

# LA CONSERVATION DES ALIMENTS ENSILEÉS ET LEUR EFFET SUR LES RUMINANTS

---

**CONFÉRENCIER**

Philippe Savoie

**COLLABORATEUR**

Gaëtan F. Tremblay

## INTRODUCTION

La paissance est généralement la méthode la plus économique d'alimentation des ruminants. Toutefois, la paissance est possible seulement entre mai et octobre, dans la plupart des régions du Québec, à cause du froid durant le reste de l'année. De plus, la couverture de neige au sol, pendant plusieurs mois, empêche l'accès au pâturage. C'est pourquoi les éleveurs doivent récolter et conserver une partie du fourrage pour l'alimentation hivernale. Certains éleveurs récoltent aussi pour suppléer à des temps de sécheresse l'été ou simplement pour fournir un fourrage relativement homogène douze mois par année.

Le fourrage peut être conservé soit sous forme sèche (foin, fourrage déshydraté), soit sous forme humide (ensilage). Pour la conservation sèche, il faut réduire la teneur en eau à moins de 20 % (12 % dans le cas des produits déshydratés) afin de stabiliser le foin et d'empêcher l'activité microbiologique. Pour la conservation humide, la teneur en eau peut varier entre 40 et 70 % ; on aura un bon ensilage à la condition de maintenir un scellement parfait et d'adapter la teneur en eau à la méthode d'entreposage (CPVQ, 1989). Par exemple, dans un silo horizontal, le fourrage doit être légèrement préfané à une teneur en eau entre 60 et 70 % ; dans un silo vertical, on vise une teneur en eau plus basse, généralement de l'ordre de 50 à 60 %. Le silo vertical (ou silo-tour) exige un fourrage plus sec que le silo horizontal pour éviter l'écoulement de jus, surtout dans les tours supérieures à 20 m. Les périodes de séchage au champ sont beaucoup plus courtes pour l'ensilage (4 à 30 heures) que pour le foin (36 à 96 heures, ou plus). Les risques de pertes de qualité au champ, dues à la pluie et aux manipulations d'andains, sont donc moindres pour l'ensilage que pour le foin.

Le fourrage destiné à l'ensilage est traditionnellement ramassé avec une récolteuse-hacheuse (fourragère ou ensileuse) qui produit des brins entre 5 et 15 mm de longueur. Ceci assure un bon tassemement dans les silos horizontaux ou verticaux. Il est aussi possible de faire de l'ensilage non haché avec des grosses balles rondes ou des grosses balles rectangulaires, à la condition de sceller les balles avec un film de polyéthylène. Diverses expériences ont montré qu'on pouvait avoir un ensilage de grosses balles acceptable à des teneurs en eau comprises entre 40 et 70 %. Toutefois, on recommande de viser entre 50 et 60 %, en général, pour ce type d'ensilage (Genest *et al.*, 1990).

Les principales espèces fourragères au Québec sont les graminées vivaces (fléole surtout, mais aussi le brome et le dactyle) et les légumineuses vivaces (luzerne et trèfle rouge). Les fourrages vivaces (foins cultivés) occupaient 882 000 hectares en 1996 (Statistique Canada, 1997). On cultive aussi des fourrages annuels, les plus importants étant le maïs fourrager

(environ 60 000 hectares en 1997), le ray-grass annuel (environ 10 000 hectares) et certaines céréales récoltées en plantes entières (orge, blé, avoine, etc.).

En bref, le producteur de bovins a le choix entre diverses espèces fourragères, diverses machines de récolte et différentes méthodes d'entreposage. Le but de cette présentation est de faire le point sur les différentes méthodes de conservation des fourrages ensilés. On portera une attention particulière à l'impact des aliments ensilés sur la production des bovins de boucherie.

## PRINCIPES D'ENSILAGE

On trouvera une présentation exhaustive des principes d'ensilage dans McDonald *et al.* (1991). Deux conférences récentes (NRAES, 1993 ; 1997) illustrent les principales tendances en Amérique du Nord dans le domaine des ensilages.

L'ensilage est une fermentation naturelle où la plante fournit à la fois l'eau, les sucres et les microorganismes. La fermentation doit se dérouler dans des conditions anaérobies, c'est-à-dire en l'absence d'oxygène, suite au scellement du silo et à la disparition de l'oxygène de l'air résiduel par respiration. Les sucres sont alors convertis en acides qui stabilisent l'ensilage. En fonction de la teneur en eau de la plante, des sucres disponibles et des microorganismes, on peut obtenir divers types de fermentations naturelles : butyriques, lactiques, acétiques, etc. On peut aussi influencer la fermentation en ajoutant des additifs. L'objectif de cette section est de présenter sommairement les principaux facteurs qui peuvent influencer la qualité de l'ensilage.

### Plantes

Quand on ensile une plante, on cherche les caractéristiques qui favorisent une bonne fermentation. Idéalement, la plante devrait contenir une bonne proportion de sucres solubles (environ 10 % de la matière sèche). La teneur en eau doit se situer entre 50 et 70 %, selon le type de silo, pour favoriser le développement des bactéries lactiques (assez d'eau) et éviter l'écoulement de jus (pas trop d'eau). Finalement, on recherche une structure physique facilitant le compactage du fourrage afin de minimiser la présence d'air au moment du scellement. Les plantes fourragères, lors de la fauche au champ, ne répondent pas toujours à ces critères. C'est pourquoi il faut prévoir certains traitements (fanage au champ, hachage ou compactage mécanique, additifs) pour améliorer la fermentation des plantes.

Les graminées vivaces comme la fléole des prés (communément appelée « mil »), le brome et le dactyle et

les graminées annuelles comme le ray-grass peuvent contenir entre 75 et 85 % d'eau à la fauche. Il faut donc les conditionner, les laisser en andain et les faire sécher au champ afin d'abaisser la teneur en eau sous le seuil de 70 % avant la mise en silo. Ces plantes contiennent généralement plus de 10 % de sucres solubles (jusqu'à 18 % dans le cas du ray-grass). Elles fournissent donc naturellement assez de sucres solubles pour une bonne fermentation.

Les légumineuses vivaces, comme la luzerne ou les trèfles, ont des teneurs en eau élevées à la fauche et doivent être fanées au champ. Elles ont tendance à sécher plus lentement que les graminées. On a donc avantage à étaler les légumineuses, le plus possible, derrière la faucheuse (plutôt que de former un andain étroit) afin de favoriser le séchage rapide au champ. Les légumineuses contiennent moins de sucres solubles (5 à 10 % de la matière sèche) que les graminées ; toutefois elles contiennent environ 6 % d'amidon qui peut être converti en sucres (hydrolysé) assez rapidement par des enzymes naturels ou ajoutés. Les légumineuses ont un pouvoir tampon plus élevé que les graminées. Ceci signifie qu'elles requièrent plus d'acide pour obtenir la même acidification (ou baisse de pH) que les graminées. Par exemple, un ensilage humide (teneur en eau de 70 %) exigera une baisse de pH de 6 à 4 ; il faudra environ 40 % plus d'acide pour atteindre ce niveau d'acidification chez une légumineuse que chez une graminée.

Le maïs fourrager est une plante cultivée dans les régions plus chaudes et se conserve bien en ensilage. La teneur en eau de la plante entière baisse au fur et à mesure que le grain mûrit, passant, environ, de 80 à 65 % de teneur en eau, entre le stade laiteux (grains mous) et le stade vitreux (grains durs). Le maïs fourrager est souvent récolté à un stade intermédiaire (pâteux) quand il contient environ 12 % de sucres solubles, 25 % d'amidon et 70 % d'eau (Leduc *et al.*, 1997). Il y a donc beaucoup de sucres disponibles pour la fermentation. Un bon hachage et le roulage des grains, avant la mise en silo, facilitent le compactage et l'hydrolyse de l'amidon en sucres. Le maïs fourrager s'adapte mal aux climats froids, le grain n'y mûrit pas suffisamment ; il reste au stade laiteux, très humide, ce qui cause un écoulement des silos.

Les autres céréales comme l'orge, l'avoine, le seigle ou le blé peuvent aussi être ensilées. Elles contiennent 10 % ou plus de sucres solubles et une proportion importante d'amidon dans les grains. Il est important de récolter ces plantes à un stade hâtif de maturité ; quand les feuilles et les tiges sont encore tendres et les grains au stade laiteux. Toutefois, les plantes sont parfois très humides, ce qui peut nécessiter un fanage au champ. À un stade plus tardif, la plante entière sera moins digestible et contiendra moins de sucres solubles ; la fermentation sera plus difficile à réussir.

## Réactions biochimiques

Même après le fauchage et le hachage, les tissus végétaux continuent à être le site de diverses réactions biochimiques. Les réactions les plus importantes, avant et pendant l'ensilage, sont la respiration, l'hydrolyse et la protéolyse. Ainsi, certains constituants de la plante seront transformés, tantôt de façon à favoriser, tantôt de façon à défavoriser une bonne fermentation.

La respiration est la conversion d'hydrates de carbone en gaz carbonique, en eau et en chaleur. Les sucres solubles sont les hydrates de carbone respirés le plus rapidement. Les autres hydrates de carbone de la plante, dits structuraux (cellulose, hémicellulose et lignine), ne sont pas immédiatement respirés ; leur structure complexe doit auparavant être décomposée en sucres simples. Il faut toujours une source d'oxygène pour que les sucres solubles soient respirés. Ainsi la respiration cellulaire se poursuivra au champ pendant le fanage mais s'arrêtera rapidement dans un silo bien scellé. La respiration au champ peut causer une perte de matière sèche de 1 à 2 % par jour ; ces pertes sont essentiellement des sucres solubles. Il est donc important de ne pas prolonger indûment le fanage et de sceller rapidement le silo.

L'hydrolyse des hydrates de carbone structuraux est le phénomène par lequel les molécules complexes sont décomposées en sucres simples. Par exemple, la cellulose, en présence de l'enzyme cellulase (une substance protéique qui accélère certaines réactions), sera décomposée en glucose, un sucre simple soluble. Au même titre, l'hémicellulose, en présence de l'enzyme xylanase, sera décomposée en xylose. La lignine, quant à elle, est très difficile à décomposer et ne participe ni aux réactions biochimiques, ni à l'alimentation des animaux. La lignine est considérée comme une substance indigestible.

