

Cet article de la revue **Fourrages**,
est édité par l'Association Française pour la Production Fourragère

Pour toute recherche dans la base de données
et pour vous abonner :

www.afpf-asso.org

Récolte précoce et conservation en ensilage des mélanges céréaliers riches en protéagineux

A. Uijtewaal¹, I. Joulié², D. Delbecque³, A. Fesneau³,
G. Fortino³, T. Jeulin³, F. Olivier³

Depuis quelques années, des éleveurs mettent en place des mélanges comportant une part importante de protéagineux (féverole, pois). Avec plus de 40 % de la MS en légumineuses et en récoltant précocement sous forme d'ensilage, la ressource fourragère est riche en protéines... mais aussi très riche en eau, ce qui pose des problèmes spécifiques de conservation.

RÉSUMÉ

Les particularités morphologiques des légumineuses ainsi que l'architecture dense du couvert freinent le préfanage au champ ; il est difficile d'atteindre une teneur de 30 à 35 % MS à l'entrée du silo. Le risque des pertes est alors important : pertes de matière organique digestible (par jus), de protéines (action des enzymes et des bactéries protéolytiques) mais aussi financières (pénalités de rémunération du lait en cas de détection de butyriques). Au champ, tout doit être fait pour faciliter le séchage en limitant la contamination du fourrage par des particules de terre. Diverses chaînes de récolte sont analysées. Le recours aux conservateurs tels que les acides organiques et les bactéries lactiques homofermentaires apparaît comme une solution technique à étudier.

SUMMARY

Early harvest and preservation of silage made from mixtures containing grains and large proportions of protein crops

Over the last several years, livestock farmers have been starting to use forage mixtures containing large proportions of protein crops (faba bean, pea). This type of forage is protein rich when harvested early and made into silage -it contains more than 40% legume-based DM. However, its water content is also high, which can make preservation problematic. Legumes have unique morphological traits and create a cover in the field which interferes with pre-wilting; it is difficult to attain 30-35% DM at the start of silo storage. The risk of losses is high. In the field, drying must be facilitated while limiting contamination by dirt particles. Here, different harvesting procedures are evaluated. It is important to further research the use of preservatives such as organic acids and homofermentative lactic acid bacteria.

En quête d'autonomie fourragère et protéique, de plus en plus d'éleveurs implantent des mélanges comportant une forte proportion de légumineuses (supérieure à 40 % de la matière sèche récoltée) dans le but de les récolter précocement en ensilage. Parmi les légumineuses, on retrouve essentiellement la féverole, le pois fourrager mais également des vesces. Les autres espèces composant les mélanges sont le plus souvent des céréales à paille. Pour illustrer la forte proportion de protéagineux, ces mélanges sont dans la suite de ce document appelés MCPI+, pour Mélanges Céréales-

Protéagineux Immatures riches en protéagineux. Les MCPI+ ont le plus souvent un statut de cultures dérochées puisqu'ils s'intercalent entre une culture récoltée durant l'été ou l'automne et une culture implantée au printemps suivant. Il arrive également qu'une prairie soit implantée sous couvert de ces mélanges.

Par rapport aux mélanges céréales-protéagineux composés en majorité de céréales à paille et récoltés au stade laiteux-pâteux de ces dernières, les repères pour réussir la récolte et la conservation des MCPI+ sont bouleversés. Ces dérochées sont récoltées plus précocement

AUTEURS

1 : Arvalis - Institut du végétal, Station expérimentale de La Jaillière, F-44370 La-Chapelle-Saint-Sauveur ; A.Uijtewaal@arvalis.fr

2 : Lallemand SAS, 19, rue des Briquetiers, F-31702 Blagnac

3 : Chambre d'Agriculture de Normandie, 6, rue des Roquemonts, F-14000 Caen

MOTS CLÉS : Chantier de récolte, conservateur, conservation de la récolte, ensilage, fourrage, légumineuse, machinisme agricole, méteil, pertes, plante protéagineuse, préfanage.

KEY-WORDS : Agricultural machinery, crop conservation, forage, harvesting operations, high-protein crop, legume, losses, maslin, pre-wilting, silage, silage additive.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Uijtewaal A., Joulié I., Delbecque D., Fesneau A., Fortino G., Jeulin T., Olivier F. (2018) : «Récolte précoce et conservation en ensilage des mélanges céréaliers riches en protéagineux», *Fourrages*, 234, 121-130.

et ce n'est plus l'accumulation d'amidon dans les grains qui permet l'élévation physiologique de la teneur en MS du mélange. Par ailleurs, la composition chimique des espèces (faible teneur en matière sèche (MS), forte teneur en protéines), leur morphologie (grosse tige, gousses) et l'architecture haute et dense du couvert posent la question de la possibilité d'atteindre des conditions favorables à leur conservation par ensilage. Cet article s'attache à décrire les particularités de ces couverts et propose un regard critique sur les moyens disponibles pour améliorer leurs conditions de récolte et conservation par ensilage.

1. Particularités des mélanges riches en protéagineux récoltés précocement

■ Une faible teneur en matière sèche sur pied

La féverole, le pois fourrager et la vesce sont les trois espèces de légumineuses les plus couramment utilisées au sein des mélanges. Ces trois espèces se caractérisent par de faibles teneurs en matière sèche sur pied. Les mélanges suivis par les Chambres d'Agriculture de Normandie de 2013 à 2017 comportaient de fortes proportions de protéagineux allant de 30 à 100% de la MS à la récolte. Leur teneur en MS sur pied, mesurée entre fin avril et fin mai, était en moyenne de 13,6% (n=30).

Sur le site de Boigneville (Essonnes), les mesures de teneurs en MS réalisées de 2009 à 2013 à l'automne (octobre-novembre) par ARVALIS-Institut du végétal sur des couverts monospécifiques de pois (protéagineux ou fourragers), féverole ou vesces implantés en fin d'été ont présenté des teneurs moyennes en MS de 16,4% sur pied (n=58). Par comparaison, la teneur en MS sur pied de la luzerne récoltée au 1^{er} cycle entre le 4 et le 19 mai lors d'essais agronomiques était en moyenne de 20,9% MS (n=8) (essais ARVALIS-Institut du végétal conduits dans le cadre de 4AGEPROD de 2015 à 2017).

De manière générale, plus le mélange contient de protéagineux, plus sa teneur en MS sur pied est faible et ce d'autant plus que le stade de récolte est précoce (MAXIN *et al.*, 2017).

■ La morphologie des espèces et l'architecture du couvert freinent le séchage

• Des espèces à grosse tige

Dans les mélanges riches en protéagineux, la féverole peut parfois occuper une place importante. Au-delà de sa faible teneur en MS, cette espèce se caractérise par un fort ratio tige/feuilles ainsi qu'une tige de diamètre important. Ces caractéristiques en font une plante difficile à sécher au champ. En effet, à l'instar des espèces fourragères, durant les premières heures qui suivent la fauche, l'eau est essentiellement évacuée par les stomates encore ouverts des

feuilles. Leur faible proportion pénalise donc la vitesse de séchage. **L'eau contenue dans les tiges est difficilement évacuée** en raison de la cuticule épaisse et des tissus de soutien qui séparent les vaisseaux transporteurs de sève et le milieu extérieur. Ces considérations sont également valables, mais dans une moindre mesure, pour les espèces comme le pois fourrager et la vesce.

