

La conservation des ensilages : Nouvelles réalités, nouveaux outils

Par : Germain Lefebvre, agr. Agro-Bio Contrôle inc.

Collaboratrices : Carole Lafrenière, agr. PhD, UQAT. Brigitte Lapierre, agr. La Coop fédérée

1.0 Introduction

Les principes de conservation des ensilages d'herbes n'ont pas changé depuis que l'on pratique ce mode d'entreposage des fourrages. Ce qui a grandement changé au cours des 40 dernières années, c'est l'accroissement considérable de la dimension des fermes laitières et conséquemment des volumes d'ensilage récoltés sur chacune de ces fermes. Cette concentration de la production a laissé dans son sillage des fermes laitières, incluant les fermes ovines et caprines, avec des infrastructures d'entreposage souvent surdimensionnées ou sous-dimensionnées. On peut en dire autant de la production vache-veaux. Les règlements sur l'utilisation des fumiers sont également venus changer nos façons de faire pour la fumure organique sur les prairies. Si les principes demeurent, les pratiques, elles, doivent être adaptées.

Ce qui a changé également c'est une meilleure connaissance des phénomènes liés à la conservation des fourrages sous forme d'ensilage. On cherche, pas toujours avec succès, à contrôler, voire éliminer, les phénomènes indésirables et favoriser les bons. Les techniques et les additifs ont toujours eu comme objectif, de conserver ce qu'on a entreposé. On propose maintenant des additifs pour que le fourrage fermenté ait une meilleure valeur nutritionnelle que le fourrage récolté. Autrement dit, l'objectif qui était de faire d'un bon ensilage un meilleur ensilage serait de faire d'un bon fourrage un meilleur fourrage. Ceci n'est pas insignifiant.

2.0 Caractéristiques d'un bon ensilage

Maintenir la valeur nutritionnelle des fourrages ensilés et minimiser les pertes de matière sèche et d'énergie nécessite de restreindre la respiration des plantes, la protéolyse, l'activité des *Clostridium*, et d'empêcher la multiplication des levures et des moisissures (Muck, 1988). Selon Undersander (2014), que l'on fasse du foin ou de l'ensilage, on ne peut rendre le fourrage meilleur que ce que l'on a fauché. Le mieux que l'on peut faire est de restreindre les pertes quantitatives, mais surtout qualitatives. Pour ce faire, il faut atteindre rapidement le pH de stabilité anaérobie, soit le pH au-delà duquel tous les microorganismes sont inhibés ou détruits. L'ensilage est stable, ça ne veut pas dire qu'il ne s'y passe rien.

Dans les dernières années, nous avons mis beaucoup l'accent sur la stabilité aérobie des ensilages et la digestibilité de la fibre NDF (fibre détergent neutre). Les concepts de la récolte en un jour, ou de la fauche en fin de journée, pour profiter de teneur en sucres plus élevée, ont aussi été introduits. Il faut bien accrocher ces objectifs et ces concepts aux principes qui régissent la conservation des ensilages d'herbe.

L'ensilage d'herbe c'est une fermentation visant l'atteinte du pH de stabilité anaérobie, ce qui assurera le contrôle des microorganismes indésirables et le maintien de la valeur nutritionnelle du fourrage. Le tableau 1 donne les caractéristiques d'un bon ensilage d'herbe et une compilation d'analyses de la récolte 2014 pris au hasard -Région # 1 Est N=31 Région # 2 Ouest N=39

Tableau 1. Les principales caractéristiques d'un bon ensilage d'herbe et les moyennes de 70 analyses d'ensilages réalisés au Québec en 2014. Toutes les analyses ont été réalisées par le même laboratoire avec la technologie infrarouge.

Paramètre fermentaire	Valeur pour un bon ensilage	Moyennes des échantillons QC 2014 Silo tours / balles enrobées
pH	4,0 à 5,5 selon la teneur en matière sèche, l'espèce ensilée et le type de silo.	
Teneur en matière sèche (% MS)	Graminées : 30 % et + selon type de silos. Légumineuses : 35 % à 40 % et + selon type de silos.	45,01 %/ 50,83 % [min, max] des échantillons : [26 %, 69 %] / [35 %, 73 %]
Température	Maximum 10°C au-dessus de la température ambiante au début avec décroissance par la suite.	
Acide lactique (% MS)	2 % à 8 %	4,17 % / 2,04 %
Acide acétique (% MS)	1 % à 2 % (maximum 3,5 %)	0,88 % / 0,49 %
Proportion acide lactique/acide totaux	70 %	80 % / 79 %
Acide butyrique (% MS)	0,0 %	0,17 % / 0,05 % Silo tours : 39 % des échantillons ont plus de 0,1 % Balles enrobées : 25 % des échantillons ont plus de 0,1 %
Protéines solubles	55 % à 60 %	54,3 %/ 50,1 %
Cendres (% MS)	Graminées : 8 % Légumineuses : 10 %	9,51 % / 9,62 % Silo tours : 38 % des échantillons ont plus de 10 % Balles enrobées : 30 % des échantillons ont plus de 10 %
Levures	Moins de 100 000 UFC/g d'ensilage	
Moisissures	Moins de 100 000 UFC/g d'ensilage	
N-NH ₃ (% N-total)	moins de 5 % (maximum 10 %).	6,77 % / 3,73 % Silo tours : 28 % des échantillons ont plus de 8 % Balles enrobées : 10 % des échantillons ont plus de 8 %
Alcool (% MS)	moins de 0,5 %.	
autres Composés organiques volatils (COV)	le moins possible.	

Ce tableau est adapté de Richardt (2012) et Mahanna et Chase (2003).

3.0 Faire un bon ensilage : quels sont les facteurs importants?

3.1 L'ensilabilité

Les trois principaux facteurs qui régissent l'ensilabilité sont le pouvoir tampon, le taux de matière sèche et le taux de sucre au moment de la mise en silo. Weissbach et Auerbach (2012) expriment ces facteurs avec un indice d'ensilabilité qui se définit par la facilité à atteindre le pH de stabilité anaérobie. De façon simplifiée, plus le taux de sucre est élevé et le pouvoir tampon faible, plus il est facile d'atteindre le pH de stabilité. Lorsque le pouvoir tampon augmente et la teneur en sucres diminue, la matière sèche doit être plus élevée au moment de la mise en silo, et encore plus pour les balles enrobées parce que les sucres sont moins disponibles du fait que les fourrages ne sont pas hachés ou du moins comme ceux récoltés avec la fourragère. L'utilisation de couteaux hacheurs contribue à augmenter la densité, et peut rendre les sucres plus disponibles aux bactéries lactiques (BAL), et favoriser une meilleure fermentation.

