

Quoi de neuf en matière de récolte et conservation des légumineuses fourragères ?

A. Uijtewaal¹, S. Chapuis², G. Crocq³, P. Lépée⁴

L'évolution des matériels de récolte et conservation des fourrages est considérable depuis quelques décennies. Longtemps axés sur la récolte et la conservation du maïs et des graminées fourragères, les travaux s'intéressent depuis quelques années aux spécificités des légumineuses fourragères.

RÉSUMÉ

L'évolution récente des matériels, technologies et connaissances au service de la qualité des récoltes et de la conservation des légumineuses fourragères est ici retracée. L'accroissement des largeurs de travail des outils de fenaison et les faucheuses - conditionneuses à épandage large permettent d'intervenir plus facilement en réduisant les risques de pertes (respiration, lessivage, jus au silo, protéolyse). L'évolution des capacités des matériels soulève quelques points de vigilance propres aux légumineuses : la sensibilité des légumineuses aux pertes mécaniques lors de la fenaison et, pour l'ensilage, la compaction au silo malgré l'augmentation de débit des machines de récolte. En enrubannage, l'évolution des matériels offre des opportunités pour assurer la qualité des fourrages mais l'intégrité du film plastique reste un enjeu crucial.

SUMMARY

Advances in methods for harvesting and storing forage legumes

This work examines advances in knowledge and in tool and technology development related to forage legume harvest and storage. The use of mowers with increasingly wide working widths and the resurgence of mower-conditioners with wide swath belts have facilitated hay processing and reduced yield losses (e.g., via respiration, leaching, seepage, and proteolysis). Changes in tool capacities have raised several legume-specific issues. For example, mechanical losses during haymaking and the relationship between harvest flow levels and good compaction in the silo should be carefully monitored. New wrapping materials can also help preserve forage quality, but the resistance of plastic wrappers remains a crucial point of concern.

Les niveaux d'autonomie fourragère des élevages en France sont élevés, avec environ 97% d'autonomie fourragère pour les bovins laitiers en 2000 (PACCARD *et al.*, 2003) mais une autonomie protéique (fourrages et concentrés) plus faible (71%). Les fourrages constituent pourtant la première source de protéines pour les ruminants (HUYGHE, 2003). Après un effondrement des surfaces de légumineuses fourragères durant la seconde moitié du XX^e siècle en France (HUYGHE, 2009), la production *in situ* de protéines trouve un regain d'intérêt chez les éleveurs. En comparaison avec les graminées

prairiales, l'aptitude des légumineuses à être exploitées en pâturage ou conservées sous forme humide et/ou sèche est généralement moindre. **A une sensibilité accrue aux pertes mécaniques durant le processus de séchage au champ (CABON, 1982) s'ajoute une plus faible teneur en sucres des principales légumineuses fourragères rendant difficile leur conservation par voie humide.**

Dans un contexte dominé par la récolte et la conservation du maïs fourrage et des graminées prairiales, les auteurs proposent de retracer l'évolution conjointe des matériels, des technologies et des connaissances au service

AUTEURS

1 : ARVALIS - Institut du végétal, Station expérimentale de La Jaillière, F-44370 La-Chapelle-Saint-Sauveur ; a.ujtewaal@arvalisinstitutduvegetal.fr

2 : FNCUMA, 43, rue Sedaine, CS91115, F-75538 Paris cedex 11

3 : CLASEL, 141, boulevard des Loges, CS 84215, F-53942 Saint-Berthevin cedex

4 : Chambre d'Agriculture de la Creuse, 8, avenue d'Auvergne, CS 60089, F-23011 Guéret

MOTS CLÉS : Association végétale, conservation de la récolte, enrubannage, ensilage, évolution, foin, légumineuse, luzerne, machinisme agricole, pertes, valeur azotée.

KEY-WORDS : Agricultural machinery, alfalfa, change in time, crop conservation, hay, legume, losses, nitrogen value, plant association, silage, wrapping.

RÉFÉRENCE DE L'ARTICLE : Uijtewaal A., Chapuis S., Crocq G., Lépée P. (2016) : "Quoi de neuf en matière de récolte et conservation des légumineuses fourragères ?", *Fourrages*, 227, 157-166.

de la récolte et conservation des légumineuses fourragères des années 1990 à nos jours. Le séchage en grange et la déshydratation ne sont pas abordés ici.

Cet article s'attache d'une part à décrypter comment et en quoi l'avancée des connaissances et des technologies participent à relever les challenges en matière de récolte et conservation des légumineuses : préservation de la quantité et de la qualité, débit de chantier. D'autre part, cet article dresse de manière non exhaustive les opportunités et menaces dans le domaine de la récolte et conservation des légumineuses.

1. Récolter de la qualité en quantité, quoi de neuf au champ ?

Chez les légumineuses encore plus que chez les graminées, l'essentiel de la valeur alimentaire (protéines et fibres digestibles) réside dans les feuilles (tableau 1). L'enjeu majeur de la récolte est donc bien de conserver les feuilles afin de préserver la valeur nutritive. Au champ, il convient de garder à l'esprit que le choix des matériels ainsi que leurs réglages sont des leviers à actionner pour préserver la qualité du fourrage.

	Graminées		Luzerne	
	Limbes	Tiges et gaines	Feuilles	Tiges
MAT (% MS)				
- plantes jeunes	15 - 25	10 - 15	30 - 35	20 - 23
- plantes âgées	7 - 10	3 - 5	23 - 25	9 - 10
CB (% MS)				
- plantes jeunes	15 - 17	22 - 25	11 - 12	22 - 25
- plantes âgées	26 - 28	35 - 38	13 - 14	40 - 45

TABLEAU 1 : Teneurs en MAT et cellulose brute (CB) des organes de graminées et de luzerne selon leur stade (d'après JARRIGE, 1963 cité par DEMARQUILLY, 1982).

TABLE 1 : Crude protein (MAT) and cellulose (CB) levels in different parts of grass and lucerne plants at different developmental stages (after JARRIGE, 1963 quoted by DEMARQUILLY, 1982).

■ Les pertes dues à la hauteur de fauche

L'ampleur de ce « poste » est conditionnée par l'état du fourrage ainsi que le type et les réglages de la faucheuse. Les pertes peuvent être très élevées si le fourrage est versé (CABON, 1983). Par comparaison avec les graminées, l'enjeu est plus faible : les pertes selon la hauteur de fauche sont de l'ordre de 60 kg MS/(cm.ha) pour des hauteurs de coupe comprises entre 5 et 10 cm pour la luzerne, contre 150 et 300 kg MS/(cm.ha) respectivement pour de la fétuque élevée et du ray-grass (CABON, 1982). L'augmentation induite du rapport feuille/tige du fourrage accroît la teneur en MAT de +0,14 point par cm de hauteur de fauche relevé entre 5 et 10 cm sur des mélanges graminées et luzerne (THOMAS, 2007). Enfin, le dépôt du fourrage sur le matelas de chaumes modifie le microclimat sous l'andain en permettant la circulation d'air. Faucher ras hypothèque une partie du rendement des coupes suivantes car les premiers centimètres du sol permettent le redémarrage des nouveaux bourgeons. Faucher ras augmente aussi la teneur en cendres (WYSS, 2011) et diminue de fait la teneur en matière organique digestible par kilo de fourrage. Les risques de contaminations par les spores butyriques sont également augmentés et dommageables pour la conservation sous forme humide. Ainsi, **viser une hauteur de fauche de 8 cm constitue un bon compromis entre valeur alimentaire, rendement et risques sanitaires.**

■ Accélérer la vitesse de séchage tout en limitant les pertes : une affaire de compromis

Atteindre une teneur en matière sèche (MS) donnée dans un laps de temps court réduit les risques de pertes par lessivage, respiration cellulaire et protéolyse. D'un autre côté, les actions mécaniques visant à accélérer la dessiccation (conditionnement, fanage, andainage) occasionnent des pertes quantitatives et qualitatives conséquentes.