L'hydrolyse de la cellulose ou de l'hémicellulose peut être activée par l'ajout d'enzymes. Cela peut contribuer à augmenter la proportion de sucres solubles pour la fermentation. Toutefois, l'hydrolyse prend parfois plusieurs jours avant d'être complétée.

Une autre réaction biochimique importante est la protéolyse. Il s'agit de la décomposition des protéines en acides aminés, en présence d'enzymes comme la protéase. La protéine brute, quant à elle, demeure la même car elle représente le total des protéines et des acides aminés. Cependant, si la proportion d'acides aminés devient trop importante (c'est aussi la fraction azotée rapidement dégradable), trois phénomènes risquent de se produire : les ruminants n'auront pas suffisamment d'azote lentement dégradable (protéine) ; ils utiliseront, de façon incomplète, cette fraction d'azote soluble et ainsi, on retrouvera beaucoup d'azote dans l'urine. Il est suggéré de compenser l'alimentation par une autre source d'azote lentement dégradable, par exemple les drêches de brasserie ou de distillerie.

Dans le but d'améliorer l'utilisation de l'azote des fourrages, il faut essayer d'atténuer la protéolyse. Celle-ci cesse lorsque le fourrage devient relativement sec (teneur en eau inférieure à 60 %) ou lorsque l'ensilage humide est acidifié rapidement, par exemple, par l'ajout d'un acide fort. En pratique, on peut réduire le problème de la protéolyse principalement par un séchage rapide au champ (attendre un temps ensoleillé, effectuer un bon conditionnement).

## Microorganismes

Plusieurs microorganismes sont présents naturellement à la surface des plantes. La plupart sont aérobies ; ils se développent exclusivement en présence d'oxygène et ils deviennent inactifs pendant la fermentation. Les principaux microorganismes anaérobies (ceux qui se développent en l'absence d'oxygène) incluent les colibacilles (entérobacters), les ferment lactic (lactobacilles, pédioocoques, etc.) et les ferment butyriques (clostridies).

Pour la production d'ensilage, les ferment lactic représentent les microorganismes les plus importants. Ils sont subdivisés en ferment homolactiques et hétérolactiques. Les ferment homolactiques convertissent chaque molécule de glucose (un sucre soluble) en deux molécules d'acide lactique, sans diminuer la valeur alimentaire du fourrage. La production d'acide lactique abaisse le pH, réduit l'activité de tous les microorganismes et stabilise l'ensilage. La conservation est alors prolongée et peut atteindre plusieurs mois, si l'oxygène n'y pénètre pas. Les ferment hétérolactiques convertissent le glucose en acide lactique, mais aussi en éthanol et en gaz carbonique. Il y a alors une baisse de valeur alimentaire, le gaz carbonique n'étant pas récupérable.

Les ferment butyriques apparaissent lors d'une contamination par la présence de sol ou de résidus de fumure organique sur les plantes. Ces ferment se développent après la fermentation lactique initiale, surtout dans les ensilages humides dont la teneur en eau est supérieure à 65 %. Ils transforment l'acide lactique en acide butyrique, en gaz carbonique et en hydrogène. En plus d'occasionner une baisse de la valeur alimentaire, les ferment butyriques dégagent une forte odeur qui réduit l'appétence de l'ensilage. On peut empêcher le développement des ferment butyriques en évitant la contamination ou en récoltant le fourrage plus sec avant la mise en silo.

Les colibacilles ou entérobacters sont peu importants dans la production des ensilages. Ils ont tendance à diminuer pendant le fanage au champ et les phases initiales de fermentation, tandis que les ferment lactic deviennent plus actifs et produisent de l'acide lactique. Les colibacilles sont présents dans le fumier. Ils peuvent être présents dans l'ensilage si celui-ci est fait peu après une application de fumier. Les colibacilles

peuvent produire de l'acide acétique, de l'ammoniac et certaines toxines. En pratique, un délai d'au moins quatre semaines entre la dernière application de fumier et la récolte des fourrages devrait permettre d'éviter la présence significative de ces microorganismes.

## Oxygène

Il est essentiel d'éliminer l'oxygène pour obtenir une bonne fermentation. Seules des conditions anaérobies peuvent favoriser la croissance des ferment lactic, la production d'acide et la stabilisation de l'ensilage.

L'oxygène cause d'abord des pertes dues à la respiration lors du fanage au champ, puis initialement dans le silo. Lorsque ce dernier est fermé hermétiquement, l'oxygène disparaît rapidement. En pratique, plusieurs types de silo manquent d'étanchéité. Une certaine quantité d'oxygène peut s'infiltrer continuellement dans les parois, par des trous ou des pores. Les silos recouverts d'un film plastique peuvent se déchirer ou avoir des microperforations. Il est important de réparer les déchirures ou perforations visibles à l'aide d'un ruban adhésif. Dans le cas des silos en douves de béton, une inspection annuelle des joints et l'application occasionnelle d'un enduit imperméable réduiront au minimum les pertes dues à l'infiltration d'air.

L'oxygène est responsable d'autres pertes survenant lors de la reprise. Si celle-ci est lente (moins de 50 mm par jour dans un silo-tour ou moins de 150 mm dans un silo horizontal), l'air s'infiltra à l'intérieur de la surface de reprise et cause le développement de moisissures. De même, un ensilage qui séjourne trop longtemps dans une mangeoire (plus de 24 heures) chauffe et se dégrade. Il faut donc avoir une reprise assez rapide dans les silos, tout en s'assurant que les animaux mangent rapidement ces aliments ensilés.

## Eau

La teneur en eau est un facteur important dans la conservation des ensilages. Lorsqu'elle est trop élevée (au-dessus d'environ 70 % pour les graminées et 65 % pour les légumineuses), les ferment butyriques risquent de dominer les ferment lactic. Cela engendre des pertes d'éléments nutritifs pendant la conservation et un ensilage moins appétent. Les ensilages très humides ne sont pas souhaitables pour d'autres raisons. Ils ont tendance à causer une diminution de la consommation volontaire chez les animaux et une augmentation des pertes par écoulement de jus, surtout dans les silos-tours.

Par ailleurs, une teneur en eau trop basse (inférieure à 50 %) peut aussi être une source de problèmes. Lorsqu'il n'y a pas assez d'eau, les microorganismes

arrêtent de croître et, conséquemment, la production d'acide lactique cesse. Ces « ensilages » relativement secs auront un pH élevé de l'ordre de 5,5 à 6,0. En soi, ce n'est pas un problème, si le fourrage est conservé de façon très hermétique. Cependant, dès la reprise et l'exposition à l'air, ce genre de fourrage est très sensible au développement des moisissures. Dans ces conditions, pratiquement tous les sucres solubles restent intacts puisqu'ils ne sont pas convertis en acide organique. Ces sucres deviennent un substrat rapidement disponible pour les levures et les moisissures à la moindre infiltration d'air. C'est aussi dans ce genre d'ensilage qu'on observe le phénomène rarissime des feux de silos. Dans le cas d'un ensilage très sec (entre 30 et 40 % de teneur en eau) où l'infiltration d'air est facilité, l'échauffement rapide du fourrage, à cause des moisissures et des réactions biochimiques (respiration, oxydation), sera suivi de réactions chimiques (caramélisation, réaction de Maillard) et de combustion spontanée.

En pratique, on préconise une teneur en eau entre 50 et 70 % pour obtenir un bon ensilage. Comme déjà mentionné, les légumineuses requièrent une teneur en eau plus basse que les graminées. Dans les silos-tours et les ensilages de grosses balles rondes ou rectangulaires, on préfère des teneurs en eau entre 50 et 60 % tandis que dans les silos horizontaux, on vise des teneurs en eau entre 60 et 70 %.

## Additifs

McDonald *et al.* (1991) identifient cinq classes d'additifs pour l'ensilage.

### Stimulants de fermentation

Le but de ces stimulants est de favoriser une fermentation lactique au détriment des autres fermentations (butyriques, acétiques). Ils incluent les cultures bactériennes (habituellement des ferments lactiques), des sucres comme la mélasse, et les enzymes qui décomposent les parois cellulaires en sucres.

### Inhibiteurs de fermentation

Ceux-ci jouent un rôle contraire aux stimulants ; ils empêchent toute activité microbiologique. Les inhibiteurs les plus courants sont l'acide sulfurique et l'acide formique. Ajoutés à fortes concentrations, ces acides abaissent rapidement le pH autour de 4 et rendent inactifs les microorganismes. Les acides sont utilisés dans plusieurs pays du nord de l'Europe dans les ensilages très humides (teneur en eau entre 70 et 80 %) pour freiner les ferments butyriques. Toutefois, les acides sont corrosifs pour le béton, l'armature et les machines ; ils présentent aussi un risque de brûlure

de la peau. Idéalement, en faisant sécher le fourrage sous le seuil de 70 % de teneur en eau, les acides deviennent inutiles.

### Inhibiteurs de détérioration aérobie

Des inhibiteurs comme l'acide propionique sont parfois ajoutés quand les silos manquent d'étanchéité ou encore quand la reprise est lente et l'ensilage est exposé à l'air pendant plusieurs jours. La neige carbonique peut dépanner en cas d'entrée d'air. Cependant, une bonne étanchéité de silo et une reprise rapide sont des solutions généralement préférables à l'ajout d'un inhibiteur de détérioration aérobie.

### Additifs alimentaires

Ces additifs sont utilisés au moment de la mise en silo. On pense notamment à l'urée, qui augmente la protéine brute, et aux grains, qui augmentent l'énergie du fourrage. On incorpore ces additifs essentiellement pour améliorer la concentration de protéine ou d'énergie. En fait, ils influencent peu la fermentation. L'urée n'apporte pas de sucres et peut même causer un effet négatif en augmentant le pouvoir tampon du fourrage et en nécessitant plus d'acide lactique pour stabiliser l'ensilage. Quant aux grains, ils apportent de l'amidon, mais seulement une fraction de cet amidon sera convertie en sucres solubles par les enzymes et cela peut prendre plusieurs jours.