• Un couvert dense qui maintient un microclimat humide

La biomasse produite à des stades précoces est volumineuse. Le couvert est haut (80 cm à 1 m) et particulièrement dense. De ce fait, l'humidité issue de la rosée ou des précipitations stagne dans le couvert. Au printemps, l'évacuation de l'eau issue des pluies ou des rosées matinales est donc lente. Ceci est d'autant plus vrai que le mélange contient du pois fourrager et des vesces qui viennent coloniser les espaces laissés libres dans le couvert. Ainsi, au-delà de leur faible teneur en MS physiologique, le couvert piège généralement une part non négligeable, bien que difficilement quantifiable, d'eau libre. A la différence de l'eau intracellulaire des espèces du couvert, l'eau libre est plus facile à évaporer. Cependant, maintenue dans un milieu fermé, cette humidité peine à s'échapper, de sorte qu'elle accroît la quantité d'eau à évaporer lors du préfanage au champ.

• Affaissement des andains

Du fait de leur faible teneur en MS et de leur faible lignification (stade jeune), les andains de ces mélanges fourragers ont tendance à s'affaisser sur eux-mêmes, ce qui réduit la circulation d'air au travers du fourrage. Ceci est pourtant un paramètre important pour accélérer le séchage : grâce à son fort pouvoir évaporant, l'air sec qui circule à travers l'andain évacue une quantité importante d'eau.

• Des chaumes clairsemés qui soutiennent peu les andains

A la différence des graminées prairiales, le peuplement et la densité des chaumes sont faibles. Seules les céréales à paille tallent et ont tendance à accroître la densité des chaumes. Les autres espèces, à port érigé ou grimpant et ne tallant pas, contribuent peu à densifier le matelas de chaumes, apte à maintenir « perché » le fourrage une fois fauché. La densité des chaumes est pourtant une caractéristique importante afin de faciliter, d'une part, la circulation d'air sec sous l'andain pour en évacuer l'eau et, d'autre part, la reprise du fourrage par les outils de récolte. En effet, disposer d'un andain « surélevé » par rapport au sol facilite la reprise par un giro-andaineur afin de regrouper des andains et/ou le pick-up de l'ensileuse sans avoir à « gratter » le sol pour récolter la totalité du fourrage. L'incorporation de terre, voire de pierres, est préjudiciable à la conservation par ensilage. En effet, les éléments minéraux augmentent le pouvoir tampon du fourrage, ce qui ralentit la vitesse d'acidification. Par ailleurs, le sol contient des bactéries butyriques dont l'activité durant la conservation par ensilage entraîne des pertes importantes de matière organique et solubilise les

protéines du fourrage. De plus, leur présence dans le fourrage récolté entraîne un retard de fermentation qui induit le phénomène de protéolyse. Enfin, la terre et les pierres augmentent significativement l'usure des matériels.

■ Atteindre rapidement 30 % MS lors du préfanage, un objectif parfois difficile !

A l'instar des autres espèces fourragères, l'objectif du préfanage au champ est d'atteindre la teneur en MS adaptée au mode en conservation en un minimum de temps. En effet, après la fauche, la plante continue de respirer et d'utiliser ou transformer les sucres (BAUMONT *et al.*, 2009 et 2011 ; SAVOIE *et al.*, 2012). Par ailleurs, PITT (1990) rappelle que ces pertes sont d'autant plus importantes que la teneur en MS du fourrage est faible et que la température extérieure est élevée.

La figure 1, tirée du modèle de pertes par respiration proposé par ROTZ (1995) pour la luzerne, le ray-grass et le trèfle blanc, propose des ordres de grandeur de pertes par tranche de 12 heures en fonction de la température journalière moyenne et de la teneur en MS du fourrage. En faisant l'hypothèse que le modèle fonctionne sur le même principe avec les MCPI+, au printemps, sous les latitudes françaises, les pertes par respiration au champ seraient comprises entre 1 et 3 % par tranche de 12 heures. La dessiccation rapide est intéressante pour préserver les sucres solubles et donc la qualité du fourrage. Ceci est d'autant plus utile pour la conservation par voie humide.

Les constatations issues du modèle de ROTZ (1995) sont à relativiser. En effet, il est suspecté que, sous certaines conditions (température fraîche, rayonnement important), la photosynthèse contrebalance les pertes par respiration. Dans deux essais conduits en 2015 et 2016 par ARVALIS-Institut du végétal dans le cadre de 4AGEPROD, la teneur en sucres solubles et amidon de la luzerne n'a pas varié au cours des 72 h de préfanage. En 2015, les conditions de séchage étaient excellentes alors qu'elles étaient moyennes en 2016. Ainsi, **bien que les pertes au champ soient liées à la durée de préfanage, il importe avant tout d'atteindre 30 voire 35 % MS pour assurer une bonne**

conservation. Au printemps, il semble difficile d'atteindre cet objectif en moins de 48 h. Dans tous les cas, la durée de préfanage ne devra pas excéder 96 h voire 72 h en conditions chaudes sous peine de s'exposer à des échauffements dans les andains, signes de l'activité néfaste des levures et des moisissures. Ceci est particulièrement vrai pour les andains étroits non manipulés entre la fauche et l'ensilage.

2. Tenir compte des caractéristiques du mélange pour choisir sa chaîne de récolte

A la différence des mélanges céréales - protéagineux composés majoritairement de céréales et récoltés au stade laiteux-pâteux de la céréale, la faible teneur en MS sur pied des MCPI+ ne permet pas le recours à la récolte en coupe directe. **Les MCPI+ sont donc à conduire comme des fourrages préfanés au champ** en tenant compte de leurs particularités.

■ L'outil de fauche : « rien n'est parfait » !

• Les faucheuses classiques à plat

Les faucheuses classiques sans conditionneur présentent l'avantage de produire un andain d'une largeur environ égale à 80 % de la surface fauchée. Bien connue pour d'autres fourrages prairiaux, cette caractéristique favorise le séchage par l'exposition du fourrage au rayonnement du soleil (UIJTTEWAAL *et al.*, 2017). En revanche, après le passage de ces faucheuses, l'andain produit est plat, de sorte que l'air sec circule difficilement au travers du fourrage. Par ailleurs, les plantes fauchées sont alignées dans le sens de la fauche. Du fait du faible peuplement de chaumes, ceci augmente le risque que l'andain s'affaisse jusqu'à toucher le sol. Le fourrage peut alors être contaminé par des particules de terre à ce moment ainsi que lors de la reprise du fourrage au moment de l'andainage.

• Les faucheuses conditionneuses à doigts ou à fléaux

Elles exercent deux actions mécaniques sur le fourrage. Le lamier sectionne les tiges puis les doigts ou fléaux tournent à grande vitesse et « frappent » le flux de fourrage avant son éjection. Ces matériels ont été principalement conçus pour accélérer le séchage des graminées, en grattant la cuticule et en déchirant les tiges afin de faciliter l'évacuation de l'eau. Les répercussions en termes de pertes mécaniques lors de la fauche de légumineuses prairiales sont bien documentées (UIJTTEWAAL *et al.*, 2017) mais pas du tout pour les MCPI+. Lors de la fauche, nous pouvons pourtant supposer des dégâts mécaniques sur les feuilles turgescentes des protéagineux, notamment de la féverole et du pois, ainsi que sur les gousses en formation. En l'absence de références, il conviendra de réduire l'agressivité de ces matériels en réduisant la vitesse du conditionneur et en augmentant l'espace entre le conditionneur et la tôle située à son aplomb (UIJTTEWAAL *et al.*, 2017). L'action mécanique

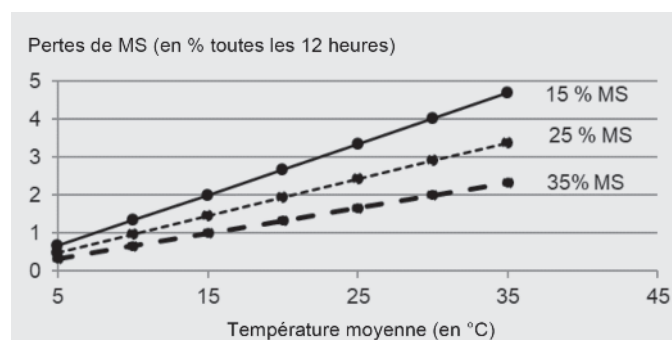


FIGURE 1 : Pertes de MS durant le préfanage du fourrage au champ en fonction de la température (en % toutes les 12 heures, d'après ROTZ, 1995).