Tableau 2. Ensilabilité naturelle de quelques espèces végétales ¹

Espèces végétales	Sucres solubles (% MS)	Pouvoir tampon (m.éq. /100 g MS)
Fléole	8-10	265
Dactyle	8-10	335
Ray-grass	12-20	370
Céréales en vert	Gonflement 20 Laiteux 14	Gonflement 65 Laiteux 17
Luzerne	8-10	470
Trèfle rouge	10	350

¹ Adapté de McDonald et coll. 1991.

Le taux de sucre est influencé par l'espèce, le stade de maturité, l'heure de la fauche, la coupe (1^{re} coupe vs 2^e coupe). Les écarts peuvent être importants. Les teneurs en sucres sont plus élevées en fin de journée, en conditions ensoleillées et par température fraîche. Pour la luzerne au stade début floraison, Amyot (2004) a mesuré des teneurs en sucre élevées en 1^{re} coupe (8 %), moyennes en 2^e coupe (5 %) et très élevées en 3^e coupe (13 %).

3.2 De la fauche à l'atteinte de la stabilité anaérobie : interactions entre la physiologie et microorganismes présents sur la plante

Dès que la plante est fauchée, les mécanismes biologiques s'enclenchent et ils génèrent des pertes de matière sèche et de valeur nutritionnelle:

- La protéolyse. Les enzymes protéolytiques transforment les protéines en acides aminés ce qui en diminue la valeur nutritionnelle.
- La respiration cellulaire. Il y a consommation des sucres, qui résulte en une perte d'énergie et de substrat pour la fermentation. Il s'agit aussi d'une perte de matière sèche.
- Les entérobactéries se multiplient de façon importante lorsque le séchage est lent.

Pour court-circuiter ces phénomènes destructeurs, la technique de récolte en un jour a été développée. Cette approche, qui repose sur des pratiques qui vont accélérer la vitesse de séchage, exige des changements dans l'exécution du chantier d'ensilage :

- fauche en andains larges
- regroupement d'andains pour la récolte.

L'objectif est de minimiser les pertes de sucres par respiration cellulaire en accélérant le séchage. À cet égard, il est logique de faucher en matinée. Le rythme de la respiration cellulaire diminuant avec l'augmentation de la teneur en matière sèche (Moser, 1995).

Pour tirer avantage de ces concepts, il faut l'équipement et l'organisation de chantier approprié. Il ne faut pas perdre de vue que la teneur en matière sèche lors de la mise en silo doit être suffisamment élevée pour atteindre le pH de stabilité anaérobie, et éviter l'écoulement de jus. Il faut savoir attendre au lendemain si le taux de matière sèche requis n'est pas atteint. À l'opposé, l'étalement de la récolte peut augmenter le rythme de séchage au-delà de la capacité du chantier, et en conséquence, un ensilage trop sec.

3.3 Éviter la contamination des plantes qui seront ensilées

Pour éviter la contamination, il est recommandé de faucher à une hauteur de 8 à 10 cm et de ne pas circuler sur les andains lors de la fauche. Lors du regroupement des andains il faut éviter de ramasser des débris et de la terre, source de contamination pour les entérobactéries et les spores de *Clostridium*. La contamination de la récolte avec du sol se mesure par la teneur en cendres. Une teneur en cendres élevée et la contamination par les résidus des récoltes précédentes augmentent le risque d'avoir un ensilage instable et mal fermenté (Richardt, 2012). Il en va de même pour les fumures organiques. L'idéal est d'éviter d'épandre des lisiers ou purins durant la saison sur les prairies destinées à l'ensilage. Des doses modérées, immédiatement après la fauche peuvent toutefois être appliquées sans nuire à la qualité de la conservation. L'application après la dernière coupe est à recommander. Le fumier solide est à proscrire (Jokela, 2014).

3.4 La bonne teneur en matière sèche pour le type de silo : pourquoi, est-ce important?

L'eau contenue dans le fourrage ensilé joue un rôle pivot pour la conservation de l'ensilage par son influence sur la densité (exclusion de l'air), sur la fermentation et les phénomènes affectant la valeur nutritionnelle du fourrage. À toutes fins utiles, la teneur en matière sèche doit être suffisamment élevée pour qu'il n'y ait pas écoulement de jus et permettre d'atteindre le pH de stabilité anaérobie, et suffisamment basse pour limiter la porosité de la masse ensilée. Ces limites dépendent du type et de la dimension des cellules d'entreposage (silo).

Tableau 3. Teneur en matière sèche (%) recommandée selon le type de silo et l'espèce ensilée¹

Espèce	Maturité	Couloir / Silo presse ²	Tour, vidage par le haut ³	Atmosphère contrôlée	Balles enrobées ⁴
Luzerne	Boutons / premières fleurs	35/40	35/45	40/50	50
Trèfle	¼ à ½ en fleurs	35/40	35/45	40/50	50
Graminées	1 ^{re} apparition des épis	30/35	30/45	40/50	40/50
Sorgho-Herbe du Soudan	1 mètre de hauteur	30	30/35	40/50	-----
Céréales en vert	fin gonflement	30/35	32/37	40/50	40/50

¹ Adapté de Mahanna et Chase (2003).

² Teneur en matière sèche la plus élevée dans le bas du silo, la plus basse dans le haut, idéalement le silo est rempli dans la même séquence.

³ Pour les silos tours de hautes dimensions (24 mètres de hauteur), la teneur en matière sèche devrait être tout juste suffisamment élevée dans la partie inférieure afin de prévenir l'écoulement de jus (lexiviat). Il est donc recommandé d'avoir une teneur en matière sèche de 50 % dans le bas du silo et de 30 % sur le dessus, lorsque le silo est rempli en une seule séquence (Pitt 1990, cité par Amyot 2003).

⁴ Lorsque la teneur en matière sèche excède 65 %, il n'y a pratiquement pas de fermentation. Il s'agit, en pratique, de foin humide conservé en absence d'air. Par contre, les levures et moisissures peuvent se développer. La densité des balles et l'intégrité du film d'enrobage sont alors les seules défenses contre le développement de ces microorganismes.

Si la fermentation lactique est l'essence même d'un ensilage de qualité, celle-ci ne sera efficace que si le fourrage ensilé est exempt d'air (sans oxygène) dans un délai de moins de 12 heures après la récolte. Ces conditions anaérobies doivent être maintenues jusqu'à l'alimentation. L'air doit disparaître de la masse ensilée et la réintroduction d'air évitée. L'eau contenue dans le fourrage occupe de l'espace et constitue une proportion importante du poids de l'ensilage, d'où son influence sur la consolidation de la masse ensilée.