### Absorbants

Les absorbants sont surtout utilisés avec les ensilages très humides. Des produits comme la paille, les grains d'orge ou même l'argile sont parfois incorporés à l'ensilage pour absorber une partie de l'eau en excès et ainsi réduire les écoulements de jus. Le fanage au champ et la récolte sous une teneur en eau de 70 % éliminent le besoin d'absorbants.

### Traitements mécaniques

Une autre façon de modifier le cours de la fermentation est l'utilisation de traitements mécaniques, appliqués soit au champ, soit au silo. Dans l'herbe, on peut influencer le taux de séchage naturel par le conditionnement et les manipulations d'andains. Dans le maïs fourrager, on peut briser les grains et les tiges avec une rouleuse. Pour les deux types de plantes, on peut modifier la longueur de coupe.

Un conditionnement mécanique intense au champ permet de faire sécher les andains plus vite. On réduit ainsi le risque de pertes dues à la pluie ; on diminue aussi la respiration cellulaire en abaissant rapidement

la teneur en eau. Il est plus facile de réussir un ensilage un peu plus sec qu'un ensilage trop humide. Cependant, il faut éviter d'accroître les pertes mécaniques (détachement de feuilles, bris de tiges) lors de manipulations trop vives. Les traitements conventionnels incluent les conditionneurs à rouleaux, les faneuses, les retourneurs d'andains et les râteaux. On trouve, dans le guide sur les plantes fourragères (CPVQ, 1989), les principes pour une bonne utilisation de ces équipements. Le surconditionnement est un traitement plus intense et novateur de broyage des tiges à la fauche pour accroître le séchage. De plus, il accroît la digestibilité des fibres fourragères (Savoie, 1998a). Toutefois, il peut occasionner plus de pertes que les traitements conventionnels si la pluie s'abat sur les andains ; les tiges broyées sont plus facilement lessivées de leurs nutriments et les manipulations subséquentes, si elles s'avèrent nécessaires, peuvent accroître les pertes de feuilles. Le surconditionnement n'est pas encore commercialisé ; il pourrait être avantageux, en particulier pour les systèmes de récolte à séchage court, sur une ou deux journées.

Le roulage du maïs fourrager et d'autres céréales récoltées en plantes entières peut être effectué au champ ou à l'ensilage. Depuis une vingtaine d'années, les manufacturiers de fourragères automotrices offrent en option un module de broyage (aussi appelé éclateur, processeur ou craqueur) situé entre le cylindre de hachage et le ventilateur. Le module est formé de deux rouleaux rainurés qui brisent les grains et les tiges grossières (Savoie, 1997 ; Shinners, 1997). Depuis 1998, deux manufacturiers offrent un module de broyage sur des fourragères traînées. Le module de broyage sur une de ces fourragères traînées, le modèle Dion 1224, a été développé au Québec (Roberge *et al.*, 1998). Certaines études récentes montrent que le broyage du maïs fourrager peut augmenter la production laitière de 0,9 à 1,3 kg par jour (Straub *et al.*, 1996 ; Harrison *et al.*, 1997). Le module de broyage devrait aussi être bénéfique en production bovine, en améliorant la digestibilité du grain.

La longueur de hachage est un facteur physique important dans la production d'ensilage. Une longueur fine (inférieure à 10 mm) permet un bon tassement naturel dans les silos-tours. Dans les silos horizontaux, on peut utiliser des longueurs supérieures à la condition de tasser le fourrage avec un tracteur ou de recouvrir le fourrage rapidement d'une toile étanche. Avec certaines précautions, il est possible de réussir un ensilage de fibres longues, non hachées, comme l'ensilage de balles rondes (Beaulieu *et al.*, 1993). Cependant, un broyage supplémentaire à la fauche, comme le surconditionnement, peut accélérer la disponibilité des sucres et la production d'acide lactique (Savoie *et al.*, 1996 ; Charmley *et al.*, 1997). On peut aussi présumer qu'un hachage grossier, réalisable avec les couteaux fixes disponibles en option sur certaines presses, améliorerait la fermentation des ensilages de grosses balles rondes ou rectangulaires.

## MÉTHODES D'ENTREPOSAGE

Les ensilages peuvent être entreposés dans des structures avec parois de béton ou d'acier (silos-tours, silos horizontaux) ou dans des contenants flexibles sans structure (meules, boudins, balles rondes et balles rectangulaires). Dans tous les cas, il faut une bonne étanchéité afin d'éviter l'infiltration d'air. Certaines structures ont des exigences particulières. On pourra trouver, dans Savoie (1998b), plus de détails techniques sur le choix des systèmes d'entreposage. On peut aussi trouver, dans CPVQ (1989), les capacités et autres renseignements concernant les méthodes conventionnelles d'entreposage. On en présente ici un résumé.

### Silos-tours

Les silos-tours à fourrages sont des structures cylindriques verticales dont la hauteur est généralement trois à quatre fois supérieure au diamètre. On remplit les silos-tours en soufflant un fourrage préalablement haché jusqu'au sommet de la structure. Le tassement se fait par compactage naturel. À la reprise, l'ensilage est récupéré à l'aide d'un videur installé soit dans le haut du silo, soit dans le bas. Les silos avec vidange par le haut sont munis d'une série de portes qu'on ouvre, du sommet jusqu'à la base, au fur et à mesure que le niveau d'ensilage baisse. Les silos avec vidange par le bas sont généralement plus étanches que ceux avec vidange par le haut ; c'est pourquoi on les appelle parfois silos hermétiques ou à atmosphère contrôlée. Les portes sur le côté sont inutiles, puisque tout l'ensilage sort à la base du silo.

Les silos-tours sont généralement construits à proximité de l'étable ou du bâtiment habité par les animaux l'hiver. On peut ainsi effectuer la vidange du silo et le mélange des aliments, à l'intérieur du bâtiment. Certains inconvénients, avec les silos-tours, incluent le coût relativement élevé de la structure, le besoin d'une bonne fondation, en particulier sur les sols argileux, l'écoulement de jus, le gel des ensilages trop humides, sans oublier l'accumulation de gaz toxiques dans le haut du silo. De plus, la prudence est de rigueur lorsque l'entretien et les réparations exigent de circuler le long de ces silos, dont la hauteur dépasse parfois 30 m. Une bonne régie et l'application de règles de sécurité permettent de surmonter la plupart des difficultés techniques reliées aux silos-tours.

### Silos horizontaux

Les silos horizontaux sont constitués d'un plancher, de deux murets parallèles et d'un muret de fond. La hauteur des murets varie normalement entre 2 et 5 m ; la largeur entre les murets parallèles varie entre 5 et

15 m. Le dessus est recouvert d'une toile de polyéthylène retenue par des pneus ou autres objets lourds non coupants. On doit dimensionner les silos horizontaux en fonction du nombre d'animaux à nourrir afin de reprendre une tranche verticale d'au moins 150 mm d'épaisseur par jour.

Les silos horizontaux coûtent généralement moins cher à la construction, pour une même capacité d'entreposage, que les silos-tours. Lors du compactage avec un tracteur, il faut être prudent pour éviter le renversement en circulant sur les pentes accentuées du tas de fourrage. Si on retarde la pose de la toile de polyéthylène, notamment lorsque le remplissage est interrompu par la pluie ou lorsque le silo est surdimensionné, l'infiltration prolongée d'air causera une baisse de la qualité. Un autre inconvénient est l'obligation de déneiger et de maintenir un accès dégagé pour la reprise durant l'hiver. Il faut aussi envisager le recyclage des films de couverture sur ces silos. Une solution éventuelle serait le développement de mousses comestibles et imperméabilisantes appliquées à la surface du silo (Bolsen, 1997). De plus en plus, les silos horizontaux deviennent la norme, en particulier aux États-Unis, pour la conservation d'ensilage en grandes quantités (NRAES, 1993 ; 1997).

## Silos-meules

Les silos-meules sont formés d'un tas de fourrage déposé en demi-cylindre et recouvert d'une toile de polyéthylène. Les largeurs types (diamètre du demi-cylindre) sont de 6 à 10 m ; les longueurs sont normalement de 30 m ou d'un multiple de 30 m. Le fourrage est déposé soit avec un convoyeur à palettes, soit avec un chargeur frontal. La densité du fourrage est assez faible ; c'est pourquoi il faut recouvrir rapidement la meule d'une toile de polyéthylène et ainsi arrêter l'infiltration d'air. D'autres précautions sont nécessaires, comme le maintien de la tension de la toile de polyéthylène durant la consolidation du fourrage, l'éloignement des rongeurs et des oiseaux, une reprise rapide (jusqu'à 300 mm par jour), une surface de plancher propre lors de la confection et de la reprise.

Le silo-meule a connu une période de développement importante entre 1980 et 1990. Il a l'avantage d'être peu coûteux en investissement et flexible au niveau des volumes entreposés chaque année. Il est encore utilisé comme système d'entreposage principal sur un nombre restreint de fermes. On l'utilise aussi comme méthode d'entreposage d'appoint en cas de surplus, lorsque les silos permanents sont remplis. Cependant, sa sensibilité aux pertes exclut d'envisager un développement important de cette méthode d'entreposage des ensilages.

## Ensilage de grosses balles

Depuis les quinze dernières années, l'ensilage de grosses balles rondes et rectangulaires est le système d'entreposage en expansion. Le fourrage long, habituellement non haché, est mis en balle puis recouvert d'un film de polyéthylène. Le recouvrement peut être fait soit avec un sac de dimensions appropriées pour les balles individuelles, soit avec une enrubanneuse qui applique un film étirable sur des balles individuelles ou regroupées en ligne, soit avec un conformateur (ou enrobeuse) qui pousse les balles dans un tube étirable. La méthode des sacs a pratiquement disparu à cause de ses exigences élevées en manipulations. On utilise plutôt des enrubanneuses ou des conformateurs pour couvrir les balles.