FIGURE 1 : Loss in DM during forage pre-wilting in the field as a function of temperature (% every 12 hours, after ROTZ, 1995).

sur le fourrage permet en revanche de faciliter l'évacuation de l'eau des plantes en créant des points de sortie privilégiés. Cet effet apparaît d'autant plus intéressant que les espèces du couvert ont de grosses tiges. Par ailleurs, ces faucheuses présentent l'avantage de produire un andain ébouriffé facilitant la circulation d'air au travers du fourrage. L'enchevêtrement des brins de fourrage est également intéressant car il facilite la reprise ultérieure du fourrage soit lors d'un éventuel regroupement d'andains, soit par le pick-up de l'ensileuse. Cette particularité sera renforcée par l'action des vrilles de pois et vesce.

• **Les faucheuses-conditionneuses à rouleaux**

Elles produisent un effet mécanique de pliage et écrasement des tiges du fourrage. Conçues pour la conduite des légumineuses prairiales, l'agressivité des pièces travaillantes est réduite par rapport aux fléaux ou doigts, de sorte que les pertes mécaniques sont faibles et proches de celles générées par les faucheuses à plat. Ces faucheuses sont recommandées en Australie pour la fauche des céréales pures ou en mélange avec des protéagineux (MICKAN, 2008). Une attention sera particulièrement apportée au débit de chantier, qui devra être limité pour permettre au conditionneur d'exercer une action notable (SHINNERS *et al.*, 2006) tout en évitant les bourrages avec des volumes conséquents de fourrage. Enfin, avec des végétations hautes, des cas d'arrachements de pieds de féveroles et céréales ont été rapportés par les utilisateurs. **A l'instar des conditionneuses à doigts et à fléaux, l'utilisation des faucheuses-conditionneuses à rou-**

leaux est déconseillée dès la formation des gousses pour éviter les pertes de graines.

- **Ne pas rouler sur le fourrage, une recommandation qui prend tout son sens avec ces mélanges riches en protéagineux**

Quel que soit l'équipement de fauche choisi, il est primordial de ne pas rouler sur le fourrage afin de ne pas le souiller avec de la terre mais également pour faciliter son séchage et sa reprise. Avec le développement des faucheuses de grande largeur en un seul module, rouler sur le fourrage est inévitable car l'andain produit est plus large que la voie du tracteur. Pour y remédier, l'utilisation des cônes, roues à andain ou disques d'andainage permet de diviser l'andain principal en deux pour permettre d'enjamber le fourrage lors du passage ultérieur tout en maximisant la surface d'exposition.

Avec des combinaisons d'équipements frontaux et latéraux, ce problème sera résolu facilement en ajustant la largeur d'andain du module frontal. Sur les modules latéraux, l'éparpillement large permettra de profiter pleinement d'une surface d'exposition au rayonnement solaire et au vent sans risque.

■ **Andainer ou ne pas andainer ?**

Lors du séchage en andains au champ, le fourrage contenu à l'intérieur et sous l'andain sèche lentement. Le déplacement ou regroupement des andains peut être une pratique intéressante pour exposer ce fourrage au soleil et au vent (figure 2). Réalisée 24 h avant la récolte, cette pra-

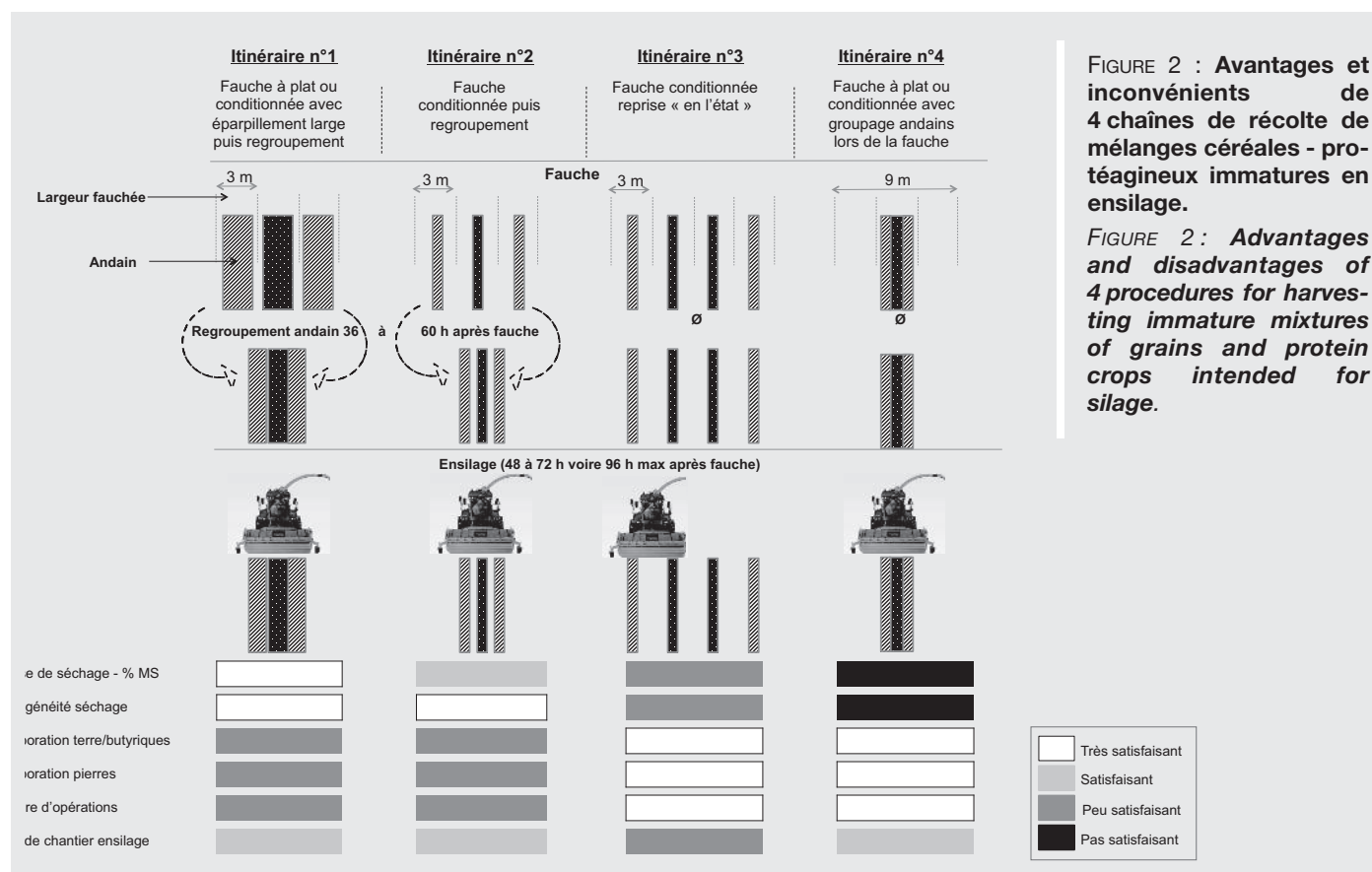


FIGURE 2 : Avantages et inconvénients de 4 chaînes de récolte de mélanges céréales - protéagineux immatures en ensilage.

