20 pi). La longueur est ajustée pour correspondre au volume.

Tableau 5. Étapes à suivre pour dimensionner les cellules d'un silo couloir

Étape		Valeurs numériques	
1	Estimation de la masse de fourrage à entreposer, incluant les pertes (t MS/an)		
2	Hypothèse sur la densité (normalement entre 200 et 300 kg MS/m ³)		
3	Estimation du volume à entreposer (m ³)		
4	Choix d'une longueur de silo (généralement entre 30 et 45 m)		
5	Calcul de la section totale (m ²)		
6	Estimation de la largeur totale (m) pour diverses hauteurs usuelles d'ensilage	H = 1,8 m H = 2,4 m H = 3,0 m H = 3,6 m H = 4,2 m H = 4,8 m	Larg. tot. = Larg. tot. = Larg. tot. = Larg. tot. = Larg. tot. = Larg. tot. =
7	Choix du nombre de cellules et de la largeur de chaque cellule selon la largeur totale		
8	Ajustement de la longueur des silos pour avoir des largeurs compatibles avec les toiles de polyéthylène (tableau 3)		
9	Vérification de l'hypothèse de densité (étape 2 et figures 1 et 2); recalculer au besoin les étapes 3 à 7		

Tableau 6. Exemple de dimensionnement des cellules d'un silo couloir

Étape		Valeurs numériques	
1	Estimation de la masse de fourrage à entreposer, incluant les pertes (t MS/an)	488 t MS	
2	Hypothèse sur la densité (normalement entre 200 et 300 kg MS/m ³)	225 kg MS/m ³	
3	Estimation du volume à entreposer (m ³)	2170 m ³	
4	Choix d'une longueur de silo (généralement entre 30 et 45 m)	36 m	
5	Calcul de la section totale (m ²)	60,3 m ²	
6	Estimation de la largeur totale (m) pour diverses hauteurs usuelles d'ensilage	H = 2,4 m H = 3,0 m	Larg. tot. = 25,1 m Larg. tot. = 20,1 m
7	Choix du nombre de cellules et de la largeur de chaque cellule selon la largeur totale	Avec H = 2,4 m, on peut considérer : 2 cellules de 12,6 m (41 pi) 3 cellules de 8,4 m (27 pi) 4 cellules de 6,3 m (21 pi)	
8	Ajustement de la longueur des silos pour avoir des largeurs compatibles avec les toiles de polyéthylène (tableau 3)	2 cell. 13,7 × 33,0 m (45 × 108 pi) 3 cell. 8,5 × 35,5 m (28 × 116 pi) 4 cell. 6,1 × 37,1 m (20 × 122 pi)	
9	Vérification de l'hypothèse de densité (étape 2 et figures 1 et 2); recalculer au besoin les étapes 3 à 7	Avec du maïs-ensilage contenant 30 % de grain ou plus, ou de l'herbe plus sèche que 70 % TEE, la densité devrait > 225 kg MS/m ³ (Fig. 1 et 2)	

Un facteur à considérer est le ratio largeur/hauteur qu'on veut supérieur à au moins 2,5. Ici, les trois combinaisons satisfont ce critère. Le producteur aura alors à considérer le nombre de récoltes qu'il fait chaque année. S'il est dans une zone climatique avec trois récoltes d'herbe et une récolte de maïs, il pourrait préférer quatre cellules, ce qui donnera plus de souplesse et le temps de vider chaque cellule avant de la remplir à nouveau. S'il est dans une zone climatique où il y a seulement deux récoltes d'herbe par année sans maïs, deux ou trois cellules seraient alors suffisantes.

Plusieurs autres facteurs doivent être considérés lors de la construction : l'emplacement du silo, le type de plancher (béton ou asphalte), la longueur de la dalle de circulation devant les cellules, le type de murs, l'égouttement de la pluie et des lixiviats. La figure 13 montre quelques principes élémentaires comme une pente minimale de plancher de 1,5 %, une bande engazonnée pour le drainage de la pluie et la possibilité d'une gouttière et une citerne de captage si on prévoit des lixiviats abondants. Le captage des écoulements peut être nécessaire dans les zones climatiques humides et fraîches, en particulier si on fait du maïs ensilage dont la TEE est supérieure à 70 %. On recommande de consulter un spécialiste et des ouvrages techniques comme les plans du ministère (Dubreuil *et al.*, 2004).