• Les pertes par respiration et protéolyse

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). La principale conséquence est la perte de MS variant de 1 à 7 % de la biomasse récoltée chez la luzerne (ORLOFF et MUELLER, 2008 et tableau 2). La

Fourrage récolté (composition, date de récolte, lieu)	Biomasse récoltée (t MS/ha)	Pluie dans les 8 jours précédant la fauche (mm)	Etalement du fourrage / Largeur de fauche (en %)	% MS en fin de 1 ^{re} journée (7,5 h après fauche)	% MS en fin de 2 ^e journée (55 h après fauche)
Luzerne					
1 ^{re} coupe stade bourgeonnement, du 31/05 au 5/06/12, à La Jaillière (44)	4,2	1,6	80 42	33,4 21,3	65,7 49,4
Ray-grass hybride et trèfle violet					
(46 % de trèfle) ; 2 ^e coupe (9 semaines de repousse), du 19/08 au 23/08/14, à Jeu-les-Bois (36)	4,8	35,8	84 60	35,7 28,2	72,6 70,7

TABLEAU 2 : Evolution de la teneur en matière sèche de fourrages avec légumineuses selon la largeur de l'andain (Arvalis - Institut du végétal, données non publiées).

TABLE 2 : Change in forage legume dry matter content according to swath width (Arvalis - Institut du végétal, unpublished datas).

perte de ces matières solubles concentre les teneurs en protéines et fibres (ROTZ, 2005). Une étude (TREMBLAY *et al.*, 2011) portant sur la variation journalière des teneurs en glucides non pariétaux (GNP) a confirmé que les teneurs en GNP au cours de la journée variaient et atteignaient leur maximum en fin d'après-midi. Elle a également montré que, malgré des teneurs en GNP différentes, le rythme de pertes était identique entre une luzerne fauchée le matin ou le soir.

Par ailleurs, PITT (1990) rappelle que ces pertes sont d'autant plus importantes que la teneur en MS du fourrage est faible (proche de la valeur sur pied, environ 20 %) et que la température extérieure est élevée. En conditions fraîches et sitôt après la fauche, il se pourrait que les mécanismes de photosynthèse contrebalancent la respiration des sucres, la photosynthèse étant moins sensible à la température que les phénomènes de respiration associés à la croissance. En préservant les sucres solubles, la dessiccation rapide est intéressante pour préserver la qualité du fourrage. Ceci est d'autant plus utile pour la conservation par voie humide. Ainsi, bien qu'une fauche l'après-midi permette de récolter un fourrage plus sucré, **une fauche dès la levée de la rosée accélère le séchage** et permet de faire sécher un fourrage dans un temps plus court.

• Les moyens disponibles pour accélérer le séchage

Les systèmes de conditionnement qui agissent mécaniquement sur le fourrage ont été conçus dans le but d'accélérer l'évacuation de l'eau des plantes. **Pour la luzerne, le conditionneur à rouleaux**, écrasant et pliant les tiges, constitue le meilleur compromis entre pertes de feuilles et vitesse de séchage (CABON, 1982 ; ROTZ, 2005). Sur le terrain, les avis divergent quant à l'intérêt des conditionneurs à rouleaux. En écrasant et pliant les tiges, les conditionneurs facilitent la sortie d'eau directement par les points de compression. En revanche, le transfert d'eau des tiges vers les feuilles peut être perturbé. Or, la luzerne contient 10 fois plus de stomates sur ses feuilles que les graminées. Au moins 35 % de l'eau contenue dans les tiges de luzerne sort de la plante à travers les feuilles ; c'est moins de 30 % dans le cas des graminées (BRISSON, 2008). A la suite d'un essai conduit sur luzerne en 2013 en Pays de la Loire, en comparaison avec une faucheuse classique, Arvalis - Institut du végétal conclut que le conditionneur à rouleaux est **d'autant plus efficace sur le séchage que le**

rendement n'est pas trop élevé (moins de 3,5 t MS/ha) **et que les conditions de séchage ne sont pas optimales** (peu de rayonnement et chaleur).

Dans le paysage des matériels de fenaison, nous pouvons citer le retour sur le devant de la scène des **faucheuses - conditionneuses avec dispositifs d'épandage large**. Les faucheuses - conditionneuses se détachent ainsi de leur image de faucheuses ne pouvant confectionner que des andains étroits. L'épandage large produit de plus un andain ébouriffé permettant la circulation d'air dans l'andain ce qui modifie le microclimat interne (MUNIER et MORLON, 1987). Démontrée à plusieurs reprises en Amérique du Nord sur luzerne (SHINNERS et HERTZMANN, 2006 ; KUNG *et al.*, 2010), l'importance de l'étalement du fourrage derrière la faucheuse a également été soulignée lors d'essais récents menés par Arvalis - Institut du végétal : sur luzerne (La Jaillière, 2012) et prairie multi-espèces (Jeu-les-Bois, 2014). La luzerne fauchée à 10 h 30 le matin et laissée à plat derrière la faucheuse sans conditionneur atteint 35 % MS 8 heures après. En andains (derrière la faucheuse conditionneuse), il faut 24 h de plus pour atteindre cette teneur (tableau 2).

■ Les pertes mécaniques

Y compris en conditions de séchage favorables, les pertes mécaniques chez les légumineuses constituent **le plus gros poste de pertes quantitatives et qualitatives**. Ces pertes sont dues à la fragilité du pétiole qui assure le lien entre la tige et la feuille (SHEPERD, 1961).

Au champ, **le type de matériels utilisés, leurs réglages et les conditions d'intervention** (taux de MS des feuilles) conditionnent les quantités de MS perdues (CROCQ *et al.*, 2014). Arvalis - Institut du végétal a mené une série d'essais entre 2011 et 2013 sur ces trois leviers (UIJTTEWAAL *et al.*, 2016). Les références françaises à ce sujet dataient des années 80 à 90 (DULPHY, 1987 ; PECCATTE et DOZIAS, 1998 ; DULPHY et MARTIN-ROSSET, 2001). Elles ont été réactualisées et les valeurs extrêmes sont présentées dans le tableau 3 en incluant l'ensemble des pertes mécaniques et par respiration.