La pression osmotique (disponibilité de l'eau pour les bactéries) dicte quelles bactéries domineront et l'ampleur de leurs effets. Trop humide, on risque de ne pas atteindre le pH de stabilité anaérobie, entraînant la production d'acide butyrique en plus de favoriser la protéolyse. Trop sec, il sera difficile d'atteindre une densité suffisamment élevée pour exclure l'air. Il y aura du chauffage, ce qui favorise les levures (production d'alcool), les moisissures, etc. et nuit à la fermentation lactique à cause de l'épuisement des sucres. Si la température excède 40 °C, il y aura caramélisation et les protéines seront liées à la fibre.

Durant la période d'entreposage, la lente introduction d'air dans l'ensilage peut être suffisante pour le développement de certaines levures. Les composés organiques volatiles (COV), souvent très odorants, peuvent se former et nuire à la consommation (Mitloehner, 2009). Ce qui est important de comprendre c'est que plus la teneur en matière sèche sera élevée, plus la force exercée pour compacter l'ensilage devra être grande, ce qui n'est pas toujours possible.

3.4.1 DENSITÉ et type de silos

On réfère à la porosité pour apprécier la densité de l'ensilage. Il existe une bonne corrélation entre la porosité et la diffusion de l'air dans l'ensilage, on a établi qu'une porosité de 400 (0,4 % de l'espace est constitué de pores) permet de limiter la diffusion de l'air de façon satisfaisante (Holmes et Bolsen, 2009). Ceci correspond à une densité de 700 kg matière humide (MH)/m³. Cette appréciation de la densité est beaucoup plus juste que l'utilisation de la règle de 14,5 livres, MS/pi³ (230 kg MS/m³).

Silos horizontaux : Qu'il s'agisse de silos couloirs ou de silos meules la même règle s'applique quant au poids du tracteur utilisé pour compacter l'ensilage : il faut de 0,7 à 1 tonne de poids de tracteur par tonne de matière sèche récoltée par heure.

Silos tours : La référence de 700kg MH/m³ de densité, établie pour les silos horizontaux, est certainement valide pour les silos tours. Or, on sait qu'en silo tour, la densité de l'ensilage des derniers 3 mètres, et souvent davantage, est de beaucoup inférieure à 700 kg/m³ (CRÉAQ agdex #732). C'est une situation qu'il faut gérer. Autre caractéristique des silos tours, le mode de distribution lors de la mise en silo n'est pas toujours garant d'une densité uniforme. Souvent il y aura ségrégation des particules ou encore des avalanches résultant en des zones de faible densité. Il y a certainement place pour amélioration à cet égard.

Balles enrobées : Comme pour les ensilages hachés, plus la densité des balles enrobées sera élevée moins l'air pourra s'y infiltrer. Amyot et coll. (1995) ont obtenu des densités 150 à 190 kg MS/m³ pour les balles rondes pressées à des teneurs en matière sèche de 35 % à 80 %). Pour les grosses balles carrées, il y a peu de données, mais on devrait viser au moins 240 kg MS/m³. L'utilisation de couteaux hacheurs contribue à augmenter la densité. Trop souvent, les balles ne sont pas suffisamment denses. En plus de compromettre la conservation due à la lente diffusion de l'air dans la balle il y aura plus de balles à enrober, donc plus de plastique, on est pénalisé deux fois.

Les silos presses : Confectionner un silo presse de densité élevée et uniforme n'est pas toujours facile avec les ensilages d'herbe. Il est fréquent de voir des « *dos de chameau* » sur les parois des tubes d'ensilage d'herbe. Des vides importants se forment entre ceux-ci et dès que le sac sera ouvert, l'air va se faufiler, souvent très loin, provoquant un développement important de moisissures accompagné d'une élévation de la température de l'ensilage (Maack, 2009). L'utilisation d'une sortie allongée sur la presse contribue à diminuer ce problème. Le représentant du manufacturier sera en mesure de bien conseiller l'utilisateur pour solutionner ce problème.

3.4.2 Étanchéité : Couvrir le silo et maintenir l'étanchéité.

Si la fermentation lactique est efficace, que le pH de stabilité anaérobie est atteint rapidement, c'est le maintien des conditions anaérobies jusqu'à l'utilisation pour l'alimentation qui assure la conservation à long terme.

Silos horizontaux :

L'utilisation d'un film de plastique sur les murs, rabattu sur l'ensilage, et d'un film barrière d'oxygène sous la bâche de polyéthylène sur la surface a démontré leur efficacité pour limiter l'infiltration d'air et d'eau. Dans trois expériences en silos horizontaux, on a comparé le recouvrement avec une bâche de polyéthylènes conventionnels et le recouvrement avec un film barrière d'oxygène de 45 microns sous la bâche. Les pertes de matière organique dans les premiers 45 cm ont été réduites de 21 %, 31 %, 54 % respectivement pour chacun des essais lorsque le film « barrière d'oxygène » était utilisé (Holmes et Bolsen, 2009). Il est important de rappeler que le recouvrement avec le plastique ne sera efficace que s'il est bien lesté et les joints bien étanches.

Silos tours :

S'assurer que les murs de béton soient bien plâtrés, pas détériorés par les jus d'ensilage et que les portes soient en excellent état. Lorsque l'ensilage n'est pas utilisé immédiatement après la mise en silo une bâche étanche doit être installée et bien lestée en assurant un joint étanche avec la paroi du silo.

Balles enrobées :

De par leur format et le mode de confection avec des brins longs, l'étanchéité revêt un caractère particulier avec les balles enrobées :

- Le ratio entre la surface de parois (le film étirable) et le poids d'ensilage est plus de 25 fois plus élevé que pour un silo tour moyen.
- L'épaisseur (100 à 150 microns) et la résistance mécanique du film étirable n'a rien de comparable à une paroi de béton, c'est mince et fragile.
- Tout l'ensilage est à moins de 75 cm de la paroi.

Tout repose donc sur le film étirable qui doit avoir :

- D'excellentes propriétés mécaniques : étirement/perforation/durée (résistant aux UV).
- Un faible taux de transmission de CO₂/O₂.
- Excellente adhérence.
- Les balles doivent être manipulées avec une grande délicatesse.
- L'utilisation de filet pour attacher les balles rondes avant leur enrobage réduit la perforation du film par les tiges rigides de luzerne.

Tous les films n'ont pas les mêmes propriétés. McNally et coll. (2005), ont évalué les propriétés mécaniques et la perméabilité à l'oxygène de différentes formulations de LDPE (polyéthylène à faible densité) et de LLDPE (linéaire LDPE), qui sont les polymères utilisés dans les films d'enrobages. Ils concluent qu'il y a des écarts entre les différentes formulations. Plus récemment, Borreani et coll. (2009) ont évalué des films à faible transmission d'oxygène formulé avec de nouvelles molécules. La faible perméabilité du plastique à l'oxygène a permis de diminuer de façon importante les colonies de moisissures dans les balles enrobées, en comparaison avec les films conventionnels.