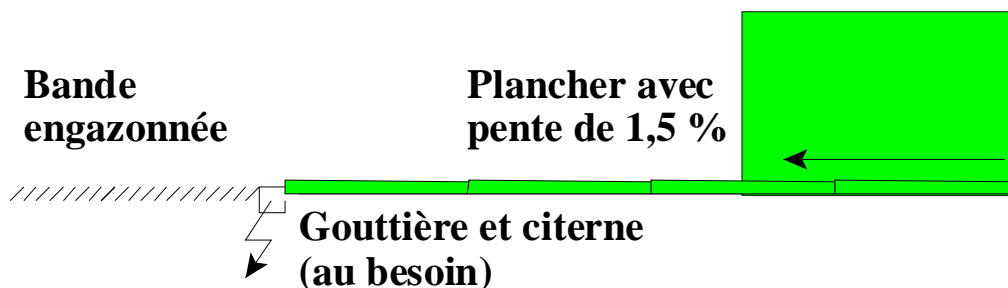


Figure 13. Schéma de l'avant du silo couloir, avec un plancher en pente pour évacuer la pluie et les lixiviats à l'avant, une bande engazonnée devant la dalle de circulation, et une gouttière et une citerne de captage si la bande engazonnée est près d'un cours d'eau.

Masse entreposée

Quand le silo est rempli ou partiellement vidé, on peut vouloir déterminer la quantité de MS disponible afin de planifier les futures rations. En principe, il suffit de multiplier le volume d'ensilage par la densité de MS. Le calcul paraît simple mais l'estimation du volume et, en particulier, de la densité réelle exige beaucoup d'attention.

Pour un silo plein, on peut obtenir une approximation du volume d'ensilage en mesurant les paramètres suivants à la figure 14 : hauteur maximale du dôme d'ensilage (H_2), hauteur de l'ensilage au haut de la pente (H_1), longueur du silo avant la pente (L_2), longueur horizontale de la pente (L_1) et la largeur du silo (l). Le volume total de l'ensilage (m^3) est la

somme des deux volumes partiels, V_2 à l'intérieur du silo et V_1 à l'avant du silo. Il est utile de distinguer ces deux volumes partiels, car leur densité moyenne est différente.