FIGURE 2 : Advantages and disadvantages of 4 procedures for harvesting immature mixtures of grains and protein crops intended for silage.

tique peut, *a minima*, permettre d'évacuer l'eau libre ainsi qu'une part variable de l'eau intracellulaire des plantes. Bien évidemment, cette pratique requiert une opération spécifique et engendre des coûts. Pour limiter le risque d'incorporation de terre, la réalisation de cette opération avec un giro-andaineur sera réservée aux préparations de sol adaptées (planes), en l'absence de pierres et avec des pratiques de fauche adaptées (fauche suffisamment haute à au moins 8 cm, fourrage déposé sur les chaumes).

De plus en plus répandus, les andaineurs à pick-up et tapis constituent des solutions intéressantes mais leur utilisation pour ces mélanges fourragers n'est pas documentée. En adoptant le principe de reprise par pick-up qui soulève le fourrage, le risque de contamination est réduit contrairement au giro-andaineur qui ratisse le sol. Enfin, en faisant retomber le fourrage « en pluie » sur l'andain, le fourrage est plus aéré qu'avec un giro-andaineur. Sur le même principe, l'utilisation des retourneurs d'andain, notamment testés sur luzerne (CROCG, 2014), apparaît techniquement intéressante pour les MCPI+. Attention toutefois au débit de chantier limité des retourneurs d'andains à tapis.

Devant le risque d'incorporation de terre, les andaineurs à soleil sont à proscrire.

3. La conservation par ensilage des MCPI+

■ 1^{er} objectif :

éviter l'écoulement de jus au silo

L'apparition et l'écoulement de jus dépendent en premier lieu de la teneur en MS du fourrage à la mise en silo mais également de la pression exercée sur le fourrage (ROTZ et MUCK, 1994). Ainsi, plus le silo sera haut, plus la teneur en MS du fourrage devra être élevée pour limiter les jus. Durant la 1^{re} phase de fermentation, il se produit également le phénomène de lyse cellulaire qui contribue à l'écoulement des jus. Les jus présentent des teneurs en MS comprises entre 3 et 12% MS (ROTZ et MUCK, 1994 ; ITEB, 1991 ; LEIDMANN *et al.*, 1995 ; SAVOIE *et al.*, 2002) ; une teneur en MS moyenne de 5% peut être retenue (SAVOIE *et al.*, 2002).

Plusieurs auteurs ont développé des modèles de prédiction de volumes d'effluents en fonction de la teneur en MS du fourrage lors de la mise en silo (CEMAGREF cité dans ITEB, 1991 ; BASTIMAN et ALTMAN (1985) cités dans AMYOT *et al.*, 2003). En couplant ces deux modèles de prévision du volume d'effluents et en appliquant les deux hypothèses de teneurs en MS des jus (5% en moyenne et 8% en valeur haute), il est alors possible de prédire les pertes de MS en fonction de la teneur en MS du fourrage à la mise en silo (figure 3).

Ainsi, pour un fourrage à 18% MS, les pertes moyennes évaluées avec les deux modèles sont comprises entre 3 et 6% et peuvent atteindre 5 à 10% dans l'hypothèse haute où les jus titrent 8% MS.

Ces jus sont riches en sucres et composés azotés solubles, en acides organiques produits lors des premières

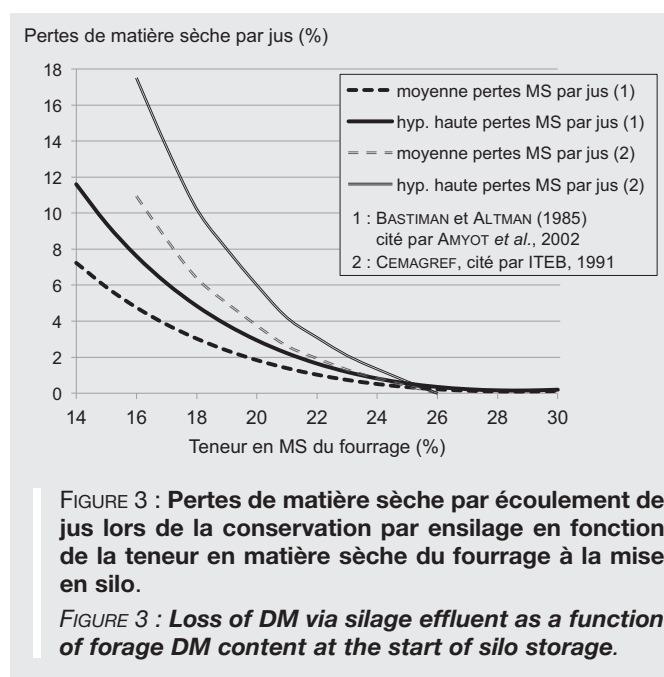


FIGURE 3 : Pertes de matière sèche par écoulement de jus lors de la conservation par ensilage en fonction de la teneur en matière sèche du fourrage à la mise en silo.

FIGURE 3 : Loss of DM via silage effluent as a function of forage DM content at the start of silo storage.

phases de fermentation, et en minéraux. Des teneurs en azote comprises entre 2 et 7% MS ont été rapportées pour des jus d'ensilage de graminées, de trèfles (LEIDMANN *et al.*, 1995), de fléole des prés ou de luzerne (SAVOIE *et al.*, 2002). Ces valeurs correspondent à des équivalents protéines de 13 à 46% (%protéine = %N×6,25). Pour ces mêmes fourrages, la teneur en sucres des jus était comprise entre 5 et 17%. L'écoulement des jus appauvrit ainsi le fourrage des éléments les plus digestibles par l'animal. **Devant la difficulté de préfaner convenablement les mélanges riches en protéagineux, ces fourrages sont particulièrement sensibles aux pertes par jus qui dévaluent la quantité et la qualité de la récolte, et génèrent des nuisances environnementales.**

Parmi les MCPI+ suivis par les Chambres d'Agriculture de Normandie (n=56) ainsi que ceux suivis dans le cadre de 4AGEPROD par la Chambre d'Agriculture de la Mayenne (n=3) et ARVALIS-Institut du Végétal (n=3), **seul un tiers d'entre eux présentait des teneurs en MS supérieures à 30% à la sortie du silo** (non corrigées des pertes à l'étuve). Le manque de données lors de la mise en silo ne permet pas ici de quantifier les pertes par jus lors de l'ensilage mais les faibles teneurs en MS à la sortie du silo indiquent clairement que la situation est fréquente sur le terrain. **En situation à risques (%MS < 28), la réalisation d'un silo n'excédant pas 1,5 m de haut et la disposition de fourrages plus secs en guise de sous-couche permettront de réduire ce risque.**

■ Les processus fermentaires

Le processus d'ensilage peut se décrire comme l'enchaînement de plusieurs phases distinctes au cours desquelles différentes activités métaboliques ont lieu (tableau 1). Ces dernières sont communes à tous les fourrages ensilés mais leur intensité dépend beaucoup de la composition chimique et microbienne initiale du fourrage lors de la mise en silo.