Pour les balles carrées, on veut une balle dense, aux arêtes bien droites et non cintrées. Les faces concaves laissent une chambre d'air. Pour les balles rondes, une géométrie parfaitement cylindrique et une densité uniforme sont essentielles. Une balle en forme de ballon de football ou de trapèze va compromettre l'étanchéité du film d'enrobage. Lorsqu'on voit une balle ronde se déformer après quelque mois d'entreposage, ou encore lorsqu'on ouvre une balle carrée et que les cordes ont un jeu de plus de 30 cm, conséquence de la force de rappel du film étirable qui a comprimé la balle de plus de 15 cm, c'est certainement un indice d'un manque de densité au moment du pressage. Pour les balles rondes enrobées individuellement, l'empilement sur les bouts est recommandé. Pour les balles carrées enrobées individuellement, l'empilement sur le côté concave est recommandé (TrioPlast, 1995). L'empilement des balles individuelles offre l'avantage de diminuer la surface exposée au soleil et d'en limiter le réchauffement.

Procéder à l'enrobage dans les 4 heures du pressage et les manipuler avec soins et sans délai font également partie des facteurs de succès.

Silos à atmosphère contrôlée :

Lorsque le taux de matière sèche est supérieur à 60 %, ce qui est souvent le cas dans ce type de silos, la fermentation est limitée. Le défi est de contrôler l'activité aérobie. Bien qu'ils soient en principe parfaitement étanches, ça ne veut pas dire qu'il n'y aura pas d'introduction d'air. D'abord, il faut procéder à la mise en silo en un court laps de temps et refermer immédiatement la porte du dessus du silo. Une fois rempli, les variations de pressions dues au réchauffement des parois entraînent des variations de volume de gaz qui sont plus grands que la capacité des « poumons ». Il y aura perte de CO₂ lors de journées chaudes et ensoleillées et introduction d'air au cours de la nuit. Jiang et Jofriet (cité par Savoie et Jofriet, 2003) ont mesuré des augmentations de température et de pression entraînant des variations de volumes de gaz pouvant excéder plusieurs fois la capacité des poumons. Moins il y a d'ensilage dans le silo et plus la variation de volume de gaz est importante.

Les silos presses :

Bien ajuster la tension de retenue lors de la confection du silo presse est certainement ce qui a le plus d'impact sur l'étanchéité du plastique. Un trop grand étirement et la capacité de rappel du plastique sera dépassée. Souvent, il n'y aura pas de rupture du plastique, mais il y a un amincissement qui va compromettre l'étanchéité. Comme pour les films d'enrobage, il ne faut pas exclure que les polymères utilisés par les manufacturiers aient des propriétés mécaniques et de transmission O₂/CO₂ qui leur sont propres. Des sacs qui gonflent, faut-il les percer pour laisser sortir la pression? Non, à moins d'appréhender que la capacité de rappel du plastique soit dépassée. Il faut les observer très fréquemment. Ce phénomène ne dure pas longtemps et le film va se rétracter.

3.5 L'importance d'une baisse rapide du pH et la stabilité anaérobie

Dès la mise en silo les entérobactéries sont très actives entraînant une production importante d'acide acétique, d'alcool, de CO₂ et possiblement d'azote ammoniacal (NH₃). Bien que leur activité soit utile pour réduire les nitrates en nitrites (Weissbach, 2012), il est important de limiter leur activité à quelques jours (Pahlow et coll., 2003). Les entérobactéries sont des bactéries anaérobies facultatives qui ne survivent pas à un pH acide. L'activité des enzymes protéolytiques décroît rapidement avec la diminution du pH.

Quoiqu'un peu plus tolérants que les entérobactéries, les *Clostridium*, le groupe de bactéries anaérobies le plus nuisible, sont également inhibés par le pH acide. Leur sensibilité à l'acidité augmente avec l'augmentation de la teneur en matière sèche de l'ensilage (tableau 4). Trois espèces sont couramment retrouvées dans l'ensilage, *C. tyrobutyricum* et *C. butyricum*, de type saccharolytique (fermentent également l'acide lactique) ainsi que *C. sporogenes*, de type protéolytique. Les *Clostridium* protéolytiques vont dégrader la protéine en ammoniac et ultimement produire des bioamines (odeur repoussante) nuisibles pour l'animal (Richardt 2012).

Les *Clostridium* saccharolytiques, sont plus souvent en cause lorsque le pH de stabilité anaérobie n'a pas été atteint. Ils vont fermenter les sucres résiduels, mais surtout l'acide lactique. Le pH remonte, l'acide butyrique étant moins acidifiant que l'acide lactique, il y aura remontée du pH. Autre nuisance, ils vont produire des endospores.

Conséquences du développement des bactéries butyrique dans l'ensilage:

- Perte d'énergie et de matière sèche.
- Odeur forte et très désagréable causant une baisse de la performance du troupeau par une diminution de l'ingestion.
- Les endospores de *Clostridium* se retrouvant inévitablement dans le lait, ils contaminent les fromages et rendent la maturation de certains fromages, impossible (Pahlow et coll., 2003).

Tableau 4. pH de stabilité anaérobie en fonction de la teneur en matière sèche de l'ensilage (CRAAQ, 2005)

Teneur en matière sèche (%)	pH de stabilité anaérobie théorique
20-25	< 4,2
25-30	< 4,4
30-35	< 4,6
35-40	< 4,8

4.0 Le contrôle de la stabilité aérobie : il faut y penser dès la mise en silo.

Il est d'une grande importance de ne pas confondre :

- *la détérioration aérobie*, qui se manifeste dès la mise en silo par un chauffage excessif et le développement de moisissures. Ce stade, souvent appelé stade #1, qui ne devrait pas excéder 24 heures, se prolonge souvent durant plusieurs semaines, ce qui entraîne des pertes considérables et empêche l'atteinte du pH de stabilité anaérobie.
- *la stabilité aérobie de l'ensilage*, qui est le court laps de temps où l'ensilage *stable* est exposé à l'air au moment de la reprise. La stabilité aérobie se définit par le temps requis pour une augmentation de la température de 2 °C à 3 °C selon les auteurs, par rapport à la température ambiante d'un ensilage exposé à l'air. Richardt (2012) suggère que cinq jours de stabilité aérobie est excellent pour de l'ensilage de graminées.