• Pertes liées au type de matériel de fauche

Dans un essai conduit sur luzerne (2^e coupe, rendement sur pied de 2,7 t MS/ha) en 2013, Arvalis - Institut du végétal rapporte des pertes de MS à la fauche faibles et comparables (4 % du rendement) entre une conditionneuse

	Bonnes conditions de séchage et pratiques adaptées	Mauvaises conditions de séchage et pratiques inadéquates	Moyenne
Fauche / conditionnement	1	4	2
Pré-andainage / andainage	1	20	5
Pressage balles rondes	3	9	6
Pertes par respiration	4	7	4
Total	10	40	17

TABLEAU 3 : **Pertes extrêmes de rendement (%) possibles au champ dans une chaîne de récolte de foin en balles rondes** (CROCQ *et al.*, 2014).

TABLE 3 : **Maximum possible yield losses (%) in the field during harvesting (i.e. round baling)** (CROCQ *et al.*, 2014).

à rouleaux et une faucheuse à plat. Le conditionnement a permis dans cet essai d'atteindre l'objectif de 85 % MS plus rapidement, en raison du pourcentage de MS plus élevé des tiges. Les niveaux de pertes correspondent à ceux obtenus aux Etats-Unis (GREENLEES *et al.*, 2000 ; ROTZ et MUCK, 1994). Des niveaux de pertes bien supérieurs peuvent être obtenus avec des faucheuses conditionneuses à fléaux.

• Pertes liées au type de matériel de fanage et d'andainage

Au-delà des risques d'incorporation de terre dans le fourrage, les étapes de fanage et d'andainage peuvent être à l'origine de pertes quantitatives et qualitatives importantes. Ceci s'explique par l'agressivité des pièces qui frappent le fourrage à des vitesses élevées.

Le fanage occasionne des pertes et « révèle » celles causées par la fauche laissant tomber au sol les feuilles et folioles détachées de la plante. Des pertes pouvant aller jusqu'à 18% du rendement ont été rapportées (McCARTNEY, 2005, dans VERNOT, 2012). Ces pertes augmentent à mesure que le fourrage sèche du fait du caractère friable des feuilles (tableau 4).

Labaissement du régime de la prise de force, l'accroissement de la vitesse d'avancement et l'intervention sur un fourrage dont les feuilles sont humidifiées limitent les pertes. Le fanage peut être facultatif, y compris pour du foin, lorsque le rendement est faible (< 2 t MS) et/ou que les conditions de séchage sont excellentes. La dépose en andains larges, puis l'andainage, peuvent suffire à atteindre les 85 % MS requis.

Dans une enquête menée en 2011 en Pays de la Loire, auprès de 57 éleveurs, 37% d'entre eux estimaient qu'ils pourraient limiter les pertes lors de la récolte par l'adoption de matériels considérés comme plus adaptés (cité par VERNOT, 2012). Les retourneurs d'andains à tapis et andaineurs à soleils étaient couramment cités. **Si les systèmes d'andainage à tapis sont effectivement très adaptés à la récolte des légumineuses** (LANG *et al.*, 2011), **leur développement est très limité** dans l'hexagone du fait du prix d'achat 4 à 5 fois plus élevé que les giro-andaineurs. La réduction des pertes et du temps de séchage des fourrages ne justifie pas les surcoûts actuels (ROTZ, 2005). Les andaineurs soleils ont refait leur apparition de manière spectaculaire en France (CHAPUIS, communication personnelle). Sur le terrain, les avis sont partagés quant au bienfait de leur utilisation sur

Teneur en MS de l'andain (% MS)	Pertes de MS possibles (% du rendement)
40 %	2
50 %	3
67 %	7
80 %	12

TABLEAU 4 : Evolution des pertes possibles à l'andainage en fonction de la teneur en MS du fourrage (PITT, 1990).

TABLE 4 : *Change in potential losses during raking as a function of forage dry matter content* (PITT, 1990).

Type de matériel	Paramètre	1995	2005	2015
Faucheuse	Largeur moyenne (cm)	256	278	301
	dont conditionneuse	53 %	64 %	70 %
Faneuse	Largeur (cm)	405	548	624
Giro-andaineur	Largeur (cm)	342	425	528
	dont chambre variable	58 %	75 %	82 %
Presse balle ronde	dont avec :			
	- dispositif de hachage	0 %	20 %	31 %
	- liage filet	10 %	42 %	73 %
Ensileuse automotrice	Puissance (Ch)	271	328	372

TABLEAU 5 : Evolution de 1995 à 2015 des matériels de récolte détenus par les CUMA en France (FNCUMA, étude statistique sur plus de 40 000 matériels).

TABLE 5 : *Changes from 1995 to 2015 in the characteristics of the harvester types owned by French CUMAs* (statistical study on more than 40,000 machines).

légumineuses. L'acquisition de références fiables et précises en comparaison de matériels d'andainage reste difficile (BUCKMASTER, 1993, dans ROTZ, 2005). Par rapport aux giro-andaineurs classiques, la forme des andains est différente ; la largeur de ramassage et le réglage des machines doivent être adaptés pour former des andains aérés en fin de séchage (CROCG, 2012).

Comme illustré dans le tableau 5, **les largeurs des faneuses et andaineurs ont augmenté** de 54% en 20 ans. Pour les légumineuses, cette évolution est d'autant plus intéressante que les plages d'intervention dans la rosée peuvent être limitées à 1 ou 2 heures en été.

• Pertes liées au type de matériel de pressage

La teneur en MS du fourrage, la dimension des andains, le type de presse (types de chambre et d'ameneur, liage, rotocut) déterminent l'ampleur des pertes au pressage. Lenjeu semble néanmoins plus faible que pour les autres étapes. En 1985, KOEGEL *et al.* relatent des pertes de 10,9%, 3,8% et 2,8% pour respectivement un pressage en balle ronde avec chambre variable, chambre fixe et un pressage en balle carrée basse densité. En 2015, avec une presse à chambre variable, avec rotocut, ameneur rotatif et liage filet, les pertes enregistrées ont été comprises entre 1,3 et 3,0% du rendement sur pied pour un fourrage compris entre 42 et 67% MS (Arvalis - Institut du Végétal, 2015, SOS Protein, données non publiées).

2. Préserver la quantité et la qualité : quoi de neuf du champ à l'animal ?

■ La conservation par voie humide et les pertes durant la phase aérobie

La plupart des légumineuses se caractérisent par une faible teneur en sucres ainsi qu'un fort pouvoir tampon exercé par les protéines et les minéraux. Préfaner rapidement

au-delà de 35 % MS permet de prévenir le développement des butyriques et limite la protéolyse (MAC DONALD *et al.*, 1991 ; MUCK et KUNG, 1997).