$$V_1 = L_1 \left(\frac{H_1}{2} \right) l \quad (1)$$

$$V_2 = L_2 \left(\frac{H_1 + H_2}{2} \right) l \quad (2)$$

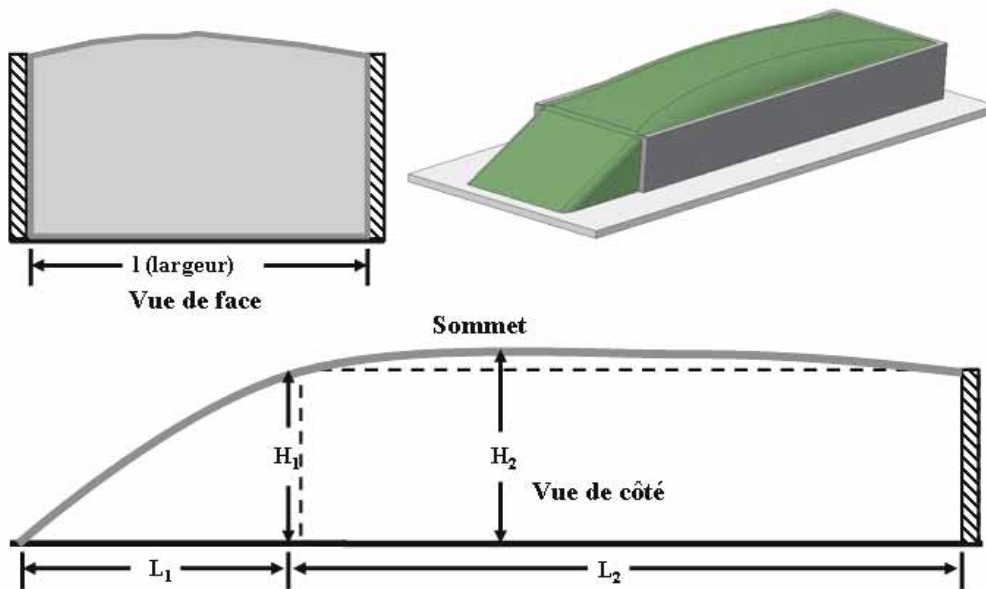


Figure 14. Vue de face et de côté d'un silo couloir remplie d'ensilage.

Pour un silo partiellement vidé (figure 15), la méthode de calcul est semblable au silo plein. La longueur de la pente (L_1) est parfois négligeable si la face de reprise est nette et presque verticale. On peut utiliser les mêmes équations (1) et (2) pour le silo partiellement vidé.

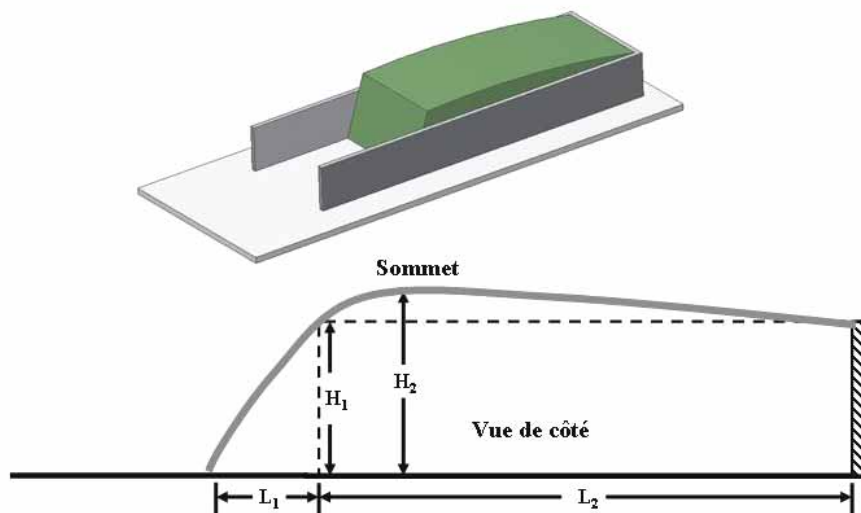


Figure 15. Vue de côté d'un silo couloir partiellement vidé.

Un autre paramètre à déterminer est la TEE de l'ensilage ou la concentration de MS (% MS). En effet, la TEE varie à l'intérieur des silos. Selon les études déjà citées de D'Amours et Savoie (2004a; 2005a), la TEE moyenne dans 13 silos différents a varié de 56 à 77 % pour du maïs ensilage et de 55 à 68 % pour de l'herbe. La TEE pouvait passer de 50 à 75 % à l'intérieur d'un même silo. Il est donc conseillé de prendre plusieurs mesures pour avoir une meilleure estimation.

Le dernier paramètre à déterminer est la densité de l'ensilage en base sèche. La plage habituelle est de 160 à 320 kg MS/m³ (10 à 20 lb/pi³) selon le type de récolte et le taux de compactage, tel que discuté précédemment et illustré aux figures 1 et 2.