En début de fermentation, lorsque la température de la masse d'ensilage augmente de plus de 10 °C au-dessus de la température ambiante, pour une période de plus de quelques jours, la stabilité aérobie de cet ensilage est sérieusement compromise lors de la reprise. La mise en silo d'un fourrage exempt de terre et de débris organiques, une exécution rapide, un ensilage bien compacté et bien scellé sont des bonnes pratiques à mettre en œuvre pour assurer la stabilité aérobie (Richardt, 2012). Les additifs vont aider à améliorer la stabilité aérobie à ces seules conditions. Il est à souligner que la stabilité aérobie augmente avec la durée de l'entreposage.

L'ensilage de luzerne (et probablement de trèfle rouge), une fois fermenté, est généralement très stable. Le faible développement des levures dans l'ensilage de luzerne exposé à l'air en est un bon indice. L'expérience démontre que des composés inhibiteurs du développement des levures, dont on n'a pas réussi à en identifier la nature, se forment lors de la fermentation de l'ensilage de luzerne (figure 1)(Muck, 1988; Palhow et coll., 2003). Une expérience réalisée par Muck et O'Kiely (1992) (cité par Pahlow et Muck 2009) en fait une démonstration éloquent. Les chercheurs ont mélangé de l'ensilage de luzerne avec de l'ensilage de maïs, dans un rapport 1:1 ce qui a permis de ralentir le développement des levures dans l'ensilage de maïs (figure 1).

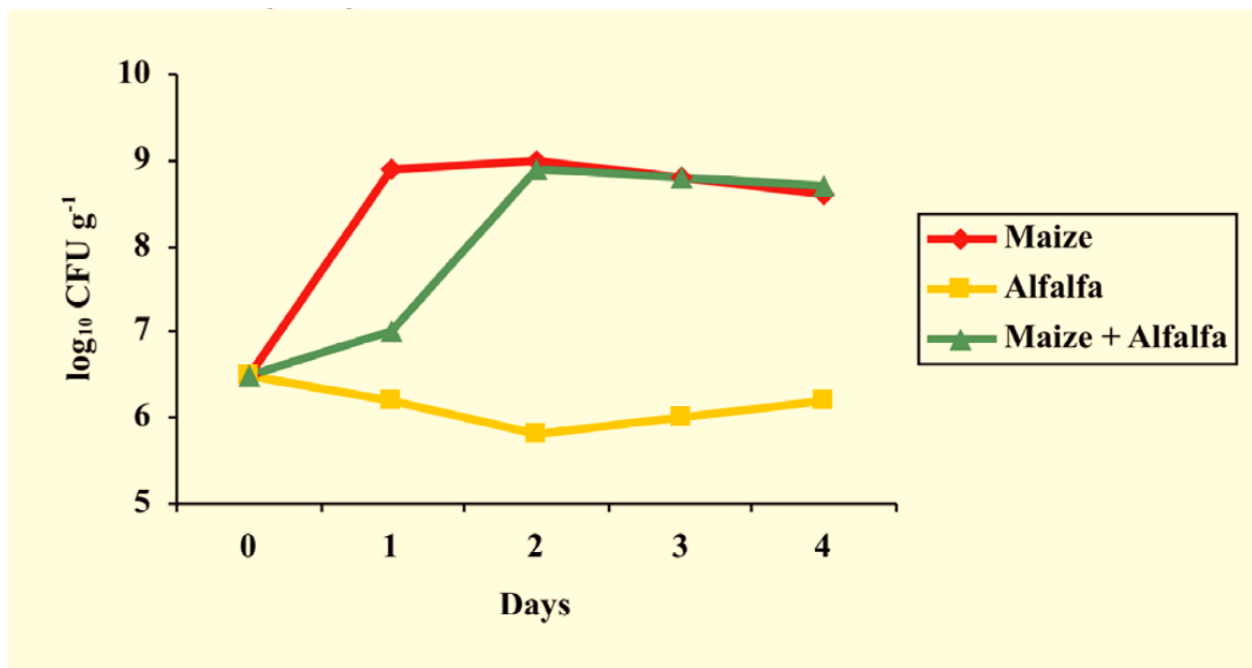


Figure 1 Patterns of change in yeast count in maize and alfalfa silage exposed to air (O'Kiely and Muck, 1992)

5.0 Les additifs à ensilage

Une excellente régie de récolte et d'ensilage, et une bonne compréhension de la situation assurera les retombées maximales de l'additif sélectionné, et permettra de mieux conserver ce qu'on a récolté.

Les additifs à ensilage peuvent être classés en trois catégories

- Les inoculants lactiques
- Les enzymes
- Les acides organiques

5.1 Les inoculants lactiques

C'est la catégorie d'additifs la plus couramment utilisée. Les souches contenues dans les inoculants commerciaux sont sélectionnées sur une base de critères très rigoureux. Même si les inoculants commerciaux renferment souvent les mêmes espèces (*L. plantarum*, *P. acidilactici*, *E. facium*, *L. buchneri* ou autres), les souches (lignées) de chaque produit sont uniques et issues de programmes de sélection propre à chaque entreprise. Les souches sélectionnées sont d'occurrence naturelle. Ce sont les experts de chacune des entreprises qui établissent les objectifs de sélection. Certaines propriétés sont communes à tous les inoculants, d'autres sont uniques.

Les caractéristiques les plus importantes sont:

- **Osmotolérance**: C'est-à-dire qu'elles vont croître lorsqu'il y a moins d'eau disponible. Cette caractéristique est de première importance pour les ensilages à teneur élevée en matière sèche. Kung (2009) rapporte que moins de 10 % la flore lactique épiphyte était en mesure de croître dans des ensilages de graminées à 45 % de matière sèche.
- **Résistance au pH acide**: C'est la baisse rapide du pH et l'atteinte du pH de stabilité anaérobie qui est l'assurance de la conservation de la valeur nutritive du fourrage, de même que de la qualité hygiénique du fourrage.

- **Absence d'activité protéolytique** : Il faut éviter que la flore lactique dégrade les protéines.
- **Sécrétion de métabolites pour augmenter la stabilité aérobie** : Certaines souches peuvent produire des métabolites qui améliorent la stabilité aérobie.
- **Digestibilité de la fibre NDF** : Les premiers inoculants lactiques alléguant une augmentation de la digestibilité de la NDF sont apparus il y a quelques années. Il y a un effort de recherche notable pour tenter d'identifier des souches prometteuses pour cette caractéristique.