• Le cas de l'ensilage

Après fermeture du silo, la première étape du processus d'ensilage est aérobie. **La porosité évolue de manière inverse avec la densité et l'humidité du fourrage.** Selon HOLMES et MUCK (2008), la quantité d'air piégé dans un ensilage de densité de 200 kg MS/m³ est d'environ 1,9 l par kg MS lorsque le fourrage est à 30 % MS contre 3,4 l lorsque le fourrage est à 50 % MS. De fait, la quantité d'oxygène à épuiser avant l'atteinte de conditions anaérobies nécessaires au déclenchement des fermentations favorables en dépend. Durant ce laps de temps, plusieurs phénomènes ont lieu. Les principaux sont la protéolyse et la respiration végétale. Les cellules du fourrage consomment l'oxygène jusqu'à son épuisement. Les substrats organiques utilisés durant cette réaction sont les sucres, transformés en eau, dioxyde de carbone et énergie thermique. Bien que nécessaire, cette réaction consomme une partie des sucres qui seront ultérieurement nécessaires à la fermentation lactique en sachant que leur quantité peut être limitante pour des fourrages à faible teneur en MS (< 50%). Par ailleurs, l'énergie libérée durant cette réaction chauffe le fourrage et ce d'autant plus que le fourrage est sec, du fait d'une plus faible capacité thermique volumique. Une température de 30°C est favorable aux fermentations lactiques dont l'optimum thermique se situe à 32°C. Au-delà, les conditions sont favorables au développement d'autres micro-organismes nuisibles : les levures, les moisissures et les butyriques. Leur développement entraîne la production de CO₂, alcools et acide acétique ainsi que la transformation des protéines en acides aminés puis en ammoniac voire amines. Cela se traduit ainsi par un gaspillage de sucres, une perte de matière, une faible contribution à l'acidification et une baisse de la valeur azotée du fourrage (PDIE). L'ingestion sera par ailleurs pénalisée.

Depuis le début des années 1990, nombreuses ont été les publications scientifiques faisant état des **facteurs régissant la densité du fourrage ensilé.** En 1999, HOLMES et MUCK ont mis en avant l'effet du poids des engins tasseurs, du temps de tassement, du taux de MS du fourrage à l'entrée du silo ainsi que du débit de chantier exprimé en t de fourrage ensilé par heure. Le tableau 6 répertorie les paramètres ayant eu des effets significatifs sur la densité des silos.

Parmi les 5 études ayant pris en compte le facteur « longueur des brins » (tableau 6), seule une (MUCK *et al.*, 2004a, cité par SAVOIE et D'AMOURS, 2008) conclut à la significativité de ce facteur. Dans cette publication, deux longueurs de brins étaient comparées (10 et 19 mm). Ces études ont toutes été conduites sur le continent américain (Canada, Etats-Unis) dont les pratiques en termes de hachage du fourrage (longueurs comprises entre 10 et 20 mm pour l'herbe) diffèrent largement des habitudes européennes (longueurs supérieures à 30 mm).

Au-delà de l'avancée des connaissances mentionnées ici, plusieurs paramètres essentiels ont changé dans la conduite des chantiers d'ensilage depuis les années 1990. On peut notamment citer **l'évolution des débits de chantier** en lien avec la généralisation des ensileuses automotrices et l'augmentation de leur puissance (tableau 5). De fait, les débits de chantiers permis par des ensileuses automotrices de 600 ch sont deux fois plus élevés que les débits de chantier réalisés avec les automotrices des années 1990. Sans changement proportionnel à ces évolutions, des paramètres tels que la durée de compaction ont pu être dégradés. Par ailleurs, les remorques ensileuses (ou autochargeuses) font leur retour sur le devant de la scène. Bien que répondant à une question d'autonomie et de souplesse dans la réalisation du chantier (fauche régulière des légumineuses pour conserver la qualité), elles souffrent d'une incapacité à atteindre des longueurs de coupe inférieures à 35 mm.

En France, aujourd'hui, **les chantiers d'ensilage de légumineuses sont de petite taille**, environ 4 à 10 ha par ferme soit une masse de 12 à 40 t MS de fourrage à ensiler par coupe. Les silos confectionnés sont de faible hauteur et ne bénéficient que très peu de l'effet d'autocompaction offert par une colonne de fourrage sur elle-même (SAVOIE et D'AMOURS, 2008). Plus un silo est de petite taille, plus le ratio "surface en contact avec la bâche" / "volume total de fourrage" est élevé. De fait, le fourrage situé dans les couches supérieures du silo, et donc peu tassé, est vulnérable vis-à-vis des pertes par respiration et par échauffement tôt après la mise en silo et lors du désilage.

• Le cas de l'enrubannage

Dans l'enrubannage, les fermentations sont généralement moins poussées que dans l'ensilage. Tout d'abord, la plus forte teneur en MS du fourrage au pressage limite les

Publication	% MS	Longueur des brins	Temps de compaction	Hauteur du silo	Pression appliquée	Epaisseur des couches	Poids du tracteur
MESSER et HAWKINS (1977)	x	x			x*		
DARBY et JOFRIET (1993)	x	x		x	x		x*
BERNIER-ROY <i>et al.</i> (2001)	x*	x	x		x*	x*	
MUCK et HOLMES (2000)	x*	x	x*	x*	x	x*	x*
MUCK <i>et al.</i> (2004a)	x*	x*	x		x*	x	
MUCK <i>et al.</i> (2004b)			x				

x : paramètre étudié dans la publication, * : paramètre ayant un effet significatif sur la densité

TABLEAU 6 : **Récapitulatif des paramètres pris en compte dans plusieurs études pour prédire la densité d'ensilage d'herbe en silo couloir** (SAVOIE et D'AMOURS, 2008).

TABLE 6: **Summary of variables examined in several studies modeling the density of grass silage in bunker silos** (SAVOIE and D'AMOURS, 2008).

fermentations. D'autre part, la conservation de brins longs comparativement à l'ensilage en coupe fine limite l'accès aux sucres intracellulaires, carburant des fermentations. Par ailleurs, la plus faible densité de fourrage obtenue au pressage pourrait également être à l'origine de restriction de fermentations. Par comparaison à l'ensilage, cela se traduit généralement par une moindre production de produits de fermentations, une moindre protéolyse ainsi qu'un pH plus élevé (MUCK, 2006).

En 2004, HAN *et al.* (dans MUCK, 2006) ont mis en évidence l'importance de la densité des balles sur les qualités de conservation de l'enrubannage de luzerne. A 48 % MS, une densité de 200 kg MS/m³ a permis d'obtenir un pH significativement plus bas qu'à 168 kg MS/m³. En 2006, BORREANI et TABACCO, ont étudié l'effet du hachage sur la conservation. Avec une longueur de coupe théorique de 9,3 cm, ils ont observé une baisse plus rapide du pH dans un essai sur luzerne à 49 % MS, sans modification de la valeur finale par rapport à la modalité sans rotocut. En revanche, pour la modalité avec la teneur en MS la plus forte (61 %), le pré-hachage du fourrage a permis d'obtenir un pH significativement plus bas. Ces mêmes auteurs observent un gain de densité de 2,5 à 4,7 % avec une presse à chambre variable. Ils rapportent également que BISAGLIA *et al.* (2001) ont trouvé des augmentations de densité de 7,8 et 14,3 % pour un enrubannage de luzerne à 50,7 % MS grâce au rotocut avec respectivement une presse à chambre fixe et une chambre variable.