Phase de conservation Micro-organismes	Conditions de développement	Voies métaboliques Conséquences
Phase aérobie Cellules de la plante/enzymes Hydrolyse des glucides solubles Respiration, Protéolyse	20 – 30°C O ₂ +++ H ₂ O +++	Glucides solubles → glucose, fructose glucose, fructose + O ₂ → H ₂ O + CO ₂ + Chaleur Protéines acides → aminés => Pertes MS, énergie et valeur protéique
Phase fermentaire * Bactéries homofermentaires : <i>Lactobacillus plantarum</i> ; <i>L. lactis</i> ; <i>Pediococcus pentosaceus</i> ; <i>P. acidilactici</i>	pH 7 → < 4 (selon %MS)	Glucides solubles → Acide lactique => Acidification rapide
* Bactéries hétérofermentaires : <i>Lactobacillus buchneri</i> ; <i>L. brevis</i> ; <i>Propionibacterium acidipropionici</i>	10°C → 50°C O ₂ - - H ₂ O +/-	Glucides solubles → Acide lactique + Acide acétique + alcool + CO ₂ (dépendant des conditions du milieu et du type de bactérie) => pH optimal un peu plus élevé que pour les bactéries homofermentaires, perte MS durant phase fermentaire. Production de composés antifongiques (stabilité aérobie)
* Entérobactéries : <i>Coliformes (Enterobacter ; Escherichia coli ; Citrobacter)</i> <i>Streptococcus et Leuconostoc</i>	pH > 5,5 20 – 40°C O ₂ +/- H ₂ O +++	Glucides solubles → Acide acétique + alcool + CO ₂ => Acidification lente, perte MS
* Bactéries butyriques : <i>Clostridium butyricum</i> ; <i>C. tyrobutyricum</i>	pH > 4 - 5 20 – 40°C O ₂ - H ₂ O +++	Lactates → Acide butyrique + H ₂ O Protéines → Acide acétique + Acide propionique + Amines biogènes (cadavérine, putrescine etc...) + NH ₃ + CO ₂ => Acidification lente, pertes MS, énergie et valeur protéique, baisse appétence
Phase de stabilité	stable (variation de température selon la temp. ambiante)	La stabilité est sous la dépendance de la pénétration de l'air, des glucides solubles restants, de la présence de levures et de moisissures
Phase post-fermentaire * Levures	pH > 4 20°C O ₂ ++ H ₂ O +	Acide lactique + O ₂ → Acide acétique + CO ₂ + H ₂ O + Chaleur Glucides solubles → alcool + CO ₂ => Pertes MS, énergie. Echauffement, baisse appétence
* Moisissures : <i>Monascus, Fusarium</i> <i>Penicillium, Aspergillus fumigatus</i>	pH > 5 20°C O ₂ +++ H ₂ O +/-	Glucides solubles + Acides organiques → CO ₂ + H ₂ O + Chaleur (+ mycotoxines) => Risque mycotoxine. Perte MS. Echauffement

TABLEAU 1 : Description des principaux processus enzymatiques et microbiologiques au cours de l'ensilage.

TABLE 1 : Description of the main enzymatic and microbiotic processes occurring during silage production.

• L'ensilabilité des MCPI+

Elle dépend de la teneur en sucres solubles et du pouvoir tampon exercé par les protéines et les matières minérales. Peu de références existent sur les teneurs en sucres solubles des MCPI+. Lors de la mise en silo de MCPI+, leurs teneurs en sucres solubles étaient de 10,7% de la MS lors des suivis réalisés (n=16) par la Chambre d'Agriculture de la Mayenne et ARVALIS-Institut du végétal dans le cadre de 4AGEPROD (2015-2016). Ces mélanges semblent donc être en moyenne relativement bien pourvus en sucres solubles. Cultivés pour leurs protéines, ces MCPI+ présentent souvent des teneurs en MAT supérieures à 16% de la MS. Quant aux teneurs en matières minérales, elles sont la résultante des constituants de la plante et de contaminations lors de la récolte. Leur teneur est bien souvent comprise entre 9 et 11% de la MS. **En termes de composition chimique, ces mélanges peuvent a priori être qualifiés de moyennement faciles à conserver par ensilage.**

• Gare à la protéolyse microbienne et enzymatique

La protéolyse est le phénomène biochimique qui conduit à transformer l'azote des protéines en des formes

plus solubles (peptides, acides aminés libres, ammoniac et amines). Ce phénomène commence dès que la plante est fauchée (OWENS *et al.*, 1999) mais l'essentiel de la protéolyse se déroule durant la conservation, sous l'action des enzymes de la plante et des bactéries protéolytiques présentes dans le fourrage telles que les butyriques (AMYOT, 2003). **De manière générale, plus un fourrage est riche en protéines, plus il est sensible à la protéolyse.** Ceci tient notamment au fait qu'une part importante des protéines provient des feuilles. Les principales protéines contenues dans les feuilles sont impliquées dans la photosynthèse et sont connues pour être solubles (GETACHEW *et al.*, 2006). Derrière la conservation des protéines se cachent des enjeux zootechniques (nutrition) et environnementaux (rejet d'azote). L'ingestion d'une forte proportion d'azote soluble génère un déséquilibre de la balance azotée dans le rumen des animaux. L'azote en excès est détoxifié et rejeté dans l'environnement, principalement dans les urines et en quantité variable dans le lait. Afin de maximiser la valorisation de l'azote contenu dans le fourrage, il est donc préférable de mettre en œuvre les moyens nécessaires pour réduire l'intensité de la protéolyse (DEMARQUILLY *et al.*, 1998 ; BRODERICK, 2001).

La protéolyse d'origine enzymatique semble être la plus importante (MCKERSIE et BUCHANAN-SMITH, 1982). Elle

est également la plus rapide en termes de vitesse d'action puisque l'on estime que l'essentiel de l'activité protéolytique se déroule durant les 3 à 5 premiers jours de conservation par voie humide avec une intensité décroissante. L'enjeu réside donc dans l'inhibition ou la réduction drastique de l'activité des enzymes. Cette dernière est régie essentiellement par deux facteurs :

- Le pH du milieu : le pH optimal des protéases végétales serait compris entre 5 et 6 (ROTZ *et al.*, 1994). Néanmoins, selon l'étude de TAO *et al.* (2012), les enzymes responsables de la majeure partie de la protéolyse dans les ensilages de luzerne sont actives sur une gamme de pH allant de 3 à 7. Bien qu'une baisse de pH permette de réduire leur activité (TAO *et al.*, 2012), le processus d'ensilage ne permet pas d'abaisser suffisamment et assez rapidement le pH au point de les inhiber totalement (DEMARQUILLY *et al.*, 1998).

- La teneur en MS du fourrage : il a été démontré à plusieurs reprises qu'à teneur en MAT donnée, l'élévation de la teneur en MS du fourrage lors de la mise en silo permettait de réduire la protéolyse durant la conservation de la luzerne (GOUET *et al.*, 1965 ; MERCHEN et SATTER, 1983 ; MUCK, 1987). Ceci a également été constaté dans un ensilage de pois (TYROLOVA et VYBORNA, 2011).

Du fait de la faible teneur en MS des MCPI+ lors de la mise en silo ainsi que des sources de contaminations lors de la chaîne de récolte, le risque de fermentations butyriques est élevé. Les bactéries butyriques se développent dans les ensilages riches en eau, en absence d'oxygène et lorsque le pH n'a pas encore baissé suffisamment pour les inhiber. Leur activité se traduit par la présence d'acide butyrique dans l'ensilage et contribue également à produire de l'ammoniac et des amines (tableau 1). Dans les ensilages de MCPI+ suivis par les Chambres d'Agriculture de Normandie, de la Mayenne et ARVALIS, la présence d'acide butyrique a été détectée dans 53 chantiers sur 58, dont 21 fois à des teneurs supérieures ou égales à 5 g/kg MS. Par comparaison, au sein des suivis de chantiers d'ensilage de luzerne (n=54) réalisés par la FRCUMA Ouest et ARVALIS-Institut du végétal entre 2014 et 2017 au sein du projet 4AGEPROD, l'acide butyrique n'a été détecté que 13 fois sur 54 silos, et seulement 3 fois au dessus de 5 g/kg de MS. La principale différence réside dans une teneur en MS à la mise en silo bien supérieure, en moyenne de 48% MS pour la luzerne. Ainsi, malgré sa faible ensilabilité, le préfanage de la luzerne permet une bonne conservation. Signe d'une plus faible activité, les ensilages de luzerne, pourtant très riches en protéines et particulièrement sensibles, ont présenté une teneur en NH₃ de 10% de l'azote total, contre 16% pour les MCPI+.