Tableau 5. Comparaison des caractéristiques des ensilages de ray-grass traités avec différents inoculants lactiques (adapté de Driehuis et coll. 2001)

Traitement	MS (%)	pH	Ratio lactique/acétique	Perte MS (%)
Témoin	32,8	4,19	2,35	3,20
<i>L. buchneri</i> (10 ⁵ UFC/g)	32,2	4,40	0,81	4,78
<i>L. plantarum</i> + <i>P. cerevisiae</i> (10 ⁵ UFC/g)	34,1	4,06	10,50	1,51
Combinaison des 2 inoculants	32,3	3,95	4,40	2,25

5.1.1 Les inoculants lactiques homofermentaires

Les inoculants homolactiques sont commercialisés depuis plus d'un demi-siècle. Les espèces de cette catégorie ne produisent que de l'acide lactique, ce qui favorise une baisse rapide et importante du pH et minimise les pertes de matière sèche et d'énergie. L'acide lactique est l'acide de fermentation le plus acidifiant en plus d'être celui qui est le mieux utilisé par les ruminants. L'acide lactique est un bon antimicrobien à cause de son pH, mais ses propriétés anti-moisissures ne sont pas très bonnes.

Règle générale, les inoculants commerciaux homolactiques sont composé de deux ou trois espèces pour exploiter leur potentiel de synergie et obtenir la meilleure fermentation lactique possible. Voici quelques facteurs importants pour la composition des inoculants commerciaux (Kung et coll. 2003) :

- Les populations d'*Enterococcus* et de *Pediococcus* se développent plus rapidement que les populations de *Lactobacillus* lorsque le pH est supérieur à 5 et qu'il y a de l'air.
- Par contre, avec l'augmentation de l'acidité dans l'ensilage, le groupe des *Enterococcus* disparaît rapidement. Ce sont les populations de *Lactobacillus* et *Pediococcus* qui dominent à la fin du processus de fermentation.
- Les *Pediococcus* sont plus tolérants lorsque la teneur en matière sèche est élevée et aussi lorsque l'acidité des ensilages est élevée.

5.1.2 Les inoculants lactiques hétérofermentaires

Lactobacillus buchneri est la principale espèce de cette catégorie. *L. brevis* fait aussi partie de cette catégorie. Les produits de fermentation sont l'acide lactique, l'acide acétique, l'éthanol et le CO₂. *L. buchneri* a été introduit dans les inoculants commerciaux au début des années 2000 après qu'on ait confirmé que son utilisation permettait d'améliorer la stabilité aérobie des ensilages de maïs. La meilleure stabilité aérobie est attribuée à une plus grande concentration d'acide acétique dans l'ensilage; celui-ci ayant des propriétés inhibitrices contre les moisissures (Pahlow et coll. 2009). Il y a aussi évidence de la production d'autres composés avec un effet inhibiteur sur les levures. Il a été démontré que certaines souches de *L. buchneri* utilisent l'acide lactique pour produire de l'acide acétique et du CO₂ et que ce mécanisme se poursuit donnant lieu à d'autres produits de fermentation ayant un effet sur la stabilité aérobie de l'ensilage. (Oude Elferinck et coll. 2001). Ce comportement expliquerait pourquoi un délai de 50 à 75 jours est nécessaire pour observer une amélioration de la stabilité aérobie (Kung et Muck, 2015). Cette utilisation de l'acide lactique par *L. buchneri* expliquerait pourquoi le pH d'un ensilage traité est généralement moins bas que lorsque traité avec un inoculant lactique homofermentaire. L'acide acétique étant moins acidifiant que l'acide lactique.

Aujourd'hui, *L. buchneri* est accompagné d'une espèce homolactique dans la plupart des inoculants commerciaux. Driehuis et coll. (2001) ont démontré que dans des ensilages de ray-grass à 35 % de MS, mais pas à 23 % de MS, la combinaison de *L. buchneri* et d'une bactérie lactique homofermentaire permet d'abaisser davantage le pH et d'avoir un ratio acide lactique/acide acétique plus élevé (tableau 5). Auerbach et coll. (2012) suggèrent que cette combinaison en fait un inoculant à deux fins. Même si les pertes de matière sèche sont plus élevées (1 à 2 %) comparativement à une fermentation homolactique, il peut-être avantageux d'utiliser un inoculant contenant *L. buchneri* dans les fourrages à faible pouvoir tampon sujet à l'instabilité aérobie (ensilage de maïs, de céréales plantes entières, de certaines graminées).

Il ne faut cependant pas penser que c'est la solution pour un ensilage trop sec, dans lequel l'air n'est pas adéquatement exclu, pas plus que pour l'ensilage peu compacté de la partie supérieure des silos. Comme pour toutes les bactéries lactiques, l'absence d'air est essentielle à sa croissance et à la production d'acides organiques. Undersander (2014) recommande d'utiliser des inoculants homolactiques pour les légumineuses et autres récoltes à pouvoir tampon plus élevé.

5.1.3 Les enzymes fibrolytiques exogènes et la digestibilité

L'idée de provoquer l'hydrolyse des liens complexes de la fibre-cellulose, hémicellulose pour libérer des sucres, n'est pas nouvelle. Les enzymes fibrolytiques peuvent être ajoutées directement ou produites par un microorganisme. Très peu d'études ont démontré que l'utilisation d'enzymes seules, a donné des résultats positifs pour l'effet sur la fermentation ou pour les caractéristiques nutritionnelles des ensilages. La combinaison avec un inoculant s'est parfois montrée avantageuse à cet égard (Kung 2001; Kung et coll. 2003;). Par ailleurs, l'utilisation d'enzymes fibrolytiques a, dans certains cas, résulté en la diminution de la teneur en fibres et, simultanément de la digestibilité de la fibre. Apparemment, la portion plus facilement digestible a été hydrolysée par l'enzyme, n'apportant en bout de ligne, aucun avantage nutritionnel (Kung, 2015).

Depuis quelques années, des souches de *L. buchneri* ayant une activité enzymatique ferrulate estérase (FE) pour augmenter la digestibilité de la fibre NDF (NDFd) sont commercialisées. L'effet sur la NDFd a été très variable (inconsistant) dans de nombreuses études (Kung, 2009). Récemment, quelques résultats de recherche ont été publiés :

- Dans l'**orge ensilée** au stade pâteux, la NDFd a été améliorée dans l'ensilage traité avec l'inoculant *L. buchneri* contenant l'enzyme FE (Jin et coll., 2015).
- Dans l'**ensilage de maïs**, l'augmentation de la digestibilité n'a pas compensé la plus perte de matière sèche plus élevée sur le potentiel de production de l'ensilage (Comino, 2014).