En 2006, MUCK conclut que l'effet de la densité et du hachage semble limité pour des teneurs en MS faibles. En revanche, pour des teneurs en MS supérieures à 50 %, l'effet semble plus prononcé et s'expliquerait par une meilleure mise à disposition des sucres grâce au hachage et à l'éclatement des cellules sous la pression exercée. Depuis 1995, **la part des presses à chambre et/ou équipées de système de hachage n'a cessé d'augmenter** (tableau 5). On sait par ailleurs que ces matériels sont capables de réaliser des **balles de densité moyenne** égale à 180-200 kg MS/m³. De fait, **ces évolutions vont dans le sens d'une sécurisation de la conservation des fourrages pauvres en sucres**. Enfin, l'accroissement des densités réduit les coûts de transport, de manutention et de filmage, et facilite également la distribution des enrubannages.

En 2015, Arvalis - Institut du Végétal a conduit un essai (SOS Protein, données non publiées) mesurant l'effet de la teneur en MS au pressage sur les pertes quantitatives et qualitatives durant la conservation d'une luzerne sous forme enrubannée. Après 210 jours de conservation, la teneur en azote soluble s'élevait respectivement à 69,2, 52,7 et 47,6 % de l'azote total (moyenne de 3 balles/modalité) pour des teneurs en MS au pressage égales à 43, 63 et 67 % MS. Ces résultats illustrent bien la **réduction de protéolyse avec l'augmentation de la teneur en MS du fourrage**. A l'issue de travaux expérimentaux, AMYOT (2003) donne une relation entre la teneur en azote soluble du fourrage et la dégradabilité théorique (DT) de la MAT (tableau 7). **A 18 % de MAT, l'augmentation de 19 points de DT MAT induit respectivement une baisse des valeurs PDIN et PDIE de 18 et 36 g/kg MS**. Compenser cette baisse de valeur protéique par

un tourteau de soja 48 (350 €/t) induirait un surcoût de 40 €/t MS de luzerne enrubannée soit 12 €/balle (300 kg MS). Un préfanage suffisant permet donc de mieux préserver la valeur protéique du fourrage. En revanche, l'augmentation de la teneur en MS du fourrage au pressage augmente le risque de développement de moisissures. Huit balles par modalité ont fait l'objet de mesures. La surface extérieure des balles couverte par des moisissures s'est élevée respectivement à 1,7, 4,0 et 7,8 % de la surface totale de la balle pour des teneurs en MS au pressage égales à 43, 63 et 67 %.

■ Conservation par voie humide : le maintien des conditions anaérobies est impératif

Apparus au début des années 2000, les **films de type « barrière à oxygène »**, issus de la coextrusion de polyéthylène (PE) avec du polyamide ou EVOH (*Ethylene Vinyl Alcohol*), se caractérisent par une perméabilité à l'oxygène 300 fois inférieure à celle des films en PE seul selon BORREANI et TABACCO (2012) (cités par WILKINSON et FENLON, 2014). Dans une méta-analyse conduite par WILKINSON et FENLON (2014), la comparaison des pertes de fourrages (maïs, graminées et légumineuses) obtenues avec une couverture de silo « standard » versus une couverture de type « barrière à oxygène » (OB, *Oxygen Barrier film*) a mis en évidence des pertes de la partie superficielle (couche allant de 10 à 60 cm de profondeur) du silo égales à 19,5 % de la MS (ou MO) pour le film standard contre 11,4 % pour le OB, avec seulement 8 cas sur 41 à l'avantage des films standard. Les pertes par inconsommables se sont également révélées inférieures pour le film OB (3 % contre 11 % pour le standard). Le fourrage situé dans la couche supérieure du silo couvert avec OB présentait en moyenne une stabilité aérobie supérieure (134,5 h contre 75,3 h). Dans les conditions d'ensilage de légumineuses en France (faible densité des petits silos et fourrage préfané à plus de 35 % MS), la porosité de la masse de fourrage ensilé est généralement élevée, conduisant à des pertes importantes (échauffement, inconsommables). La couverture par des plastiques de type OB pourrait permettre de réduire ces postes de pertes.

Du fait du fort ratio surface/volume, l'enrubannage est un mode de conservation qui expose une forte proportion du fourrage conservé à une surface plastique, seule barrière

Teneur en MS (%)	MAT (g/kg MS)	N soluble (%)	DT MAT (%)
67	180	48	59
43	180	69	78

TABLEAU 7 : Effet de la teneur en matière sèche de la luzerne au pressage sur la teneur en azote soluble et la dégradabilité théorique de la MAT (DT MAT) après 210 jours de conservation (Arvalis - SOS Protein, 2015).

TABLE 7 : Effect of dry matter content on soluble nitrogen and potential crude protein degradation (DT MAT) in lucerne after 210 days of storage (Arvalis - SOS Protein, 2015).

à l'environnement extérieur. Les étapes de liage, filmage ainsi que le maintien de l'intégrité du film plastique vont permettre de maintenir l'anaérobiose du milieu. Le **liage par filet**, largement répandu aujourd'hui (tableau 5) permet, par rapport à la ficelle, de produire une balle dont la surface arrondie est régulière. Après vérification des réglages de l'enrubanneuse (GAILLARD, 1998), la pose du plastique est alors régulière, sans formation de poches d'air. Le **risque de perçage par les tiges rigides** est également **plus faible**. Ces bénéfices peuvent être accrus par l'utilisation de filet de type « *cover-edge* », permettant de recouvrir les bords des balles, lieux fréquents de perçage. Apparu très récemment, le liage par film plastique permet, selon BISAGLIA et TABACCO (2011), de réduire le développement des moisissures visibles sur la face arrondie des balles. Enfin, rappelons que l'obtention d'une balle dense avec une teneur en MS élevée garantit une bonne tenue durant la manipulation et le stockage, évitant ainsi les perçages et créations de poches d'air dus à la déformation des balles. Pour finir, concernant la qualité des plastiques en enrubannage, les données de 10 essais de comparaisons de plastique « standard » (polyéthylène) *versus* « barrière à oxygène » mentionnent des niveaux de pertes de MS de 7,7% de la MS en moyenne pour les films standard contre 4,6 pour les films barrière à oxygène (WILKINSON, 2014).

■ Les additifs de conservation : quel intérêt pour la conservation des légumineuses ?

Contrairement à d'autres pays européens, ou même en Amérique du Nord, **le marché des additifs ne s'est jamais vraiment développé en France** du fait des difficultés à mesurer leur efficacité réelle en élevage et de leur coût souvent prohibitif. En France, seulement 15 à 20% des fourrages conservés en ensilage bénéficiaient d'une incorporation en 2008 (VIGNAU-LOUSTAU et HUYGHE, 2008).

Chez les légumineuses, l'enjeu de la conservation par voie humide réside notamment dans la préservation des protéines du fourrage. En effet, le processus d'ensilage augmente la dégradabilité ruminale des protéines, diminuant ainsi leur valeur PDIA. A l'exception du trèfle violet et du sainfoin qui contiennent des substances bioactives (respectivement l'enzyme polyphénol oxydase et des tanins), les autres légumineuses de fauche se caractérisent par leur forte sensibilité à la protéolyse.