L'ensilage de grosses balles représente une méthode très flexible tant pour l'emplacement que pour les quantités conservées. Il exige peu d'investissement en structure mais nécessite une machine pour enruber ou enrober. Les balles sont généralement servies en râtelier pour simplifier la reprise. L'utilisation de ces balles en rations totales mélangées est difficile car, pratiquement, aucun hachoir efficace n'existe pour le fourrage long et humide. Cette méthode d'ensilage produit des quantités importantes de déchets plastiques pour lesquels des solutions environnementales acceptables sont essentielles (recyclage plutôt qu'enfouissement ou combustion).

## Silos-boudins

Des conformateurs spécialisés sont utilisés pour entasser du fourrage haché dans des longs tubes (30 à 60 m) de diamètre variable (1,2 à 3 m). Ces conformateurs incluent un foulon hydraulique qui pousse et densifie le fourrage haché dans le tube. Ces tubes, qu'on appelle silos-boudins, permettent de conserver des ensilages à des teneurs en eau variées, entre 40 et 70 %.

Le silo-boudin est flexible comme le silo-meule tant pour le site d'entreposage que pour les volumes conservés. Il est fait d'un seul tube sans joint sur les côtés ; il est ainsi généralement plus étanche que le silo-meule. Les conformateurs, pour les silos-boudins, représentent un investissement important. En plus d'être une charge annuelle, les sacs utilisés pour les boudins devront être recyclés pour se conformer à une réglementation environnementale plus sévère.

## QUALITÉ DES ENSILAGES

Undersander (1997) suggère de mesurer au minimum 4 à 6 paramètres de qualité pour l'ensilage : la matière sèche, la protéine brute, la fibre au détergent acide

ADF, la fibre au détergent neutre NDF et, à l'occasion, le pH et la protéine soluble. En fait, les modèles nutritionnels utilisent jusqu'à 30 paramètres de qualité ; toutefois, la plupart sont estimés sans être mesurés puisque le coût d'analyse deviendrait prohibitif. Les méthodes d'analyse doivent être précises, fiables, rapides et économiques. De nouvelles méthodes d'analyse utilisant la spectroscopie, plutôt que des réactifs chimiques, permettraient de réduire les coûts et d'améliorer les modèles de prédiction. Cette section examine les principaux paramètres de qualité, la prédiction de la valeur alimentaire des ensilages et la méthode de spectroscopie dans le proche infrarouge.

## Paramètres de qualité

### Matière sèche

La méthode de titrage Karl Fisher, la distillation au toluène et la détermination par chromatographie en phase gazeuse sont des méthodes précises permettant d'estimer le contenu en matière sèche des aliments fermentés. Elles sont toutefois difficilement utilisables sur une base routinière. La distillation au toluène est exigeante en temps et c'est un produit potentiellement cancérigène. La détermination par chromatographie exige l'utilisation d'un chromatographe dispendieux. La méthode de titrage Karl Fisher utilise des réactifs relativement coûteux.

La teneur en matière sèche peut aussi être mesurée en séchant les échantillons au four, à des températures élevées, pendant de courtes périodes de temps. Toutefois le séchage à haute température évacue non seulement l'eau mais aussi les composés volatils, (acides lactique, propionique, acétique, butyrique, éthanol, etc.). Ceux-ci peuvent représenter 3 à 10 % de la matière sèche dans les ensilages bien fermentés. Ainsi la matière sèche est sous-estimée et les principaux constituants non volatils (protéines brutes, fibres, minéraux, etc.), exprimés sur une base de matière sèche, sont surestimés. Dulphy et Demarquilly (1981) ont proposé une méthode de séchage à l'étuve à 80 ou 100 °C, pendant 24 heures, avec facteurs de correction tenant compte de la volatilité des produits organiques. Petit *et al.* (1997) n'ont pas observé de différence significative entre la distillation au toluène et le séchage à l'étuve à 65 °C, pendant 3 jours, de 90 échantillons d'ensilage dont le contenu en matière sèche variait entre 19 et 65 %. Il est impossible d'enlever toute l'eau contenue dans un échantillon séché à de faibles températures (50 à 60 °C) ; environ 3 à 6 % d'eau demeure dans la matière, résultant en une surestimation de la teneur en matière sèche des aliments qui ne contiennent pas de produits volatils. En revanche, dans les produits fermentés, des estimations similaires du contenu en matière sèche sont obtenues par la distillation au toluène et le séchage à

l'étuve à 50 ou 60 °C, étant donné que les produits volatils perdus pendant le séchage sont compensés par l'humidité qui reste dans l'échantillon. Mertens (1992) conclut qu'un séchage à l'étuve à 55 °C, pendant 24 heures, serait un compromis raisonnable entre une estimation précise et une analyse de routine efficace de la teneur en matière sèche des aliments humides fermentés.

### pH

Le pH est l'indice exprimant l'activité de l'ion hydrogène dans une solution. Il varie entre 0 et 14. Un pH égal à 7 indique une solution neutre. Si le pH est inférieur à 7, la solution est acide ; s'il est supérieur à 7, la solution est alcaline. Le fourrage frais est légèrement acide ; il a un pH d'environ 6. Durant la fermentation, dans le cas des ensilages humides, il y a normalement une acidification (formation d'acide lactique) et une baisse du pH jusqu'à environ 4.

Dulphy et Demarquilly (1981) suggèrent qu'il existe un pH de stabilité, en dessous duquel les ferments butyriques ne peuvent se développer. Le pH de stabilité augmente avec la teneur en matière sèche de l'ensilage ; par exemple, il est de 4 pour un ensilage contenant 15 à 20 % de matière sèche et de 4,8 pour un ensilage contenant 35 à 40 % de matière sèche. Selon que le pH de l'ensilage est au-dessus ou en dessous du pH de stabilité, on peut estimer s'il y a eu activité des ferments butyriques et changement de la qualité pendant la conservation.

### Fractions protéiques

L'azote total, l'azote soluble et l'azote lié à la fibre ADF sont parfois mesurés pour décrire plus précisément la valeur alimentaire des fractions protéiques. Considérant que les protéines contiennent en moyenne 16 % d'azote, le contenu en protéines brutes est estimé en multipliant la teneur en azote total de l'ensilage par 6,25 (100/16). L'azote soluble est obtenu en dosant l'azote total dans le jus d'ensilage par la méthode Kjeldhal conventionnelle. D'une manière approximative, un ensilage a une bonne valeur si la proportion d'azote soluble est inférieure à 50 % de l'azote total. Il y a une corrélation significative entre l'azote soluble et l'azote ammoniacal ( $N-NH_3$ ), ce dernier pouvant aussi fournir une indication de la qualité de conservation. Le  $N-NH_3$  augmente lorsque les bactéries butyriques se développent. Dans un ensilage sans acide butyrique, la proportion de  $N-NH_3$  est inférieure à 5-7 % de l'azote total. L'azote lié à la fibre (N-ADF) est non digestible et indique le degré de chauffage de l'ensilage. Dans un fourrage de bonne qualité, le N-ADF est inférieur à 7 % de l'azote total ; il augmente lorsque l'ensilage chauffe.

## ADF

La composante fibreuse non soluble dans un détergent acide, communément appelée ADF (« Acid Detergent Fiber »), contient la cellulose, la protéine et les minéraux liés à la fibre, la protéine endommagée par la chaleur et la lignine. À partir du contenu en ADF du fourrage, on calcule le contenu en unités nutritives totales (UNT). Les UNT représentent une estimation de la matière sèche digestible et permettent de calculer le contenu en énergie métabolisable du fourrage (Tableau 1).

## NDF

La fraction fibreuse non soluble dans un détergent neutre, communément appelée NDF (« Neutral Detergent Fiber ») contient l'hémicellulose, la cellulose, la protéine et les minéraux liés à la fibre, la protéine endommagée par la chaleur et la lignine. En soustrayant le ADF du NDF, on estime l'hémicellulose. À partir du NDF, on peut estimer l'ingestion volontaire d'un fourrage.

Les proportions de fibres ADF et NDF d'un fourrage sont donc des indices de sa valeur alimentaire. La proportion de fibres ADF est généralement plus faible chez les légumineuses que chez les graminées ; elle augmente avec la maturité de la plante. Grâce à l'utilisation accrue de l'ensilage au détriment du foin sec et suite à une sensibilisation relativement à l'importance économique de la qualité des fourrages en production animale, la teneur moyenne en ADF des graminées cultivées au Québec est passée de 39,9 à 37,4 % alors que celle des légumineuses est passée de 38,2 à 33,9 % au cours des années 1980 (Bachand, 1995).

## Méthodes d'échantillonnage

Une méthode simple d'échantillonnage consiste à prélever du fourrage juste avant la mise en silo. Dans le cas du fourrage haché, on suggère de prendre quelques pelletées, lors du déchargement de certains wagons à ensilage provenant des mêmes champs, au cours de la même journée de récolte. Dans le cas du maïs fourrager, les feuilles relativement légères s'accumulent surtout dans les côtés et à l'arrière du wagon tandis que les tiges plus denses se concentrent au centre. Les différentes fractions de la plante sont de nouveau mélangées lors du déchargement. On recommande d'éviter d'échantillonner directement dans le wagon, mais de prélever plutôt vers le milieu du déchargement quand le mélange est homogène. On répète l'échantillonnage pour plusieurs wagons provenant d'un même champ et d'un même hybride de maïs.

Dans le cas du fourrage en grosses balles, il est avantageux d'utiliser une perceuse munie d'un foret allongé (au moins 500 mm), à grand diamètre creux (25 à 40 mm). Encore une fois, il est recommandé de mélanger plusieurs échantillons provenant de plusieurs balles récoltées dans les mêmes champs, le même jour. Idéalement, on doit préparer au moins un échantillon à envoyer au laboratoire d'analyse à chaque jour de récolte. Cet échantillon est obtenu en mélangeant tous les échantillons recueillis de plusieurs wagons ou balles. On doit prévoir un minimum de 10 à 15 échantillons par année pour bien représenter la variation d'un jour à l'autre (effet de maturité et des conditions de fanage), d'un champ à l'autre (effet d'espèce, de proportion graminées-légumineuses-mauvaises herbes, d'hybrides, de fertilisation et de types de sol) et d'une coupe à l'autre.