- Dans un essai réalisé à Lethbridge (Alberta) avec de **l'ensilage de luzerne** Lynch et coll. (2013) ont évalué avec des silos expérimentaux, des d'enzymes fibrolytiques (4 différents types) avec ou sans l'inoculant *L.buchneri* ayant l'activité enzymatique ferrulate estérase et un ensilage témoin. Parmi les 4 traitements avec des enzymes, seul le traitement Dyadic a démontré une teneur en NDF et ADF inférieure à l'ensilage témoin. Toutefois, cela n'a eu aucun effet sur la digestibilité ruminale *in vitro*, de la NDF (NDFd) et de la ADF (ADFd).

Pour le traitement avec *L.Buchneri* seul, le pH et les pertes de MS des ensilages traités ont été plus élevés que les ensilages témoin alors que la proportion d'acide lactique, la digestibilité ruminale *in vitro* de la NDFd et ADFd ont été inférieures à celles de l'ensilage témoin. Selon les auteurs de l'étude, cela s'expliquerait par la perte des hydrates de carbone digestibles lors de la fermentation, laquelle est plus hétérolactique.

5.2 Les acides organiques

Alors qu'en Europe on utilise souvent les formulations d'acides organiques comme inhibiteurs de *Clostridium* (acide formique et autres formulations AIV en Finlande), au Canada nous utilisons les acides organiques surtout comme inhibiteurs de moisissures. À cet égard l'acide propionique et les formulations à base d'acide propionique tamponnées sont les acides organiques les plus couramment utilisés. L'acide propionique est souvent utilisé dans la partie supérieure des silos, pour assurer la stabilité aérobie durant les premières semaines d'alimentation. Amyot (1999) a démontré qu'un dosage de 5 litres/t d'acide propionique dans de l'ensilage de luzerne avec une teneur de 46% de matière sèche a permis de maintenir la température de l'ensilage, alimenté immédiatement après la mise en silo, de 10 à 18 °C plus bas que l'ensilage non traité. Dans la même étude, il a été démontré que l'ensilage traité à l'acide propionique, après 21 jours de fermentation, contenait plus d'acide lactique (3,3 % vs 3,1 %), moins d'ammoniac (eq. protéine) (0,9 % vs 1,5 %), et plus d'acide acétique (0,75 % vs 0,60 %), avait un pH plus bas (4,7 vs 5,5) et plus de sucres solubles résiduels 7,8 % vs 5,3 %. Les formulations d'acide propionique sont aussi utilisées avec succès sur la partie supérieure des silos couloirs.

Kung (2001) rapporte que, lorsqu'utilisé comme additif, dans l'ensilage de maïs, les formulations d'acide propionique permettent de réduire les populations de moisissures et d'améliorer la stabilité aérobie de l'ensilage (tableau 6). Dans les balles enrobées avec une teneur en matière sèche de plus de 65 % c'est l'additif le plus indiqué. À ce niveau de matière sèche, le pH ne baisse pratiquement pas. L'activité de l'eau, surtout dans du fourrage long, est insuffisante pour permettre la multiplication des bactéries lactiques. Cette teneur en matière sèche favorise les levures et moisissures

Tableau 6. Effet d'un additif à base d'acide propionique sur le nombre de levures et la stabilité aérobie de l'ensilage de maïs

Traitement	Taux d'application	Levures dans l'ensilage (UFC/g)	Stabilité aérobie (heures)
Témoin		257 000	65
Produit A	1 kg/tonne TQS ¹	27 000	120
Produit A	2 kg/tonne TQS	2 800	>160

¹ TQS = tel que servi

5.3 Quel additif choisir? (adapté de Kung 2001)

Le choix de l'additif se fera en fonction de la situation propre à chaque ferme. On doit considérer :

1. Notre expérience passée.
2. L'espèce ensilée.
3. la teneur en matière sèche.
4. La reprise : est-ce que l'instabilité aérobie est une situation vécue ou appréhendée?

Utilisez un inoculant homolactique dans les conditions suivantes : (H : haché, E: balles enrobées)

Ensilage de légumineuses : toujours

Ensilage de graminées : MS < 40 % **H**, MS < 50 % **E**, lorsque la stabilité aérobie n'est pas un problème habituel.

Ensilage de céréales : MS < 35 % **H**, MS <45 % **E**, lorsque la stabilité aérobie n'est pas un problème.

Utilisez un inoculant hétérolactique lorsque l'instabilité aérobie est une situation vécue ou appréhendée dans les conditions suivantes: (H : haché, E: balles enrobées)

Ensilage de graminées (peuplement avec plus 50 % de graminées) : MS > 40 % **H**, MS > 50 % **E**

Ensilage de céréales : MS > 35 % **H**, MS > 45 % **E**

Utilisez l'acide propionique : lorsque l'instabilité aérobie est une situation vécue ou appréhendée dans :

Partie supérieure des silos tours, reprise immédiate

Partie supérieure des silos couloirs

Dans la masse ensilée

Balles enrobées à plus de 65 % de MS

Transfert d'ensilage fermenté

TOUJOURS UTILISER UN APPLICATEUR PROPRE ET BIEN ÉTALONNÉ

6.0 Conclusion

Un ensilage de qualité commence avec la fauche d'une bonne prairie, ensilée dans les meilleurs délais possibles, au bon taux d'humidité, sans ramasser de débris ou de terre. À la mise en silo (ou balles enrobées) une grande attention est portée pour réaliser une masse très dense et rapidement soustraite à la présence et la diffusion de l'air. Des bâches de qualité sont utilisées pour couvrir les silos couloirs et les silos verticaux qui ne sont pas en opération. Des films étirables performants, sont adéquatement et rapidement appliqués aux balles enrobées; une grande attention est portée à l'intégrité du film d'enrobage.

Pour réussir un bon ensilage, il faut un chantier équilibré, faire appel à un forfaitaire est souvent la meilleure option pour assurer rapidité et efficacité d'exécution. Dans ces conditions, l'additif judicieusement choisi va permettre de minimiser la protéolyse, les entérobactéries, les *Clostridium* lors de la phase de fermentation. Lors de la reprise, l'additif permettra l'inhibition des levures et les moisissures.

Se rapprochant de la valeur nutritionnelle du fourrage récolté, l'ensilage ainsi conservé aura des caractéristiques favorisant l'ingestion et l'efficacité alimentaire.

7.0 Bibliographie

Amyot, A., Tremblay, D. et Savoie, P. 1995. Qualité de conservation de l'ensilage demi-sec de balles rondes entreposé selon trois méthodes. Projet de recherche R-1105-93-071, MAPAQ, Deschambault.

Amyot A. 1999. Les additifs et la stabilité aérobie de l'ensilage. Projet de recherche R-1105-95-093, MAPAQ, Deschambault.

Amyot, A. 2003. Bien comprendre ce qui se passe dans les fourrages, du champ... à l'animal, un atout pour améliorer sa régie. [http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/Documents/AndrAmyot\(2\).pdf](http://www.agrireseau.qc.ca/grandescultures/Documents/AndrAmyot(2).pdf). Site consulté le 19 août 2015.