En raison du pouvoir tampon élevé et de la faible teneur en sucres solubles des légumineuses, la vitesse et le niveau d'acidification du fourrage humide peuvent être insuffisants pour garantir une bonne conservation. Pour pallier ces insuffisances, deux types d'additifs sont utilisés : les inoculants bactériens homofermentaires (bactéries favorisant la fermentation lactique, avec ou sans enzyme) et les acides qui ont une action acidifiante et anti-fongique. Jugés peu pratiques d'utilisation, les additifs de type acides sont de moins en moins plébiscités (MUCK, 2010). L'exemple des **inoculants bactériens homofermentaires** est ici développé. L'ajout d'un contingent de bactéries lactiques oriente généralement les fermentations, faisant augmenter la quantité d'acide lactique produite ainsi que le ratio acide

lactique / acide acétique. En créant des conditions défavorables à l'action des bactéries butyriques et des protéases, l'ensilage se caractérise généralement par un pH plus bas et une plus faible teneur en azote soluble, signe d'une meilleure conservation de la protéine (FILYA *et al.*, 2007 ; CONTRERAS-GOVEA *et al.*, 2011 ; HASHEMZADEH-CIGARI *et al.*, 2011 ; POSTULKA *et al.*, 2012 ; JATKAUSKAS et VROTNIKIENE, 2009). Cependant, malgré une augmentation de l'acidification, une plus faible teneur en azote ammoniacal n'a parfois pas été observée (RIZK, 2004). Outre la conservation de la protéine, la réduction de pertes de MS est souvent constatée (JATKAUSKAS et VROTNIKIENE, 2009). Dans une méta-analyse réalisée par MUCK et KUNG en 1997, la réduction des pertes de MS grâce à l'ajout d'additifs a été observée dans 38% des études sur le sujet. Lorsqu'elle était observée, la réduction des pertes de MS s'élevait à 6%. Côté performances animales, un effet positif était observé dans près de 50% des études, avec une augmentation du gain de poids de 5% pour l'engraissement et de 3% pour la production laitière.

L'efficacité des additifs biologiques reste conditionnée à plusieurs paramètres parmi lesquels la teneur en sucres solubles du fourrage, sa teneur en MS ainsi que la flore et le contingent bactérien présents à la mise en silo. La plupart de ces paramètres **ne peuvent être connus qu'après la mise en silo, ce qui complexifie la prise de décision** et la définition de seuils d'intérêt technico-économiques. En 1997, MUCK et KUNG tentent de définir une grille indicative quant à l'intérêt technico-économique d'utiliser un additif de type inoculant bactérien homofermentaire, en fonction de différents paramètres simples et connus le jour de la mise en silo. En résumé, durant le préfanage, plus la dessiccation du fourrage est rapide et la température basse, et plus l'utilisation d'un inoculant bactérien homofermentaire serait pertinente économiquement. Ceci tient au fait que la durée du préfanage et la température sont des facteurs favorables au développement des bactéries lactiques épiphytiques. A l'inverse, ces mêmes facteurs sont responsables de la perte des sucres par respiration. La définition des domaines d'intérêt technico-économiques revient ainsi à décrire de manière probabiliste les situations où le contingent bactérien lactique épiphytique est le facteur limitant de la conservation du fourrage en ensilage. En France, au-delà du manque de références sur l'efficacité des additifs, les difficultés dans l'application des doses recommandées constituent un problème pratique pour les utilisateurs.

3. Opportunités et menaces dans l'évolution des chaînes de récolte et conservation

■ Evolution des matériels et des technologies : maintenir l'objectif de qualité

Concilier qualité et débit de chantier : tel devra rester l'objectif des constructeurs et des utilisateurs pour chacune des étapes de l'itinéraire technique de récolte. A titre

d'exemple, l'augmentation des débits de chantier de fauche s'est opérée par deux facteurs : d'une part la vitesse de travail, permise par des suspensions toujours plus efficaces, et d'autre part la largeur avec notamment le développement des combinaisons doubles ou triples. **Un point de vigilance attire notre attention** : il s'agit de la **capacité souvent limitante des systèmes de conditionnement à rouleaux** – particulièrement adaptés aux légumineuses – à réellement produire un écrasement des tiges en présence d'un fort volume et/ou d'une vitesse d'avancement élevée.

L'accroissement des largeurs de travail réduit implicitement le trafic dans les parcelles, ce qui réduit la surface des zones tassées et les dommages causés aux jeunes bourgeons. En revanche, les combinés, les autochargeuses et les bennes de grande capacité peuvent occasionner des tassements. Or, les légumineuses et leurs bactéries associées sous forme de nodosités sont particulièrement sensibles aux phénomènes de compaction profonds et superficiels (THIÉBEAU, 2007).

La tendance de l'enrubannage monoballe au champ ne semble plus remise en cause. Cependant, même si la rapidité d'enrubannage est un atout – particulièrement en combiné presse - enrubanneuse –, **le maintien de l'intégrité du film reste problématique lors de l'enrubannage au champ et le processus devra évoluer sur ce point**, tout en maîtrisant les consommations de plastique. L'enrubannage en continu, bien qu'économique en plastique et rapide d'exécution, n'a pas bénéficié du développement qu'il mérite. Enfin, l'arrivée des combinés presse non-stop - enrubanneuse, au même titre que les enrubanneuses traînées permettant la prise en charge de deux balles, fera de la dépose de la balle filmée, l'opération la plus coûteuse en temps. Tant que des mécanismes respectant l'intégrité du film ne seront pas trouvés, la dépose de la balle à l'arrêt restera nécessaire.

L'andainage est l'étape de l'itinéraire en laquelle nous portons le plus d'espoir. Les très majoritaires et peu onéreux giro-andaineurs ne laissent que peu de place au système à tapis. Le mode de travail de ce dernier matériel est théoriquement gage d'une faible perte de feuilles et d'un respect des jeunes bourgeons, deux points cruciaux pour les légumineuses fourragères et la qualité des fourrages récoltés. Combiné à un système d'épandage large à la fauche, ce matériel permettrait par exemple d'obtenir un enrubannage, voire un foin, sans avoir recours à des outils à action rotative néfaste à la qualité du fourrage et à l'intégrité des jeunes bourgeons.

■ Vers plus de modularité et de polyvalence

Ces deux qualités s'illustrent chez les **ensileuses**, dont les réglages sont facilités pour des alternances de récolte entre herbe et maïs. C'est également le cas des **presses à chambre variable** qui, selon le principe « *qui peut le plus, peut le moins* », permettent de confectionner des balles de haute densité tout comme des balles de basse densité. Aujourd'hui quasi exclusivement de type fixe, les combinés presses - enrubanneuses évoluent vers des chambres varia-

bles et pourront bientôt offrir des densités de balles plus élevées. Les possibilités d'actionnement de tout ou partie des couteaux du dispositif de hachage constituent un vrai plus.