**Tableau 1. Comparaison du contenu énergétique d'ensilages pour des bovins de boucherie**

Espèce	Stade	Coupe	ADF (%)	Mesuré expérimentalement (Ouellet <i>et al.</i> , 1998) <sup>1</sup>			Calculé en se basant sur l'équation de McQueen et Martin (1981)				Calculé en se basant sur l'équation de Seoane <i>et al.</i> (1991)			
				EM <sup>2</sup>	ENe <sup>3</sup>	ENg <sup>4</sup>	UNT <sup>5</sup> (%)	EM <sup>2</sup>	ENe <sup>3</sup>	ENg <sup>4</sup>	UNT <sup>6</sup> (%)	EM <sup>2</sup>	ENe <sup>3</sup>	ENg <sup>4</sup>
				(MJ / kg)				(MJ / kg)				(MJ / kg)		
Fléole	Montaison	1	39,4	11,34	6,24	3,72	53,66	8,12	4,58	2,25	58,54	8,85	5,28	2,89
	Végétatif	2	36,8	11,55	6,36	3,81	57,05	8,63	5,06	2,70	62,11	9,39	5,77	3,34
Brome	Montaison	1	39,6	11,13	6,11	3,68	53,40	8,08	4,54	2,22	58,27	8,81	5,24	2,86
	Végétatif	2	35,1	10,88	5,98	3,60	59,26	8,96	5,38	2,98	64,44	9,75	6,09	3,63

<sup>1</sup> Adapté de Ouellet *et al.* (1998).

<sup>2</sup> Énergie métabolisable, EM (Mcal/kg) = 0,03615 %UNT (NRC, 1984).

<sup>3</sup> Énergie nette d'entretien, ENe (Mcal/kg) = 1,37 EM - 0,138 EM<sup>2</sup> + 0,0105 EM<sup>3</sup> - 1,12 (EM est en Mcal/kg, NRC 1984).

<sup>4</sup> Énergie nette de gain, ENg (Mcal/kg) = 1,42 EM - 0,174 EM<sup>2</sup> + 0,0122 EM<sup>3</sup> 1,65 (EM est en Mcal/kg, NRC 1984).

<sup>5</sup> Unités nutritives totales, UNT (%) = 140,96 - 1,302 %ADF (McQueen et Martin, 1981).

<sup>6</sup> UNT (%) = 112,6 - 1,372 %ADF (Seoane *et al.*, 1991).

Chaque échantillon préparé pour l'analyse au laboratoire doit être placé dans un sac de plastique, fermement scellé et réfrigéré avant d'être expédié dans les 48 heures suivant l'échantillonnage. Il ne faut pas congeler l'échantillon puisqu'il y a risque d'accroître la concentration de la fibre de 3 à 6 %, notamment dans le maïs fourrager (Undersander, 1997).

Les résultats d'analyse des fourrages fraîchement récoltés seront disponibles avant même que l'ensilage soit servi aux animaux. Le producteur aura alors le temps de balancer les rations, de planifier l'allocation de divers ensilages (d'une section de silo à l'autre ou d'un lot de balles rondes à l'autre) en fonction des besoins des différents groupes d'animaux et de prévoir l'achat de suppléments.

L'échantillonnage au moment de la mise en silo fournit la composition chimique du fourrage à la récolte. Toutefois, cela empêche de détecter des problèmes durant la fermentation. La matière sèche et la solubilité de la protéine sont des fractions qui peuvent changer sensiblement alors que les fibres ADF et NDF sont peu affectées lorsque l'ensilage est réalisé correctement. La composition chimique peut être modifiée si le fourrage est ensilé à un taux d'humidité trop élevé et s'il y a écoulement. Les pertes de protéines solubles et de sucres solubles peuvent occasionner une augmentation de la concentration des fibres. Si le fourrage est ensilé trop sec et que la température augmente à des niveaux trop élevés, le contenu en N-ADF augmente. De plus, la composition change lorsque le fourrage n'est pas ensilé rapidement, dans de bonnes conditions, et lorsque la fermentation ne se fait pas normalement. Dans de tels cas, l'échantillonnage doit être repris.

Pour prélever un échantillon d'ensilage dans un silotour au moment de la reprise, un contenant d'environ 10 litres est placé au-dessous de la chute pendant quelques secondes, afin de prélever 1 à 2 litres de matériel à la fois. L'exercice est répété 4 ou 5 fois, l'ensilage est bien mélangé puis un sous-échantillon d'environ 1 à 1,5 litre est préparé et envoyé au laboratoire. Dans un silo horizontal, environ 20 échantillons devraient être prélevés sur la face ouverte du silo, puis mélangés avant de prendre un sous-échantillon à envoyer pour fins d'analyse.

## Méthodes de prédiction de la valeur alimentaire

Le contenu en énergie brute d'un aliment peut facilement être mesuré ou calculé. Toutefois, cette valeur est quasi inutile ; elle varie peu d'un aliment à l'autre. La digestibilité des aliments, quant à elle, varie beaucoup. Ainsi, seulement une partie de la matière organique des aliments est disponible à l'animal. Des quantités variables et importantes d'énergie se per-

dent dans les fèces, l'urine, les gaz et la chaleur produits par l'animal. Différents termes, basés sur le type de pertes mesurées, expriment l'énergie. L'énergie digestible tient compte des pertes fécales seulement ; l'énergie métabolisable tient compte des pertes fécales, urinaires et gazeuses ; l'énergie nette tient compte de toutes les pertes incluant celles dues à la production de chaleur. Pour la plupart des aliments, l'efficacité de conversion de l'énergie brute en énergie digestible varie de 20 à 98 %. Lorsque l'énergie digestible est mesurée correctement, les autres formes d'énergie peuvent être estimées précisément.

L'utilisation des résultats de l'analyse des fibres ADF pour estimer le contenu énergétique des fourrages est contestée (Weiss, 1997). Il existe en effet plusieurs équations qui permettent de prédire l'énergie à partir de la teneur en ADF des fourrages. Ainsi, deux ou plusieurs laboratoires, qui utilisent des équations de prédiction différentes, peuvent produire différentes estimations du contenu énergétique pour une même teneur en fibres d'un fourrage.

Ouellet *et al.* (1998) rapportent que, chez les bovins de boucherie, les teneurs en énergie métabolisable (EM), en énergie nette d'entretien (ENE) et en énergie nette de gain (ENG) d'ensilages de fléole et de brome récoltés à Lennoxville (Québec) étaient sous-estimées respectivement de 25, 21 et 31 % par une équation de prédiction qui utilise la teneur en ADF des fourrages (McQueen et Martin, 1981). Une autre équation de prédiction (Seoane *et al.*, 1991) sous-estimait les teneurs en EM, ENE et ENG de ces ensilages de 18, 9 et 14 % respectivement (Tableau 1). Au Québec, ces deux dernières équations de prédiction sont présentement utilisées, ce qui fait qu'il est possible d'obtenir deux valeurs d'énergie pour une même valeur d'ADF selon le laboratoire d'analyse ou les logiciels de formulation utilisés.

Les équations de prédiction sont basées sur le fait qu'il existe une relation inverse proportionnelle entre la teneur en fibres ADF d'une part et la digestibilité et le contenu énergétique d'autre part. Cette hypothèse n'est pas toujours vraie ; par exemple la digestibilité de la fibre varie avec la maturité de la plante, les conditions de croissance, l'espèce et les cultivars étudiés. La corrélation entre les teneurs en fibres de la luzerne et des mélanges graminées/légumineuses et la digestibilité de la matière sèche est typiquement de 0,8 ou moins (Combs *et al.*, 1996). Undersander (1997) rapporte que la digestibilité *in vitro* de la matière sèche du maïs fourrager pouvait varier de 8 unités de pourcentage pour un même niveau de fibres ADF. Une estimation de la digestibilité reflète donc beaucoup plus précisément l'énergie disponible qu'une estimation basée sur la teneur en fibres ADF.

La mesure de la digestibilité est une technique difficile à réaliser sur une base routinière. Elle exige le maintien d'animaux munis d'une fistule pour le prélèvement

régulier de liquide du rumen. De plus, étant une mesure biologique, la digestibilité peut varier entre plusieurs analyses du même échantillon. Les méthodes *in vitro*, *in sacco* et *in vivo* de mesure de la digestibilité sont améliorées lorsqu'elles tiennent compte du taux de digestion et du temps de rétention du fourrage dans le rumen. Les ruminants hautement productifs ne retiennent pas les fourrages aussi longtemps dans leur système digestif que les animaux moins productifs. Un fourrage rapidement digestible peut profiter davantage à une vache laitière hautement productrice dont le temps de rétention du fourrage dans le rumen est d'environ 30 heures. En revanche, un fourrage moins rapidement digestible profitera davantage à une génisse en croissance ou à un bouvillon dont le temps de rétention joue autour de 48 heures.

La matière sèche d'un fourrage est divisée en trois catégories basées sur la vitesse de digestion dans le rumen des animaux de boucherie : la matière sèche soluble ou rapidement digestible (fraction A), la matière sèche lentement digérée (fraction B) et la matière sèche non digestible (fraction C). Ces différentes fractions sont alors associées à des prédictions du temps de rétention dans le rumen afin d'estimer l'énergie disponible du fourrage pour chaque catégorie d'animaux.

## Une nouvelle méthode d'analyse : la spectroscopie dans le proche infrarouge

L'évaluation directe du taux de digestion n'est pas pratique pour les laboratoires commerciaux. Le coût, le temps, les nombreuses répétitions et les grandes quantités de fourrage nécessaires à la conduite de telles analyses en sont les raisons. Une approche alternative proposée consiste à prédire les caractéristiques de digestion des fourrages par spectroscopie dans le proche infrarouge (SPIR ou NIRS, « Near Infrared Reflectance Spectroscopy »). Cette technologie, développée dans le milieu des années 1970, a révolutionné les analyses des fourrages. Cette méthode d'analyse rapide, précise et peu dispendieuse est en grande partie responsable de l'augmentation importante du nombre d'échantillons analysés en Amérique du Nord (Undersander et Martin, 1997).