• L'activité des entérobactéries et des butyriques engendre des pertes de matière organique

Dans les ensilages très riches en eau et en matières organiques (MO) solubles, les entérobactéries et les bactéries butyriques sont particulièrement actives (tableau 1). Les ensilages se caractérisent par des teneurs élevées en acides acétique et butyrique et en alcools. Or, contrairement

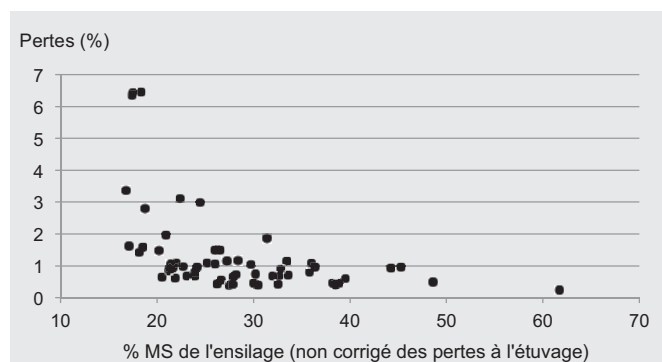


FIGURE 4 : Estimations des pertes de matière organique dues aux fermentations acétique et butyrique lors de l'ensilage des mélanges céréales - protéagineux immatures (données issues de suivis par CA Normandie, CA53 et ARVALIS).

FIGURE 4 : Estimated loss of organic matter due to acetic and butyric fermentation from immature mixtures of grains and protein crops during silage production (data from CA Normandie, CA53 and ARVALIS).

aux fermentations lactiques des bactéries homofermentaires, ces profils fermentaires témoignent de pertes de MO durant la fermentation (ROOKE et HATFIELD, 2003). Les équations stœchiométriques des fermentations données par ROOKE et HATFIELD (2003) permettent de calculer les pertes de matières organiques minimales (sous forme de CO₂) qui ont lieu durant les fermentations. Ainsi, à chaque g/kg de MS d'acide butyrique correspond 0,51 g de pertes de matière organique sous forme de CO₂. L'équivalence pour l'acide acétique est de 0,21 g. Les fermentations alcooliques génèrent également des pertes. Par manque d'informations sur les teneurs en alcools des ensilages de MCPI+, les projections de pertes rapportées dans la figure 4 constituent un minimum car elles ne prennent en compte que celles générées par la production d'acides acétique et butyrique. Il conviendrait de rajouter les pertes par respiration et fermentations alcooliques non connues pour ces suivis. La figure 4 illustre les répercussions en termes de pertes de MO liées aux fermentations indésirables, notamment pour des teneurs en MS faibles, < 25%MS.

■ Quelle utilité des conservateurs d'ensilage pour les MCPI+ ?

• Identifier le(s) risque(s) durant la conservation

Sous la bâche, avec une teneur en MS faible, l'acidification de la masse ensilée est présumée lente. Les fermentations indésirables (acétique, alcoolique, butyrique) concurrencent fortement les fermentations lactiques recherchées. En « gaspillant » les ressources sucrées et en prédigérant les protéines, ces réactions compromettent la préservation quantitative et qualitative du fourrage. Les effets des conservateurs sont relativement bien documentés pour les fourrages prairiaux et le maïs fourrage (BROCARD, 2015) mais ne le sont pas pour les MCPI+.

Les symptômes d'instabilité aérobie (échauffements) du fourrage lors de l'ouverture du silo ou du désilage peu-

vent être rencontrés lorsque la porosité du silo est importante (teneur en MS > 30 %, défaut de tassement) et/ou que la vitesse d'avancement du front d'attaque est insuffisante. Ce cas n'est pas abordé ici car il demeure minoritaire dans la pratique.

• Les acides organiques

Dans la classe des additifs chimiques, les acides organiques tels que l'acide propionique et l'acide formique sont les deux acides les plus utilisés. Ils sont présentés aujourd'hui sous des formes dites tamponnées afin de réduire leur caractère corrosif pour les matériels. L'acide formique est un acide plus fort que l'acide propionique. L'ajout d'acide formique entraîne une baisse importante et immédiate du pH, réduisant ainsi la quantité de sucres solubles qu'il est nécessaire de fermenter pour atteindre un pH bas et stable (CONTRERAS-GOVEA *et al.*, 2013). Cette réduction de pH inhibe l'activité des protéases et permet ainsi une meilleure conservation des protéines (GUO *et al.*, 2008). De plus, l'activité des protéases est maximale le premier jour de conservation et décline ensuite jusqu'à atteindre un niveau faible. L'ajout d'acide propionique permet de diminuer le pH et améliore également la stabilité aérobie du fourrage (KUNG *et al.*, 2000). Ceci est en lien avec ses propriétés antifongiques.

• Les bactéries lactiques homofermentaires

Les bactéries lactiques sont naturellement présentes sur le fourrage mais leur part parmi l'ensemble de la flore épiphyte est variable (MUCK, 2010). Le préfanage, au-delà de ses bienfaits pour la conservation par ensilage, a tendance à accroître le nombre de bactéries lactiques sur le fourrage (MUCK et KUNG, 1997). Cependant, rien ne permet à ce jour de prédire de manière fiable si leur nombre et leur proportion sont suffisants pour assurer une bonne conservation naturelle du fourrage. L'ajout de bactéries lactiques permet ainsi d'augmenter le contingent naturel afin d'orienter les fermentations vers les fermentations lactiques, caractérisées par leur acidification efficace et leur faculté à préserver la matière sèche (ROOKE et HATFIELD, 2003). Les principales souches utilisées sont : *Lactobacillus plantarum*,

Pediococcus acidilactici, *Pediococcus pentosaceus* ou encore *Lactobacillus lactis*. Leurs effets positifs sur la chute de pH ont été rapportés (FILYA et SUCU, 2010) notamment en détournant la fermentation vers la voie lactique aux dépens de la voie acétique (augmentant le ratio acide lactique/acide acétique), l'acide lactique ($pK_a=3,7$) étant un acide plus fort que l'acide acétique ($pK_a=4,8$).

Dans les ensilages de pois protéagineux, les effets positifs du préfanage et de l'inoculation (*Lactobacillus plantarum*) sur la préservation de la MS durant la conservation et la protéolyse jugée par la part d'azote ammoniacal ont été rapportés par BORREANI *et al.* (2006). En passant de 5,6 à 4,8 % et de 5,3 à 3,5 % de pertes de MS respectivement pour les modalités en coupe directe et préfanée, l'inoculation a amélioré la préservation de la MS. Sur le même schéma, la teneur en NH_3 est passée de 12,9 à 9,0 et de 10,5 à 4,1 % de l'azote total sous l'effet de l'inoculation de la récolte en coupe directe et préfanée respectivement. L'effet positif du préfanage a également été rapporté par TYROLOVA, et VYBORNA (2011). Malgré un pH plus bas et une prédominance de l'acide lactique, l'inoculation n'a pas eu d'effet sur la protéolyse. Des constatations similaires ont été rapportées par KLEINSCHMIT *et al.* (2005) et KRISTENSEN *et al.* (2010) sur d'autres espèces fourragères. Ceci peut être expliqué par le fait que l'accélération de l'acidification du fait de l'inoculation reste insuffisante pour réduire la protéolyse d'origine enzymatique.