Cette modularité ne se retrouve pas suffisamment chez les faucheuses. Par exemple, sur certains modèles de faucheuses - conditionneuses, il n'existe pas de réglage de la vitesse de conditionnement. Chez d'autres, le réglage oblige un changement fastidieux de poulies d'entraînement. Notons qu'au moins un constructeur majeur propose un système facilement amovible de conditionneur permettant de passer d'une fauche à plat, non conditionnée, à un conditionnement à fléaux ou à rouleaux ce qui, de notre point de vue, répond à la nécessité économique de polyvalence du matériel tout en permettant un travail adapté.

■ Vers l'asservissement des automotrices et des tracteurs

Les technologies permettent l'atteinte de plusieurs objectifs : confort, sécurité, débit de chantier, qualité... Les différents réglages opérés depuis les consoles dans les cabines et les automatismes ont facilité la vie des utilisateurs. On peut par exemple citer les dispositifs d'aide au remplissage des bennes lors de l'ensilage. Côté qualité, au-delà de la nécessaire évolution des connaissances et la définition de domaine d'intérêt technico-économique d'utilisation des conservateurs, l'application devra être assistée par des capteurs permettant notamment d'évaluer de manière instantanée plusieurs paramètres d'intérêt : rendement, teneur en MS, composition chimique voire microbiologique. A ce jour, sur le terrain, les difficultés de réglages conduisent à de nombreux cas de sur- ou sous-dosages des additifs, tantôt nuisibles à la rentabilité ou à l'efficacité.

■ Une nécessaire évolution des connaissances et de l'effort de la Recherche - Développement

Comme souligné à plusieurs reprises dans cet article, plusieurs thématiques d'intérêt sont à approfondir en France. Donnons l'exemple des matières plastiques utilisées dans la couverture des silos ou des balles enrubannées, ou bien encore les additifs de conservation. Sur ce dernier point, l'efficacité des additifs biologiques ainsi que la connaissance des communautés microbiennes présentes sur les légumineuses (flore épiphyte) doivent (re)devenir une priorité de la recherche fondamentale et appliquée. Enfin, au regard des évolutions technologiques et du pas de temps nécessaire à l'acquisition de références solides en matière de récolte et conservation des fourrages, l'effort de Recherche - Développement en France devra être soutenu. La transmission et la mobilisation de ces références par les éleveurs et utilisateurs seront conditionnées par les moyens qui seront engagés par les services de Développement sur le thème de la récolte et conservation des fourrages.

Conclusion

Nous avons vu tout au long de cet article que des adaptations des techniques de récolte sont nécessaires pour préserver la valeur alimentaire des légumineuses fourragères. Récemment, les techniques de la déshydratation et du séchage en grange ont (re)démontré l'intérêt d'adapter les modes de récolte et de conservation aux caractéristiques des légumineuses : préfanage rapide et préservation des feuilles par le bais de la fauche à plat puis regroupement des andains avec andaineurs à tapis pour le secteur de la déshydratation, et récolte dès 60 % MS pour limiter les pertes de feuilles par brisure pour le séchage en grange. Les références évoquées dans cet article illustrent l'intérêt de l'évolution conjointe des connaissances et du machinisme. De nouveaux travaux sont engagés et devront encore l'être pour récolter et conserver d'autres légumineuses (trèfles, vesces, lotiers, féverole...). La prise en compte de nouvelles dimensions telles que la logistique et l'organisation des chantiers de récolte permettrait d'accompagner le développement des légumineuses. Demain, la qualité des fourrages constituera plus que jamais un moyen de garantir la durabilité des systèmes d'élevage de ruminants.

Intervention présentée aux Journées de l'A.F.P.F.,
"Les légumineuses fourragères et prairiales : quoi de neuf ?",
les 21 et 22 mars 2016

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.
- BISAGLIA C., TABACCO E., BORREANI G. (2011) : "The use of plastic film instead of netting when tying round bales for round baled silage", *Biosystems Engineering*, 108, 1-8.
- BORREANI G., TABACCO C. (2006) : "The effect of a baler chopping system on fermentation and losses of wrapped big bales of alfalfa", *Agronomy J.*, 98, 1-7.
- BRISSEON J. (2008) : "Le traitement des fourrages, de la récolte à la vache", 32^e *Symp. sur les bovins laitiers*, Drummondville (Québec), https://www.agrireseau.net/bovinslaitiers/documents/Brisson_Jean_AR.pdf
- CABON G. (1982) : "Les pertes en cours de récolte et de conservation de la luzerne et du trèfle violet", *Fourrages*, 90, 161-172.
- CABON G. (1983) : "Les pertes de matière sèche au cours de la récolte et de la conservation des fourrages", *Actes du Forum des Fourrages Bovins Viande*, Châteauroux, 163-167.
- CONTRERAS-GOVEA F.E., MUCK R.E., MERTENS D.R., WEIMER P.J. (2011) : "Microbial inoculant effects on silage and in vitro ruminal fermentation, and microbial biomass estimation for alfalfa, bmr corn, and corn silages", *Animal Feed Science and Technology*, 163, 2-10.
- CROCQ G. (2012) : *La récolte de la luzerne en foin : déterminer la chaîne de récolte permettant de produire un foin en quantité et de qualité – Essai 2012 La Jaillière*, Rapport d'essai (non publié), Arvalis - Institut du Végétal, 13 p.
- CROCQ G., SORIN S., PROTIN P.V. (2014) : *Luzfil - La luzerne en Pays de la Loire : réussir la récolte pour une valorisation optimale en élevage bovin lait*, 6 p, <http://idele.fr/presse/publication/idelesolr/recommends/la-luzerne-en-pays-de-loire-reussir-la-recolte.html>
- DEMARQUILLY B. (1982) : "Valeur alimentaire des légumineuses (luzerne et trèfle violet) en vert et modifications entraînées par les différentes méthodes de conservation", *Fourrages*, 90, 181-202.
- DULPHY J.P. (1987) : "Fenaïson : pertes en cours de récolte et conservation. Les fourrages secs : récolte, traitement, utilisation", *Exposés, témoignages et table ronde des XVI^e Journées du Grenier de Theix*, 21-23 mai 1985, INRA, 103-124.
- DULPHY J.P., MARTIN ROSSET W. (2001) : "Valeurs comparatives de différents types de fourrage conservés", Garel J.P. et Josien E. (coord.), *Etude de la faisabilité de la mise en œuvre de l'arrêt de l'utilisation des fourrages fermentés*, Pôle fromager AOC Massif central, Aurillac, 12-30.
- FILYA I., MUCK R.E., CONTRERAS-GOVEA F.E. (2007) : "Inoculant effects on alfalfa silage: fermentation products and nutritive value", *J. Dairy Sci.*, 90, 5108-5114.
- GAILLARD F. (1998) : "De la fauche à la distribution des fourrages. Les innovations récentes du machinisme", *Fourrages*, 155, 319-330.
- GREENLEES W., HANNA H.M., SHINNERS, K. MARLY S., BAILEY T.B. (2000) : "A comparison of four mower conditioners on drying rate and leaf loss in alfalfa and grass", *Appl. Eng. Agric.*, 16, 15-21.
- HASHEMZADEH-CIGARI F., KHORVASH M., GHORBANI G.R., TAGHIZADEH A. (2011) : "The effects of wilting, molasses and inoculants on the fermentation quality and nutritive value of lucerne silage", *South African J. Animal Sci.*, 41.
- HOLMES B.J., MUCK R.E. (1999) : *Factors affecting bunker silo densities*, University of Wisconsin, 7 p.
- HOLMES B.J., MUCK R.E. (2008) : *Packing bunker and pile silos to minimize porosity*, 2 p, Wisconsin Team Forage, <http://citeseeerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.517.819&rep=rep1&type=pdf>
- HUYGHE C. (2003) : "Les fourrages et la production de protéines", *Fourrages*, 174, 145-162.
- HUYGHE C. (2009) : "Evolution des prairies et cultures fourragères et de leurs modalités culturales et d'utilisation en France au cours des cinquante dernières années", *Fourrages*, 200, 407-428.
- JATKAUSKAS J., VROTHIENKIENE V. (2009) : "The influence of application of a biological additive on the fermentation and nutritive value of lucerne silage", *Zemdirbyste Agric.*, 96, 4, 197-208.
- KOEGEL R.G., STRAUB R.J., WALGENBACH R.P. (1985) : "Quantification of mechanical losses", *Transactions of ASAE*, 28, 1047-1051.
- KUNG JR.L., STOUGH E.C., McDONELL E.E., SCHMIDT R.J., HOFHERR M.W., REICH L.J., KLINGERMAN C.M. (2010) : "The effect of wide swathing on wilting times and nutritive value of alfalfa haylage", *J. Dairy Sci.*, 93, 1770-1773.
- LANG S., CHRIST J.M., BORNERT A. (2011) : "L'évolution technologique du matériel de récolte au service de la qualité du fourrage prairial conservé", *Fourrages*, 206, 107-119.
- MCDONALD P., HENDERSON A.R., HERON S.J.E. (1991) : *The Biochemistry of silage*, 2nd edition, Chalcombe Publications, Marlow, Bucks.
- MUCK R.E. (2006) : "Fermentation characteristics of round bale silages", *Proc. Southern pasture and forage crop improvement conference*, Auburn (Alabama), Auburn University Press, 1-11, https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Fermentation%20characteristics%20of%20round%20bale%20silages&author=RE.%20Muck&pages=1-11&publication_year=2006