La SPIR utilise la réflexion de la lumière pour mesurer la composition chimique de la matière organique. La lumière est définie comme étant un spectre d'ondes de différentes longueurs. La partie visible du spectre lumineux varie du violet, avec les plus courtes longueurs d'ondes, au rouge qui correspond à des longueurs d'ondes plus longues. Par exemple, un objet est de couleur verte à l'oeil humain parce qu'il reflète le vert et absorbe toutes les autres couleurs de la lumière. Le proche infrarouge est la partie du spectre lumineux dont les longueurs d'ondes sont légèrement plus lon-

gues que la partie visible. Le degré d'absorption ou de réflexion de la lumière dans le proche infrarouge est déterminé par le type et le nombre de liens chimiques du produit examiné. Tout comme les objets, les protéines absorbent certaines longueurs d'ondes et en reflètent d'autres, alors que la cellulose possède un spectre d'absorption et de réflexion différent. C'est ce qui fait de la SPIR un outil très puissant d'analyse des composantes organiques d'un produit.

Au cours des cinq dernières années, cette technologie a bénéficié d'importantes améliorations. La normalisation des instruments représente la première. Auparavant, un échantillon analysé avec deux appareils différents, utilisant la même équation de prédiction, pouvait fournir des valeurs différentes, en raison des variations entre instruments. Martin *et al.* (1991) ont montré que les appareils pouvaient être normalisés entre plusieurs laboratoires. Lorsqu'une lampe est remplacée ou un appareil est réparé, l'instrument peut être normalisé de nouveau et les anciennes équations peuvent toujours servir. De plus, les équations de prédiction peuvent maintenant être développées à partir d'un grand nombre d'échantillons provenant de plusieurs laboratoires. Ces équations sont désormais disponibles pour tous les instruments normalisés et la duplication des résultats est excellente. Le coût de développement des équations peut ainsi être partagé par plusieurs laboratoires. Auparavant, chaque laboratoire devait développer ses propres équations afin d'obtenir de meilleurs résultats ; les équations ainsi développées tenaient compte des différences de procédures et des erreurs propres à chaque laboratoire. L'utilisation de nouvelles méthodes statistiques de prédiction a aussi contribué à l'amélioration de cette technologie. Les nouveaux logiciels de développement d'équations utilisent plus de longueurs d'ondes qu'auparavant, améliorant ainsi la précision et la robustesse des prédictions. Enfin, la prochaine génération de logiciels utilisera des bases de données plutôt que des équations. Après avoir établi le spectre de l'échantillon, le logiciel sélectionnera deux spectres de sa base de données s'en rapprochant le plus, puis positionnera le spectre de l'échantillon entre ces deux derniers pour prédire les variables désirées. Dans cette approche, la précision de la prédiction sera limitée seulement par le nombre d'échantillons dans la base de données.

Plusieurs travaux montrent que la SPIR a un potentiel intéressant dans la prédiction des caractéristiques nécessaires à l'estimation de la digestibilité des fourrages (Combs *et al.*, 1996). Une équipe de recherche de l'Université du Wisconsin travaille présentement à développer des équations de prédiction afin d'estimer le taux de digestion et les fractions rapidement digestible (fraction A), partiellement digestible (fraction B) et non digestible (fraction C) des fourrages. Ces quatre paramètres vont permettre le calcul de la digestibilité d'un fourrage pour un type spécifique d'animal, sous des conditions particulières d'alimentation. Ces tra-

vaux de développement nécessitent le maintien de 3 ou 4 animaux fistulés et d'un technicien à plein temps pour 2 à 3 ans. Ainsi, des paramètres de digestibilité estimés par SPIR devraient être disponibles au cours des prochaines années.

## ENSILAGES À PROBLÈMES

La qualité de l'ensilage dépend de la régie appliquée avant, pendant et après la période de fermentation. Les facteurs de régie sur lesquels le producteur a un certain contrôle sont : 1) la maturité du fourrage et l'humidité à la récolte, 2) les méthodes de récolte et de mise en silo, 3) le type de structure d'entreposage, 4) les additifs à ensilages, 5) les méthodes de reprise de l'ensilage et 6) la formulation des rations.

Le stade de maturité adéquat de la plante, lors de la récolte, permet de maximiser la quantité de sucres fermentescibles disponibles aux microorganismes présents dans l'ensilage. La maturité a un impact majeur sur le taux d'humidité de la récolte, surtout chez les plantes ensilées directement après la fauche, sans séchage, comme l'ensilage de maïs par exemple. En contrôlant la maturité, on s'assure d'une source de fourrage ayant un niveau acceptable de fibres.

Tout comme pour la maturité, le taux d'humidité recommandé à la récolte varie en fonction de l'espèce végétale et du type d'entreposage. Un taux d'humidité adéquat aide au compactage du fourrage, favorisant ainsi l'anaérobiose. Un trop faible taux d'humidité peut favoriser le développement de levures et de moisissures alors qu'un excès d'humidité peut mener à des problèmes d'effluent ou de fermentation prolongée associée à des niveaux élevés d'acides et de protéolyse.

## Mycotoxines

### Effets sur la production animale

La plupart des champignons sont relativement inoffensifs puisqu'ils ne font que réduire la productivité ou la valeur nutritive du matériel végétal qu'ils infectent. Cependant, quelques champignons produisent des composés chimiques toxiques, appelés mycotoxines. Il s'agit de composés organiques complexes, produits par un champignon pathogène afin d'accroître sa compétitivité sur les autres microorganismes et d'accroître « sa part du gâteau » des substrats disponibles pour sa croissance. Lorsque ces mycotoxines deviennent plus concentrées (10 à 20 parties par milliard, ppb), elles peuvent être cancérogènes ou causer des problèmes respiratoires tant chez l'animal que chez l'humain.

En faibles concentrations, les mycotoxines peuvent causer, chez les bovins, une diminution de la prise alimentaire, du gain de poids et de la production laitière ainsi qu'une augmentation des problèmes de reproduction. Gotlieb (1997) suggère que les problèmes reliés aux mycotoxines dans les aliments du bétail ont augmenté au cours des 25 dernières années, notamment chez la vache laitière. Sa consommation quotidienne a pratiquement doublé alors que sa grosseur a augmenté beaucoup moins rapidement. Il en résulte un accroissement de la production laitière mais aussi, de façon indirecte, une augmentation de la dose de toxines ingérées par unité de poids de l'animal. L'augmentation de la concentration de toxines et l'augmentation du stress relié à une productivité accrue pourraient expliquer la plus grande fréquence des problèmes associés aux mycotoxines.

Les moisissures telles que *Aspergillus* sp., *Fusarium* sp. et *Penicillium* sp. sont identifiées comme les plus importants champignons producteurs de mycotoxines dans les ensilages. *Aspergillus* sp. produit des aflatoxines. *Fusarium* sp. produit plusieurs toxines telles que le désoxynivalénol (DON ou vomitoxine), le zéaralénone, la toxine T-2 et la fumonisine. Les moisissures de type *Penicillium* sp. produisent des ochratoxines. La présence de plusieurs autres mycotoxines, produites par ces moisissures, par d'autres moisissures ou par des dérivés de toxines, a aussi été rapportée.

### Aflatoxines

Les aflatoxines sont des substances cancérogènes retrouvées dans plusieurs végétaux (arachides, grains de maïs, autres grains) conservés dans des conditions chaudes (supérieures à 30 °C) et humides. Gotlieb (1997) observe que, pour un climat frais comme celui du Vermont (on peut extrapoler au Québec), on retrouve le champignon *Aspergillus* sp., sans toutefois noter la présence des aflatoxines. Dans le sud des États-Unis, cette toxine est plus importante et une attention particulière doit être accordée au maïs fourrager conservé dans des conditions chaudes. L'importation de grains provenant d'autres régions devrait toujours être soumise à l'inspection pour la présence de mycotoxines.

Si les animaux consomment des aliments contaminés, des résidus d'aflatoxines se retrouvent dans leurs tissus et dans le lait. C'est pourquoi les bovins de boucherie doivent être alimentés avec des rations exemptes d'aflatoxines pendant au moins trois semaines avant l'abattage. Chez le bovin laitier, le niveau d'aflatoxines dans le lait doit être inférieur à 0,5 ppb. Puisqu'on considère que la concentration dans le lait représente environ 1,7 % de la concentration dans la ration (base matière sèche), un niveau inférieur à 30 ppb devrait être respecté. Aucun niveau d'aflatoxines n'est considéré comme sécuritaire, mais on

estime généralement que les performances et la santé générale de l'animal sont affectées lorsqu'ils sont de beaucoup supérieurs à ceux causant l'apparition de résidus dans le lait (25 à 50 ppb). Des niveaux de 300 à 700 ppb sont considérés toxiques pour les bovins de boucherie. Le degré de toxicité est fonction de la concentration d'aflatoxines, de la durée d'alimentation ainsi que du niveau de stress affectant l'animal. Des niveaux de 100 ppb peuvent affecter les performances des bovins laitiers surtout si l'aliment contaminé est servi pendant de longues périodes et si le niveau de stress entourant l'animal est élevé. Les aliments naturellement contaminés par les aflatoxines sont généralement beaucoup plus toxiques que ceux auxquels est ajoutée une quantité semblable d'aflatoxines pures. Parmi les symptômes associés aux aflatoxines, on reconnaît la baisse de production laitière et des performances de reproduction, l'augmentation de l'incidence des problèmes d'avortement, de morbidité, de naissance de petits veaux ou de veaux faibles, de diarrhée, d'hémorragie, de nécrose au niveau du foie et de faibles concentrations sanguines de vitamine A (Whitlow et Hagler, 1997).