• Les enzymes

Les enzymes ne sont jamais utilisées seules. Elles sont utilisées en association avec les bactéries lactiques homofermentaires ou hétérofermentaires. Leur rôle est de prédigérer les fibres facilement digestibles ou sucres de réserve (amidon) pour fournir davantage de sucres solubles aux bactéries. Parmi les enzymes, on retrouve les β -glucanase, xylanase, amylase. L'action des enzymes cellulolytiques est plus importante sur les plantes immatures (NADEAU *et al.*, 2010). L'efficacité des enzymes diminue avec le taux de matière sèche car elles utilisent l'eau comme moyen de transport (NADEAU et BUXTON, 1997).

Type d'additif d'ensilage	Principales souches ou molécules	Principaux mécanismes	Objectif recherché
* Biologique			
Bactéries lactiques homofermentaires	<i>Lactobacillus plantarum</i> , <i>L. lactis</i> <i>Pediococcus acidilactici</i> , <i>Pediococcus pentosaceus</i>	sucres simples => acides lactique	Baisse du pH
Bactéries lactiques hétérofermentaires	<i>Lactobacillus buchneri</i> , <i>Lactobacillus brevis</i>	sucres simples => acides lactique, acétique, alcools, CO_2 , 1,2-propanediol	Stabilité aérobie Baisse du pH
Enzymes	Cellulase, hémicellulase, amylase	sucres complexes => sucres simples	Mise à disposition de sucres aux bactéries lactiques
* Chimique			
Acides organiques	Acide formique Acide propionique		Baisse du pH Stabilité aérobie, baisse du pH

TABLEAU 2 : **Récapitulatif des principaux conservateurs et de leurs effets.**

TABLE 2 : **Description of the main silage preservatives and their effects.**

• Quels coûts et recommandations pour les MCPI+ ?

Par analogie avec les autres fourrages ensilés, les acides organiques s'appliquent à raison d'environ 3 à 6 litres par tonne de fourrage frais. Leur coût est compris entre 3 et 6 €/t de fourrage brut. Plus un fourrage est humide, plus la dose appliquée sera forte, ce qui peut complexifier la logistique des chantiers de récolte. Pour les inoculants bactériens, la dose appliquée s'exprime en colonie formant unité (cfu) par gramme de fourrage frais. Leur coût est d'environ 2 à 4 €/t de fourrage brut. Ainsi, au-delà de sécuriser la conservation par ensilage, le préfanage permet de diminuer la quantité de fourrage brut à traiter et donc le coût des conservateurs à appliquer.

Bien sûr, **si l'utilisation d'un conservateur ne compensera pas de mauvaises pratiques d'ensilage, son utilisation peut constituer une sécurité pour préserver les qualités du fourrage ensilé.** Face à cet objectif, le recours à des acides organiques ou des bactéries lactiques homofermentaires apparaît comme une solution techniquement intéressante pour conserver les MCPI+ (OLIVIER *et al.*, 2016). Le tableau 2 décrit de manière synthétique le mode d'action des différents conservateurs et l'objectif opérationnel recherché par leur application.

Conclusion

Dans la recherche d'autonomie fourragère et protéique par la culture de mélanges fourragers riches en protéagineux, la réussite des étapes de récolte et la conservation de ces fourrages constituent un challenge de taille. Les difficultés et les risques sont bien identifiés mais les solutions techniques ayant fait leurs preuves sont peu nombreuses. Au champ, le recours à des groupes de fauche permettant d'étaler le fourrage sur une grande surface sans risque de rouler dessus est intéressant. Puis, à l'aide d'un andaineur à tapis, le regroupement d'andains permettant de finir le préfanage tout en réduisant le risque de contamination par de la terre semble être une piste prometteuse. Bien évidemment, l'atteinte de l'objectif de 30 à 35 % MS favorable à la conservation des qualités du fourrage reste conditionnée aux conditions météorologiques lors du préfanage au champ. Sur ce point, toutes les zones géographiques de l'hexagone ne bénéficient pas de situations favorables. Enfin, bien que peu documentés sur des mélanges riches en protéagineux ensilés, les conservateurs à base d'acides organiques ou les inoculants bactériens lactiques homofermentaires peuvent apporter une aide technique dans la réussite du processus de conservation par ensilage.

Intervention présentée aux Journées de l'A.F.P.F.
«Sécuriser son système d'élevage avec des fourrages complémentaires : méteils, dérobées, crucifères...»,
les 21 et 22 mars 2018

Remerciements : Les essais présentés ont été conduits par Arvalis-Institut du végétal, la Fédération Régionale des CUMA de l'Ouest et la Chambre d'Agriculture de la Mayenne dans le cadre du projet 4AGEPROD. Nous remercions l'Europe, les Régions Bretagne et Pays de la Loire qui ont initié et soutiennent financièrement ces travaux dans le cadre du plan SOS Protein mené par le Pôle agronomique de l'Ouest.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMYOT A. (2003) : *Bien comprendre ce qui se passe dans le fourrage, du champ... à l'animal, un atout pour améliorer sa régie*, Colloque régional sur les plantes fourragères, Direction régionale de la Chaudière-Appalaches (Québec), 24 p, [https://www.agrireseau.net/grandescultures/Documents/AndrAmyot\(2\).pdf](https://www.agrireseau.net/grandescultures/Documents/AndrAmyot(2).pdf)
- BAUMONT R., AUFRERE J., MESCHY F. (2009) : «La valeur alimentaire des fourrages : rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation», *Fourrages*, 198, 153-173.
- BAUMONT R., ARRIGO Y., NIDERKORN V. (2011) : «Transformation des plantes au cours de leur conservation et conséquences sur leur valeur pour les ruminants», *Fourrages*, 205, 35-46.
- BORREANI G., CAVALLARIN L., ANTONIAZZI S., TABACCO E. (2006) : «Effect of the stage of growth, wilting and inoculation in field pea (*Pisum sativum* L.) silages. I. Herbage composition and silage fermentation», *Sci. Food Agric.*, 86, 1377-1382.
- BROCARD B. (2015) : *Etude des modes d'actions et de l'efficacité des additifs de conservation pour l'ensilage de graminées prairiales*, Mémoire de fin d'études ENSAI – Arvalis Institut du végétal, 106 p.
- BRODERICK G.A. (2001) : «Maximizing utilization of alfalfa protein: the example of the lactating dairy cow», *Quality in Lucerne and medics for animal production*, Zaragoza : CIHEAM, 183-192.
- CONTRERAS-GOVEA F.E., MUCK R.E., BRODERICK G.A., WEIMER P.J. (2013) : «Lactobacillus plantarum effects on silage fermentation and in vitro microbial yield», *An. Feed Sci. and Technol.*, 17, 61-68.
- CROCQ G. (2014) : «Réussir ses récoltes de luzerne», *Biennales des stations expérimentales professionnelles laitières de l'ouest*, Chambres d'Agriculture de Normandie, Bretagne, Pays de la Loire, Arvalis - Institut du végétal, Institut de l'Élevage ; http://www.afpf-asso.fr/files/fichiers/2_1_reussir_ses_recolte_de_luzerne_g_crocq2255335163740718393.pdf
- DEMARQUILLY C., DULPHY J.P., ANDRIEU J.P. (1998) : «Valeurs nutritive et alimentaire des fourrages selon les techniques de conservation : foin, ensilage, enrubannage», *Fourrages*, 155, 349-369.
- FILYA I., SUCU E. (2010) : «The effects of lactic acid bacteria on the fermentation, aerobic stability and nutritive value of maize silage», *Grass and Forage Sci.*, 65, 446-455.
- GETACHEW G., DEPETERS E.J., PITTRUFF W., PUTNAM D.H., DANDEKAR A.M. (2006) : «Does Protein in Alfalfa Need Protection from Rumen Microbes?», *The Professional Animal Scientist*, 22, 364-373.
- GOUET P., FATIANOFF N., ZELTER S. Z., DURAND M., CHEVALIER R., DUMAY C., JANOT F. (1965) : «Influence de l'élévation du taux de matière sèche sur l'évolution biochimique et bactériologique d'une luzerne conservée par ensilage», *Ann. Biologie An. Biochimie Biophysique*, EDP Sciences, 5, 1, 79-100.
- GUO X.S., DING W.R., HAN J.G., ZHOU H. (2008) : «Characterization of protein fractions and amino acids in ensiled alfalfa treated with different chemical additives», *An. Feed Sci. and Technology*, 142, 89-98.