- MUCK R.E. (2010) : "Silage microbiology and its control through additives", *Revista brasileira de zootecnia*, 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).
- MUNIER E., MORLON P. (1987) : "Le séchage du foin au champ", *Fourrages*, 109, 54-74.
- ORLOFF S.B., MUELLER S.C. (2008) : "Harvesting, curing and preservation of alfalfa", C.G. Summers et D.H. Putman éds, *Irrigated alfalfa management in mediterranean and desert zones*, University of California Agriculture and Natural Resources, Chapter 14.
- PACCARD P., CAPITAIN M., FARRUGIA A. (2003) : "Autonomie alimentaire des élevages bovins laitiers", *Fourrages*, 174, 243-257.
- PECCATTE J.R., DOZIAS D. (1998) : "Conservation et valeur alimentaire de la luzerne pour les ruminants", *Fourrages*, 155, 403-407.
- PITT R.E. (1990) : *Silage and hay preservation*, NRAES-5, Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca (NY).
- POSTULKA R., DOLEZAL P., PELIKAN J., KNOTOVA D. (2012) : "Effect of dry matter content and inoculation on ruminal protein degradability in alfalfa silages", *Iranian J. Applied Sci.*, 2, 45-49.
- RIZK C. (2004) : *Effects of inoculation on alfalfa silage quality and its feeding on the performance of dairy cattle*, thèse, Bibliothèques et archives du Canada, 114 p.
- ROTZ C.A. (2005) : "Postharvest changes in alfalfa quality", *Proc. California alfalfa and forage symposium*, 12-14/12/2005, Visalia (Californie), 253-262.
- ROTZ C.A., MUCK R.E. (1994) : "Changes in forage quality during harvest and storage", *Forage quality evaluation and utilization*, eds G.C. Fahey Jr. et al., *Am. Soc. Agron.*, Madison (Wisconsin), 828-868.
- SAVOIE P., D'AMOURS L. (2008) : "Density profile of herbage silage in bunker silos", *Canadian biosystems engineering*, 50, 357-365.
- SAVOIE P., TREMBLAY G., MORISSETTE R. (2012) : "Méthode pour réduire les pertes durant la récolte et la conservation des fourrages", 36^e *Symp. sur les bovins laitiers*, Drummondville (Québec).
- SHEPERD W. (1961) : "The susceptibility of hay species to mechanical damage. II. Effets de moisture content and variety", *Australian J. Agric. Res.*, 12, 5, p 783.
- SHINNERS K.J., HERZMANN M.E. (2006) : *Wide-swath drying and post cutting processes to hasten alfalfa drying*, ASABE Paper n°061049.
- THIEBEAU P. (2007) : "Effet des passages de roues des engins de récolte sur la production de cultures de luzerne", *Fourrages*, 190, 237-250.
- THOMAS E.D. (2007) : "Harvesting alfalfa and alfalfa grass. How low should we mow ?", *Issues of Hoard's Dairyman*, p 211.
- TREMBLAY G., MORIN C., BÉLANGER G., BERTRAND A., CASTONGUAY Y., MICHAUD R., BERTHIAUME R., ALLARD G. (2011) : *Affiche présentée lors de la 35^e édition du Symposium sur les bovins laitiers*, 27 oct., Drummondville, Québec.
- UIJTTEWAAL A., KARDACZ P., CROCO G. (2016) : "Récolte de foin de luzerne : effet des heures d'intervention et du réglage de la vitesse de rotation des toupies à l'andainage sur les pertes quantitatives et qualitatives", *Actes des Journées AFFF, Les légumineuses fourragères et prairiales : Quoi de neuf ?*, 214-215.
- VERNOT O. (2012) : *La récolte du foin de luzerne en Pays de la Loire, comment produire du foin de haute qualité*, MFE Isara – Arvalis-Insititut du végétal, 68 p.
- VIGNAU-LAUSTAU L., HUYGHE C. (2008) : "Récolte et conservation par voie humide", *Stratégies fourragères : pâturage, ensilage et foin*, éd. La France Agricole, 233-301.
- WILKINSON J.M., FENLON J.S. (2014) : "A meta-analysis comparing standard polyethylene and oxygne barrier film in terms of losses during storage and aerobic stability of silage", *Grass and forage sci.*, 69, 385-392.
- WYSS U. (2011) : "La hauteur de coupe, le préfanage et l'emploi de conservateurs influencent la valeur nutritive de l'ensilage d'herbe", *Fourrages*, 206, 119-123.



Association Française pour la Production Fourragère

La revue *Fourrages*

est éditée par l'Association Française pour la Production Fourragère

www.afpf-asso.org



AFPF – Maison Nationale des Eleveurs – 149 rue de Bercy – 75595 Paris Cedex 12
Tel. : +33.(0)1.40.04.52.00 – Mail : secretariat@afpf-asso.fr

Association Française pour la Production Fourragère