### Désoxynivalénol (DON ou vomitoxine)

Chez le bovin, la présence de vomitoxine est associée à une réduction de la prise alimentaire et de la production laitière (Whitlow et Hagler, 1997). Le DON est probablement la mycotoxine la plus couramment détectée, la plus répandue au Québec (Bilodeau, 1995) et un indicateur de la présence d'autres mycotoxines dans l'aliment. Les aliments naturellement contaminés par le DON sont généralement plus toxiques que les aliments auxquels est ajouté du DON pur. D'autres toxines seraient présentes dans les aliments naturellement contaminés, ce qui augmenterait d'autant leur toxicité. Charmley *et al.* (1993), dans le cadre d'une expérience menée à Ottawa, rapportent en effet une absence de différence statistiquement significative dans les paramètres de production de 18 vaches laitières, alimentées avec des rations contenant 0, 2680 ou 6400 ppb de DON pur. Cependant, la production laitière corrigée ou non à 4 % de matière grasse et la production de gras dans le lait étaient respectivement de 6, 13 et 21 % plus faibles chez les animaux nourris avec des rations contenant du DON. On considère généralement que des niveaux de 300 à 500 ppb de DON sont une indication d'aliments problématiques même si ces niveaux ne sont pas toxiques en soi.

### Toxine T-2

Cette autre toxine produite par *Fusarium* sp. n'a été retrouvée que dans une faible proportion d'aliments (3 à 5 %) analysés aux États-Unis au cours des sept dernières années. Les observations chez le bovin sont limitées ; toutefois cette toxine serait un irritant très sévère du tractus gastro-intestinal, causant des maux

gastriques, de la diarrhée, des hémorragies et la nécrose du tractus intestinal. Les données actuelles ne permettent pas d'établir de niveaux de tolérance, mais les rations dont la toxine T-2 excède 100 ppb méritent une attention particulière (Whitlow et Hagler, 1997).

### Zéaralénone (F-2)

Le zéaralénone est une mycotoxine produite par *Fusarium* sp. et elle influence l'œstrus chez les ruminants. Des niveaux relativement faibles de cette toxine (400 ppb) sont associés à des problèmes de fertilité des troupeaux laitiers. Des niveaux alimentaires de 750 ppb de zéaralénone et de 500 ppb de DON provoquent une baisse de la consommation et de la production laitière, la diarrhée et de faibles performances de reproduction. D'autres symptômes comme des vaginites, des sécrétions vaginales accrues, de faibles taux de conception, une enflure de la glande mammaire chez les génisses et des infections accrues du tractus reproducteur sont associés à cette toxine. À des doses élevées, le zéaralénone provoquerait l'avortement.

Étant donné le peu de données disponibles, il est difficile d'établir des niveaux de toxicité du zéaralénone, mais tout comme pour le DON, la présence de cette toxine serait un indice que l'aliment en question est potentiellement toxique. Il faudrait porter une attention particulière aux rations dont les niveaux de zéaralénone sont au-dessus de 200 à 300 ppb.

Plusieurs autres mycotoxines peuvent affecter les ruminants ; elles sont toutefois moins fréquentes ou moins violentes. Le diacétoxyscirpérol, la toxine HT-2 et le néosolaniol peuvent être rencontrés avec la toxine T-2 et causer des symptômes similaires. La fumonisine est moins violente que les autres mycotoxines mais elle peut affecter les bovins lorsque présente en grandes quantités. Les ochratoxines peuvent aussi affecter les ruminants mais elles sont rapidement dégradées dans le rumen. Elles affecteraient davantage les pré-ruminants.

### Méthodes de diagnostic

La quantité de mycotoxines présente dans l'ensilage varie en fonction du type d'entreposage. Elle a tendance à augmenter lorsque l'étanchéité du silo diminue. Les concentrations en mycotoxines les plus élevées sont généralement rencontrées dans les ensilages provenant de silos horizontaux laissés en contact avec l'air. Dans tous les cas rapportés, une mauvaise gestion, favorisant la présence d'oxygène dans l'ensilage, était observée. L'ensilage de silos horizontaux bien recouverts d'une toile plastique et de pneus ne contenait pas plus de toxines que l'ensilage de silos verticaux (Gotlieb, 1997). Bien que la production de toxines soit principalement influencée par la tem-

pérature et l'humidité, il faut de l'oxygène pour déclencher cette production ; l'absence d'oxygène empêche généralement la production de toxines.

Le prélèvement d'un échantillon représentatif pour doser les mycotoxines est difficile puisque les moisissures peuvent produire une très grande quantité de toxines sur une petite surface. La concentration peut donc varier énormément à l'intérieur d'un lot d'ensilage. Malone et Romer (1997) suggèrent de préparer, pour analyse, une dizaine d'échantillons de 100 g provenant d'une cinquantaine de pelletées de 500 g réparties sur 25 tonnes.

Puisque des mycotoxines peuvent être produites après l'échantillonnage, on doit sécher (< 60 °C) ou congeler les échantillons et les expédier rapidement au laboratoire. Au Québec, il est possible de faire analyser des échantillons d'ensilages ou de grains, pour leurs contenus en diverses mycotoxines, auprès de la Direction des laboratoires d'expertises et d'analyses alimentaires du MAPAQ. L'analyse de base (62 \$ par échantillon) comprend le dosage de la vomitoxine et des toxines T-2 et HT-2. Le zéaralénone, les aflatoxines et les ochratoxines peuvent aussi être analysés (30 \$ par paramètre additionnel par échantillon).

Il existe des trousse commerciales permettant le dosage qualitatif des mycotoxines (Bilodeau, 1995 ; Malone et Romer, 1997) au coût d'environ 10 à 15 \$ par échantillon. Ces trousse ont l'avantage d'être rapides et peu dispendieuses ; par contre, elles ne font que détecter la présence d'une mycotoxine sans en donner la concentration. De plus, une trousse différente doit être utilisée pour chaque mycotoxine. Avec ces trousse, il arrive que le dépistage soit erroné à cause de l'interférence de certains produits de fermentation sur la colorimétrie (un changement de couleur indique la présence ou l'absence de toxines).

## Correctifs

Il n'existe pas de méthodes pratiques et économiques pour décontaminer du fourrage riche en mycotoxines. Certains producteurs utilisent, avec succès, de l'argile bentonite. Il semble que l'argile fixe les toxines (phénomène d'adsorption). En jouant le rôle d'un adsorbant, l'argile entraîne les toxines dans les excréments et minimise leur effet sur le système digestif. Toutefois, la bentonite n'a pas toujours donné de bons résultats (Gotlieb, 1997). En général, il vaut mieux prévenir la présence et la croissance de champignons par diverses mesures au champ et au silo.

## Recommandations

Voici une série de recommandations pour réduire le risque de contamination de l'ensilage par des mycotoxines.

- Dans le maïs fourrager, les moisissures peuvent croître au champ pendant l'été. Le travail minimal du sol favorise la présence et le développement des moisissures en raison du chaume laissé en surface. L'achat d'hybrides de maïs plus résistants aux infestations de moisissures et le labour traditionnel sont des moyens de contrôle.
- On devrait récolter au stade et au taux d'humidité recommandés pour le système d'entreposage. Le maïs semé tardivement au printemps et récolté tard à l'automne a tendance à contenir plus de mycotoxines. Il faut utiliser des hybrides à maturité adaptée à la zone climatique. De plus, on doit éviter de laisser le maïs au champ longtemps après une gelée. Le maïs gelé se dessèche et devient plus difficile à fouler au moment de la mise en silo ; l'oxygène résiduel dans le silo s'épuise plus lentement et les champignons peuvent croître et produire des toxines pendant plusieurs jours.
- Les couteaux de la fourragère doivent être bien affûtés et la barre de cisaillement bien ajustée, afin d'obtenir un hachage fin et un foulage maximal. Une récolte rapide, un foulage adéquat (dans le cas d'un silo horizontal) et un silo étanche minimiseront le développement des champignons.
- Il faut jeter le fourrage contaminé. Puisque les mycotoxines sont solubles dans l'eau, il faut éviter de laisser la pluie rincer la couche supérieure et ainsi répandre la contamination.
- On doit enlever régulièrement les refus laissés dans les mangeoires et nettoyer les aires d'alimentation.
- On peut envisager l'utilisation d'un additif lorsque les conditions de fermentation ne sont pas optimales. L'ammoniaque, l'acide propionique, l'acide formique et certains additifs microbiologiques ou enzymatiques peuvent inhiber la croissance des champignons dans l'ensilage mais ils ne font rien contre les mycotoxines produites au champ et récoltées avec la culture.
- Le dimensionnement du silo en fonction du nombre d'animaux permet d'avoir un taux de reprise suffisamment rapide. Il faut prévoir une reprise quotidienne d'au moins 50 mm dans les silos-tours, 100 à 150 mm dans les silos horizontaux et 200 à 300 mm dans les silos-meules. Dans les silos horizontaux, on doit toujours vider du haut vers le bas afin de minimiser l'entrée d'oxygène dans la masse d'ensilage. Le taux de reprise devrait être plus élevé en saison chaude.
- Face à un problème de toxicité, on doit remplacer la ration soupçonnée d'être contaminée par une nouvelle ration saine. Si on manque d'aliments de remplacement, on peut envisager l'utilisation d'un adsorbant à base d'argile et l'introduction partielle d'un aliment sain pour diluer la ration contaminée. Il

faut analyser tous les aliments de la ration pour leur contenu en mycotoxines puisque celles-ci peuvent être dans les grains plutôt que dans l'ensilage.

- Il faut entreposer les grains humides au bon taux d'humidité et dans des structures étanches. Les aliments secs comme le grain et le foin doivent être entreposés dans un endroit bien aéré.

4. La présence de mycotoxines est un exemple de problème pouvant survenir avec les aliments humides mal conservés. Une série de bonnes pratiques peuvent minimiser leur présence. En gros, on doit viser l'expulsion rapide de l'oxygène à la mise en silo, le maintien de l'étanchéité pendant l'entreposage et une exposition à l'air de courte durée pendant l'alimentation des ensilages.