- ITEB (1991) : *L'Élevage bovin et l'environnement*, Technipel, 251 p.
- KLEINSCHMIT D.H., SCHMIDT R.J., KUNG JR. L. (2005) : «The effects of various antifungal additives on the fermentation and aerobic stability of corn silage», *J. Dairy Sci.*, 88, 2130-2139.
- KRISTENSEN N.B., SLOTH K.H., HOJBERG O., SPLIID N.H., JENSEN C., THORGENSEN R. (2010) : «Effects of microbial inoculants on corn silage fermentation, microbial contents, aerobic stability, and milk production under field conditions», *J. Dairy Sci.*, 93, 3764-3774.
- KUNG JR. L., ROBINSON J.R., RANJIT N.K., CHEN J.H., GOLT C.M., PESEK J.D. (2000) : «Microbial populations, fermentation end-products, and aerobic stability of corn silage treated with ammonia or a propionic acid-based preservative», *J. Dairy Sci.*, 83, 1479-1486.
- LEIDMANN P., FISCHER K., BIENIEK D., KETTRUP A. (1995) : «Chemical Characterization of Silage Effluents and their Influence on Soil Bound Heavy Metals», *Int. J. Environmental Analytical Chemistry*, 59, 2-4, 303-316.
- MAXIN G., ANDUEZA D., LE MORVAN A., BAUMONT R. (2017) : «Effect of intercropping vetch (*Vicia sativa* L.), field pea (*Pisum sativum* L.) and triticale (X *Triticosecale*) on dry-matter yield, nutritive and ensiling characteristics when harvested at two growth stages», *Grass Forage Sci.*, 0, 1-8.
- McKERSIE B.D., BUCHANAN-SMITH J. (1982) : «Changes in the levels of proteolytic enzymes in ensiled alfalfa forage», *Canadian J. Plant Sci.*, 62 (1), 111-116.
- MERCHEN N.R., SATTER L.D. (1983) : «Changes in nitrogenous compounds and sites of digestion of alfalfa harvested at different moisture contents», *J. Dairy Sci.*, 66 (4), 789-801.
- MICKAN F. (2008) : «Forage cereals : harvest and storage : harvesting whole-crop cereal silage», *Agricultural notes*, AG1244, 5 p ; <https://catalogue.nla.gov.au/Record/4348500> ; <http://www.dairyfertility.com.au/hgf/AG1244%20Harvesting%20whole-crop%20cereal%20silage.pdf>
- MUCK R.E. (1987) : «Dry matter level effects on alfalfa silage quality. I. Nitrogen transformation», *Transactions of the ASAE*, 30, 1, 7-14.
- MUCK R.E. (2010) : «Silage microbiology and its control through additives», *Rev. Brasileira Zootecnia* (supl. especial), 39, 183-191
- MUCK R.E., KUNG L. (1997) : «Effects of silage additives on ensiling», *Silage : field to feedbunk*, NRAES-99, Northeast Regional Agric. Engineering. Services, hershey (Pennsylvania).
- NADEAU E.M.G., BUXTON D.R. (1997) : «Cellulase and bacterial inoculant effects on cocksfoot and lucerne ensiled at high dry matter levels», *J. Sci. Food Agric.*, 73, 369-376.
- NADEAU E.M.G., BUXTON D.R., RUSSELL J.R., ALLISON M.J., YOUNG J.W. (2010) : «Enzyme, bacterial inoculant, and formic acid effects on silage composition of orchardgrass and alfalfa», *J. Dairy Sci.*, 83, 1487-1502.
- OLIVIER F. et al. (2016) : *Note technique méteils normands : plus de fourrage, plus de protéines pour plus d'autonomie*, Chambres d'agriculture de Normandie, 8 p.
- OWENS V.N., ALBRECHT K.A., MUCK R.E. (1999) : «Protein degradation and ensiling characteristics of red clover and alfalfa wilted under varying levels of shade», *Canadian J. Plant Sci.*, 79 (2), 209-222.
- PITT R.E. (1990) : «Silage and Hay preservation», *NRAES-5*, Ithaca, NY : Northeast Regional Agricultural Engineering Service ; https://books.google.fr/books/about/Silage_and_hay_preservation.html?id=CUAjaQAAMAAJ&redir_esc=y
- ROOKE J.A., HATFIELD R.D. (2003) : «Biochemistry of Ensiling», *USDA-ARS / UNL Faculty*, 1399, 95-139.
- ROTZ A. (1995) : «Loss model for forage harvest», *American Soc. agricultural engineers*, 38 (6), 1621-1631.
- ROTZ C.A., MUCK R.E. (1994) : «Changes in Forage Quality During Harvest and Storage», *Forage Quality, Evaluation, and Utilization*, *American Soc. Agronomy*, 828-868.
- SAVOIE P., AMYOT A., THÉRIAULT R. (2002) : «Effect of moisture content, chopping and processing on silage effluent». *Transactions of the ASAE. American Soc. Agricultural Engineers*, 45 (4), 907-914.
- SAVOIE P., TREMBLAY G., MORISSETTE R. (2012) : «Méthode pour réduire les pertes durant la récolte et la conservation des fourrages», *36^e Symposium sur les bovins laitiers*, Drumondville ; <https://www.agrireseau.net/bovinslaitiers/documents/Savoie.pdf>
- SHINNERS K.J., WUEST J.M., CUDOC J.E., HERZMANN J.E. (2006) : «Intensive conditioning of alfalfa: drying rate and leaf loss», *ASABE Annual Int. Meet. Oregon Convention Center Portland*, Oregon 9-12 July 2006.
- TAO L., GUO X.S., ZHOU H., UNDERSANDER D.J., NANDETY A. (2012) : «Characteristics of proteolytic activities of endo- and exopeptidases in alfalfa herbage and their implications for proteolysis in silage», *J. Dairy Sci.*, 95 (8), 4591-4595.
- TYROLOVA Y., VYBORNA A. (2011) : «The effects of wilting and biological and chemical additives on the fermentation process in field pea silage», *Czech J. Anim. Sci.*, 56 (10), 427-432.
- UJTTEWAAL A., TINNIÈRE P.A., BRICARD E., FÉRARD A., DELEAU D. (2017) : «L'enrubannage, une solution pour récolter et conserver les légumineuses fourragères ?», *Innovations Agronomiques*, 60, 107-124.