La détermination exacte du pourcentage de grain dans l'ensilage est une procédure laborieuse. Il faut prendre plusieurs échantillons, séparer les grains du reste de la plante, sécher chaque fraction à l'étuve et les peser. Une façon simplifiée d'estimer le pourcentage de grain (% Grains) est basée sur la composition chimique de l'ensilage. Selon le National Research Council des É.-U. (Nutrient Requirements of Dairy Cattle, 2001), les grains de maïs ont une énergie nette de lactation (ÉNL) qui peut varier entre 1,96 et de 2,04 Mcal/kg (selon qu'ils sont broyés ou non, secs ou humides). Les tiges de maïs ont une ÉNL de 1,11 Mcal/kg. De façon approximative, le pourcentage de grain est estimé comme suit :

$$\% \text{ Grains} = \left(\frac{\text{ÉNL} - 1,11}{2,04 - 1,11} \right) 100\% \quad (3)$$

Pour l'ensilage d'herbe, deux facteurs expliquaient en grande partie les différences de densité : la TEE et l'indice de compaction (de 0,7 à 1,0 t_{tracteur}/t_{herbe-MS/h}). Cet indice est le rapport entre la masse du tracteur de compaction et le taux de récolte (par exemple, un tracteur pesant 5,6 t avec un chantier récoltant de 8 t MS/h donne un indice de 0,7 t/t/h). La figure 2 permet de prédire la densité moyenne compactée pour des TEE entre 60 et 70 % et un indice de compaction entre 0,7 et 1. En dehors de ces plages, l'estimation est moins précise. On devrait utiliser la densité la plus faible sur la figure 2 à la limite des facteurs.

Pour les fermes possédant un système de ration totale mélangée (RTM) avec une balance, il est possible d'obtenir une bonne estimation de la densité moyenne. Il suffit de peser la masse d'ensilage prélevée durant une période déterminée, de mesurer le profil de la section, la distance linéaire d'ensilage repris le long des murs du silo et la TEE moyenne.

$$\rho_{b.s.} = \left(\frac{M_p}{V_p} \right) \left(\frac{\%MS}{100\%} \right) \quad (4)$$

$\rho_{b.s.}$ = densité de l'ensilage sur une base sèche (kg MS/m³);

M_p = masse totale d'ensilage prélevée, sur une base humide (kg)

V_p = volume prélevé (largeur × longueur moyenne × hauteur moyenne, m³)

%MS = pourcentage de matière sèche

Par exemple, on a prélevé 21 000 kg (humide) d'ensilage pendant 7 jours, sur une distance de 1,2 m (environ 170 mm/jour). Le silo a une largeur de 10 m et une hauteur moyenne de 3,66 m. Cela fait un volume prélevé de 43,92 m³. Si le % de MS est de 45 %, la densité est de 215 kg MS/m³.

Une fois les paramètres précédents déterminés, on estime la masse totale dans le silo ($M_{\text{tot.}}$) en multipliant la masse volumique sèche de l'ensilage par le volume correspondant. Pour plus de précision, on devrait estimer deux densités distinctes, l'une pour le volume intérieur (V_2), l'autre pour le volume devant le silo (V_1). La hauteur appropriée à utiliser pour l'estimation de la densité du maïs (figure 3) est $(H_1+H_2)/2$ dans le cas de V_2 et $(H_1/2)$ dans le cas de V_1 . Dans un silo d'herbe ou dans un silo de maïs partiellement vidé, on peut supposer que la densité sèche devant le silo ρ_1 est environ la moitié de la densité non perturbée (ρ_2) par la reprise.

$$M_{\text{tot.}} = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 \quad (5)$$

Conclusions

Plusieurs travaux de recherche récents donnent des renseignements pour améliorer la régie des silos couloir. Plusieurs recommandations basées sur d'autres travaux plus anciens mettent en perspective ces résultats pour guider les producteurs qui veulent construire des silos couloir ou améliorer l'utilisation de silos déjà existants.

En planifiant adéquatement la construction des silos couloir et en instaurant des bonnes pratiques de remplissage, de couverture et de reprise, il est possible de limiter les pertes de matière sèche. L'entreposage des ensilages en silos couloir peut s'avérer un bon choix pour de nombreuses fermes laitières.