Amyot, A. 2004. Ensilabilité de la luzerne et effet de différents additifs sur sa fermentation. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages. CRAAQ, CQPF. Victoriaville, p. 31-36.

Auerbach, H. Nadeau, E. et Weiss, K. 2012. Benefits of using silage additives. Proc. 1st International Silage Summit, PP 82. Auerbach, H. Luckstadt, C. Weissbach, F. Editors, Leipzig, Germany.

Borreani, G., Revello C., A. et Tabacco, E. 2009. Enhancing oxygen impermeability of stretch film for wrapped silage with the use of new polymers. Proc. 15th International Silage Conference. July 27th-29th. Madison, WI, USA, p. 97-98.

Comino, I. 2014 Effects of an inoculant containing a *Lactobacillus buchneri* that produces ferulate-esterase, on fermentation products, aerobic stability, and fibre digestibility of maize silage harvested at different stages of maturity. *Animal Feed Science and Technology*. 198 : 94–106.

CRAAQ 2005. *Les plantes fourragères*. Bélanger, G., Couture, L., Tremblay, G., eds. PP 155

CRÉAQ Capacité des silos AGDEX 732

Driehuis, F., Oude Elferink, S.J.W.H. et Van Wijkelaar, P.G. 2001. Fermentation characteristics and aerobic stability of grass silage inoculated with *Lactobacillus buchneri*, with or without homofermentative lactic acid bacteria. *Grass Forage Sci.* 56: 330-343.

Holmes, B.J. et Bolsen, K. K. 2009. What's new in silage management? Proc. 15th International Silage Conference. July 27th-29th. Madison, WI, USA. pp. 61-76.

Jin, L. 2015. Impact of ferulic acid esterase producing lactobacilli and fibrolytic enzymes on conservation characteristics, aerobic stability and fiber degradability of barley silage. *Animal Feed Science and Technology*. 207 :62–74

Jokola, B. 2014 Manure on Forage Crops: Benefits and Challenges <http://www.ars.usda.gov/sp2UserFiles/Place/36553000/dairyexpo/2014/6websiteJokela.pdf>

Consulté le 15 août 2015

Kung, L. 2001. Silage Fermentation & Additives. Originally published in the 2000-2001 Direct-fed Microbial, Enzyme & Forage Additive Compendium, Miller Publishing Co., Minnetonka, MN.

Kung, L., Stokes, M. R. et Lin, C. J. 2003. Silage Additives. In *Silage Science and Technology*. Vol. 42. Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., and Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, pp. 305-360.

Kung, L. 2009. Potential factors that may limit the effectiveness of silage additives. Proc. 15th International Silage Conference. July 27th-29th. Madison, WI, USA, p. 37-45.

Kung, L. et Muck., R. E. 2015. Silage Additives: where are we going? Proc. 17th International Silage Conference. July 1st-3rd. Piracicaba, Sao Paulo, Brazil. pp. 72-81.

Lynch, J.P., Jin, L., Lara, E.C., Church, J.S., Baah, J. et Beauchemin, K.A. 2013. The ensilage dynamics and nutritive value of alfalfa silage produced using fibrolytic enzymes and a silage inoculant. CSAS-CMSA, Joint Annual Meeting, Banff Park Lodge Resort Hotel and Conference Centre, Banff, AB, Canada, June 18-20. p. 22 (résumé).

Maack, C., Buescher, W and Wagner, A. 2009 Controlling of silage crop compaction during the pressing process in case of bagging technology 15th International Silage Conference. July 27th-29th. Madison, WI, USA, p. 185-186.

- Mahanna, B. et Chase, L. E. 2003. Practical applications and solutions to silage problems. In *Silage Science and Technology*. Vol. 42. Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., and Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI. pp. 855-895.
- McDonald, P., Henderson, N. ET Heron, S. 1991. *The biochemistry of silage*. Second edition. Chalcombe Publications, Bucks, UK. 340 pp.
- McNally, G., Laffin, C., Forristal, P. D., O'Kiely, P. et Small, C. 2005. The effect of extrusion conditions and material properties of LDPE/LLDPE silage wrap films. *Journal of Plastic Film and Sheeting* 21(1) : 27-38.
- Mitloehner , F. M., Malkina I. L., Kumar A. et Green, P. G. 2009. Volatile organic compounds emitted from dairy silages and other feeds. Proc. 15th International Silage Conference. July 27th-29th. Madison, WI, USA. pp.15
- Moser, L.E. 1995. Post-Harvest Physiological Changes in Forage Plants. In *Post-Harvest Physiology and Preservation of Forages*, CSSA Special Publication 22. Moore, K. J., Peterson, M. A., eds. Crop Science Society of America and American Society of Agronomy. Madison, WI. pp. 1-19.
- Muck, R. 1988. Factors affecting silage quality and their implications for management. *J. Dairy Sci.* 71: 2992-3002.
- Pahlow, G., Muck, R. E., Driehuis, F., Elferink S.J.W.H. et Spoelstra S. 2003. Microbiology of Ensiling. In *Silage Science and Technology*. Vol. 42. Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., and Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI. pp. 31-93.
- Oude Elferinck, S.J.W.H., Krooneman, J., Gottschal, J.C., Spoelstra, S.F., Faber, F. et Driehuis, F. 2001 Anaerobic Conversion of Lactic Acid to Acetic Acid and 1,2-Propanediol by *Lactobacillus buchneri* *Appl. Environ. Microbiol.* 2001, 67(1):125. DOI
- Pahlow, G. et Muck, R. E. 2009. Managing for improved aerobic stability. Proc. 15th International Silage Conference. July 27th-29th. Madison, WI, USA. p. 77-90.
- Richardt, W. 2012. Silage quality and animal health. Proc. 1st International Silage Summit, PP61-62. Auerbach, H. Luckstadt, C. Weissbach, F. Editors, Leipzig, Germany.
- Jiang et Jofriet dans Savoie, P., et Jofriet, J. C., 2003. Silage Storage. In *Silage Science and Technology*. Vol. 42. Am. Soc. Agron., Crop Sci. Soc. Am., and Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, USA. pp. 405-467.
- TrioPlast AB 1995. *Guide de l'ensilage en balles*. ISBN 91-630-3699-1.
- Undersander, D. 2014. Making the best grass silage. *Hay and forage grower*, February issue, p. 23.
- Weissebach, F. et Auerbach, H. 2012. *The future of forage conservation* Proc. 1st International Silage Summit, PP13-15 Auerbach, H. Luckstadt, C. Weissbach, F. Editors, Leipzig, Germany.