## CONCLUSIONS

1. Pour obtenir une bonne fermentation, il faut d'abord contrôler la teneur en eau du fourrage (entre 40 et 70 % selon le mode d'entreposage). La concentration de sucres solubles varie entre 5 et 18 % selon la plante. On peut augmenter cette concentration par l'ajout de mélasse ou en favorisant la conversion d'amidon et de cellulose en sucres simples (sous l'action d'enzymes). L'ajout d'acides ou de microorganismes (ferments lactiques) modifie la fermentation. Certains traitements mécaniques accélèrent le séchage au champ (conditionnement intense) ou accroissent la surface de développement des microorganismes (hachage, broyage), ce qui favorise généralement une bonne fermentation lactique.
2. Il existe diverses méthodes d'entreposage des ensilages. On doit tenir compte du coût, de la qualité et des pertes pendant l'entreposage, de la sécurité des employés à la mise en silo et à la reprise, de la grosseur du troupeau à alimenter et des préférences personnelles du producteur. À long terme, on s'attend à ce que les silos horizontaux deviennent la méthode préférée, en particulier pour les grands élevages. Pour les plus petits élevages bovins, l'ensilage de grosses balles est intéressant en raison de sa flexibilité et du faible coût d'investissement.
3. La mesure de la qualité des ensilages commence par un échantillonnage représentatif. Les échantillons sont souvent prélevés à la mise en silo de sorte que les résultats d'analyse sont disponibles avant de servir l'ensilage aux animaux. Si la fermentation a lieu dans de bonnes conditions, les résultats d'analyse caractérisent bien la valeur alimentaire des ensilages. Par contre, dans des conditions défavorables de fermentation, la composition chimique des ensilages peut varier par rapport au fourrage frais et l'échantillonnage devrait être repris. La matière sèche, le pH, l'azote soluble, l'azote ammoniacal ( $N-NH_3$ ), l'azote lié à la fibre (N-ADF), l'ADF et le NDF sont des exemples d'analyses qui aident à caractériser la valeur des ensilages. Des valeurs de digestibilité et d'énergie estimées par la spectroscopie dans le proche infrarouge seront disponibles dans un avenir prochain, ce qui améliorera encore l'estimation de la valeur des ensilages.

## RÉFÉRENCES

- Bachand, C. 1995.** L'estimé de l'énergie des fourrages : une question d'équation. Colloque sur l'analyse des aliments du bétail. Conseil des productions animales du Québec inc. P. 79-93.
- Beaulieu, R., J.R. Seoane, P. Savoie, D.Tremblay, G.F. Tremblay et R. Thériault. 1993.** Effects of dry-matter content on the nutritive value of individually wrapped round-bale timothy silage fed to sheep. Canadian Journal of Animal Science 73 : 343-354.
- Bilodeau, M. 1995.** Les mycotoxines : incidence et analyses. Colloque sur l'analyse des aliments du bétail. Conseil des productions animales du Québec inc. P. 45-62.
- Bolsen. 1997.** Issues of top spoilage losses in horizontal silos. Proceedings from the North American Silage Conference :137-150. NRAES Publication 99, Cooperative Extension, Ithaca, NY 14853-5701.
- Charmley, E., H.L. Trenholm, B.K. Thompson, D. Vudathala, J.W.G. Nicholson, D.B. Prelusky et L.L. Charmley. 1993.** Influence of level of deoxynivalenol in the diet of dairy cows on feed intake, milk production and its composition. J. Dairy Sci. 76 : 3580-3587.
- Charmley, E., P. Savoie et R.E. McQueen. 1997.** Influence of maceration at cutting on lactic acid bacteria populations, silage fermentation and voluntary intake and digestibility of precision-chopped lucerne silage. Grass and Forage Science 52 : 110-121.
- Combs, D.K., E.P. Beyer Neumann, D.J. Undersander, P.C. Hoffman, N.P. Martin et J.G. Linn. 1996.** Using near infrared spectroscopy to predict available energy of forages. Proceedings of the 1996 National Forage Testing Association Workshop. June 10-12. Omaha, NE. P. 25-31.
- CPVQ. 1989.** Plantes fourragères, culture. Deuxième édition. Conseil des productions végétales du Québec inc. 249 p.
- Dulphy, J.P. et C. Demarquilly. 1981.** Problèmes particuliers aux ensilages. Dans : Prévisions de la valeur nutritive des aliments des ruminants, INRA Publi., 81-104.

- Genest, J., A. Amyot, R. Caron, J.-N. Couture, J. Lachance, S. Poussier, M. Quevillon, D.D. Rony et P. Savoie. 1990.** L'ensilage de balles rondes. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation, Québec. 107 p.
- Gotlieb, A. 1997.** Causes of mycotoxins in silages. Proceedings from the North American Silage Conference :213-221. NRAES Publication 99, Cooperative Extension, Ithaca, NY. 14853-5701.
- Harrison, J.H., L. Johnson, C. Hunt, J. Siciliano-Jones et K.J. Shinners. 1997.** Use of kernel-processed silage in dairy rations. Proceedings from the North American Silage Conference : 95-110. NRAES Publication 99, Cooperative Extension, Ithaca, NY. 14853-5701.
- Leduc, R., A. Fournier, S. Payant et C. Blais. 1997.** Le maïs-ensilage, un atout. 21<sup>e</sup> Symposium sur les bovins laitiers. Conseil des productions animales du Québec inc. P. 15-47.
- Malone, B.R. et T.M. Romer. 1997.** Using laboratory tests to effectively diagnose mycotoxin problems in silage. Proceedings from the North American Silage Conference : 233-241. NRAES Publication 99, Cooperative Extension, Ithaca, NY. 14853-5701.
- Martin, N.P., D. Undersander, J.S. Shenk, M. Matteson, D. Pelech, J.L. Halgerson et J. Linn. 1991.** An evaluation of a pilot NIRS forage analytical system in Minnesota and Wisconsin. *Dans Proc. National Forage Testing Association Forage Analysis Workshop*. May 7 and 8. Milwaukee, WI. Extension Services of Wisconsin and Minnesota and USDA-ARS NIRS network. P. 40-47.
- McDonald, P., A.R. Henderson et S.J.E. Heron. 1991.** The Biochemistry of Silage. Second Edition. 340 pages. Chalcombe Publications, Marlow, Buckinghamshire SL7 3PU.
- McQueen, R.E. et J.P. Martin. 1981.** Laboratory evaluation of nutritional quality of forages. *Dans : Laboratory evaluation of farm grown forages. ECAN Workshop proceedings*, Winnipeg, MB. P. 1-13.
- Mertens, D.R. 1992.** Determining dry matter in diverse types of feeds. Proceeding of the National Forage Testing Association (NFTA) workshop, Denver, Colorado. P. B1-B13.
- NRAES. 1993.** Silage Production - From Seed to Animal. Proceedings from the National Silage Conference. Publication No. 67. Northeast Regional Agricultural Engineering Services, Ithaca, NY. 14853-5701.
- NRAES. 1997.** Silage : Field to Feedbunk. Proceedings from the North American Silage Conference. Publication No. 99. Northeast Regional Agricultural Engineering Services, Ithaca, NY. 14853-5701.
- NRC. 1984.** Nutrient Requirements of Beef Cattle, 6<sup>th</sup> Rev. Ed. National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.
- Ouellet, D.R., J.R. Seoane, H. Lapierre, P. Flipot et J.F. Bernier. 1998.** Net energy value of timothy and bromegrass silages for beef cattle. *Can. J. Anim. Sci.* 78 :107-114.
- Petit, H.V., C. Lefrenière et D.M. Veira. 1997.** A comparison of methods to determine dry matter in silages. *J. Dairy Sci.* 80 :558-562.
- Roberge, M., P. Savoie et E.R. Norris. 1998.** Evaluation of a crop processor in a pull-type forage harvester. *Transactions of the ASAE* 41(4) (sous presse).
- Savoie, P., D. Tremblay, E. Charmley et R. Thériault. 1996.** Round bale ensilage of intensively conditioned forage. *Canadian Agricultural Engineering* 38(4) : 257-263.
- Savoie, P. 1997.** Kernel processing : history and engineering. Proceedings from the North American Silage Conference : 85-94. NRAES Publication 99, Cooperative Extension, Ithaca, NY. 14853-5701.
- Savoie, P. 1998a.** Le surconditionnement des fourrages : passé, présent et avenir. Demi-journée d'information scientifique sur les fourrages, 20 février. CPVQ. inc., Québec. P. 23-34. Distribué par le CQPF, 2560 boul. Hochelaga, Sainte-Foy, Québec G1V 2J3.
- Savoie, P. 1998b.** Systèmes d'entreposage des ensilages. Colloque sur les plantes fourragères, 17 et 18 novembre 1998, Alma et Sherbrooke. Conseil des productions végétales du Québec inc.
- Seoane, R., C. Beaulieu, J. Florez et D. Dupuis. 1991.** Evaluation of the nutritive value of grass hays for growing sheep. *Can. J. Anim. Sci.* 71 :1135-1147.
- Shinners, K.J. 1997.** Equipment for forage harvesting : what to look for and how to optimize its performance. Proceedings from the North American Silage Conference :69-84. NRAES Publication 99, Cooperative Extension, Ithaca, NY. 14853-5701.
- Statistique Canada. 1997.** Profil agricole du Québec (Recensement 1996). No. 95-176-XPB au catalogue. Ministre de l'Industrie, Ottawa, K1A 0T6.
- Straub, R.J., R.G. Koegel, L.D. Satter et T.J. Kraus. 1996.** Evaluation of a corn silage processor. American Society of Agricultural Engineers paper no. 961033. St. Joseph, MI : ASAE.
- Undersander, D. 1997.** Perspectives on forage sampling, handling and analysis. Proceedings from the North American Silage Conference : 262-267. NRAES Publication 99, Cooperative Extension, Ithaca, NY. 14853-5701.

**Undersander, D. et N. Martin. 1997.** What is NIR and where is it going ? Proceedings from the North American Silage Conference : 89-294. NRAES Publication 99, Cooperative Extension, Ithaca, NY. 14853-5701.

**Weiss, W.P. 1997.** Improved methods of estimating digestibility and energy values in forages. Proceedings from the North American Silage Conference : 279-288.

**NRAES Publication 99.** Cooperative Extension, Ithaca, NY. 14853-5701.

**Whitlow, L.W. et W.M. Hagler, Jr. 1997.** Effects of mycotoxins on the animal : the producer's perspective. Proceedings from the North American Silage Conference : 222-232. NRAES Publication 99, Cooperative Extension, Ithaca, NY. 14853-5701.