Références

- Amyot, A., P. Denoncourt, B. Ouattara, M. Lacroix et P. Savoie. 2003. Effet de deux bioenrobages sur la qualité de l'ensilage de fléole des prés (*Phleum pratense* L.) récoltée en mi-été. *Agrosol* 14(1):29-46.
- ASABE. 2006. Moisture measurement – forages. Standard S358.2. American Society of Agricultural and Biological Engineers, St. Joseph, MI: ASABE.
- Bodman, G.R. et B.J. Holmes. 1997. Managing and designing bunker and trench silos. *Agricultural Engineers Digest AED* 43, MidWest Plan Service, Ames, IA.
- Cormier, É., H. Joannis et P. Savoie. 2007. Electronic estimation of hay moisture content: precision and accuracy. ASABE Paper no. 071024. Presented at the ASABE Annual International Meeting in Minneapolis, MN, June 17-20. St. Joseph, Mich.: ASABE.

- CRAAQ. 2006a. Ensilage de foin en silo couloir. Références économiques, AGDEX 732/821w. Sur le site : <http://www.craaq.qc.ca/ReferencesEconomiques>
- CRAAQ. 2006b. Ensilage de foin en silo meule. Références économiques, AGDEX 732/821s. Sur le site : <http://www.craaq.qc.ca/ReferencesEconomiques>
- D'Amours, L. et P. Savoie. 2004. Density profile of corn silage in bunker silos. ASAE Paper No. 041136. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- D'Amours, L. et P. Savoie. 2005a. Density profile of herbage silage in bunker silos. ASAE Paper No. 051051. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- D'Amours, L. et P. Savoie. 2005b. Density profile of corn silage in bunker silos. Canadian Biosystems Engineering / Le génie des biosystèmes au Canada. 47:2.21-2.28.
- D'Amours, L., P. Savoie et R. Thériault. 2006. Densité et pertes de matière sèche dans les silos couloir. Affiche 12. Présentée le, 30 mai 2006. Forum technologique Novalait, Bécancour, Québec.
- Dubreuil, L., M. Dussault, J. Rodrigue et H. Bernard. 2004. Silo couloir. Plans 70450. Publication 2004-07, Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec.
- Holmes, B.J. et R.E. Muck. 2004. Managing and designing bunker and trench silos. Agricultural Engineers Digest AED 43, 2nd Edition. MidWest Plan Service, Ames, IA.
- Holmes, B.J. et R.E. Muck. 2005. Bunker silo density calculator and documentation. Sur le site : <http://www.uwex.edu/ces/crops/uwforage/storage.htm>
- Joannis, H. et P. Savoie. 2006. Mesure de la teneur en eau des ensilages. Affiche 13. Présentée le 30 mai 2006. Forum technologique Novalait, Bécancour, Québec.
- Joannis, H., P. Savoie et D. Grenier. 2005. Electrical resistance of high moisture chopped alfalfa. Transactions of the ASAE, 48(6): 2363-2369.
- Ruppel, K.A., R.E. Pitt, L.E. Chase et D.M. Galton. 1995. Bunker silo management and its relationship to forage preservation on dairy farms. Journal of Dairy Science 78:141-153.
- Savoie, P. et J.C. Jofriet. 2003. Silage Storage. Chapter 9 *dans* Silage Science and Technology - Agronomy Monograph 42: 405-467. D.R. Buxton, R.E. Muck and J.H. Harrison, editors. Amercian Society of Agronomy, Madison, WI.
- Savoie, P., A. Amyot et R. Thériault. 2002. Effect of moisture content, chopping, and processing on silage effluent. Transactions of the ASAE 45(4):907-914.
- Savoie, P., M. Bernier-Roy, M.-L. Pedneault et A. Amyot. 2003. Evaluation of apple pulp and peanut butter as alternative bunker silo covers. Canadian Biosystems Engineering 45:2.17-2.22.
- Savoie, P. et J.C. Jofriet. 2003. Silage Storage. Chapter 9 *dans* Silage Science and Technology - Agronomy Monograph 42: 405-467. D.R. Buxton, R.E. Muck and J.H. Harrison, editors. Amercian Society of Agronomy, Madison, WI.