

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

A. Uijttewaal¹, S. Chapuis², G. Crocq³, P. Lépée⁴

1 : Arvalis – Institut du végétal, Station expérimentale de La Jaillière, F-44370 La-Chapelle-Saint-Sauveur ;
a.ujttewaal@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

Résumé

Depuis quelques années, il existe un regain d'intérêt pour les légumineuses fourragères. Après trois décennies axées essentiellement sur le développement de la récolte et la conservation du maïs fourrage et des graminées fourragères, cet article retrace, des années 1990 à nos jours, l'évolution des matériels, technologies et connaissances au service de la qualité des récoltes et de la conservation des légumineuses fourragères. L'accroissement des largeurs de travail des outils de fenaison ainsi que le retour des faucheuses - conditionneuses à épandage large permettent de saisir des fenêtres météorologiques plus courtes en réduisant les risques de pertes (respiration, lessivage, jus au silo, protéolyse). Bien que répondant à un nécessaire accroissement de la productivité du travail, l'évolution des capacités des matériels soulève quelques points de vigilance propres aux légumineuses ; on notera par exemple la sensibilité des légumineuses aux pertes mécaniques lors de la fenaison au champ et, pour l'ensilage, le maintien des capacités de compaction au silo en lien avec le débit des machines de récolte. En enrubannage, l'évolution des matériels offre des opportunités au service de la qualité des fourrages mais l'intégrité du film plastique reste un enjeu crucial.

Les niveaux d'autonomie fourragère des élevages en France sont élevés, avec environ 97 % d'autonomie fourragère pour les bovins laitiers en 2000 (PACCARD, 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 d'abord pour des raisons économiques, mais aussi pour des raisons environnementales et sociétales. 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 au travers de cet article de retracer l'évolution conjointe des matériels, des technologies et des connaissances au service 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.

TABLEAU 1 – Comparaison des teneurs en MAT et cellulose brute des organes de graminées et de la luzerne aux stades « jeune » et « âgé » (source : d'après JARRIGE, 1963 cité par DEMARQUILLY, 1982).

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

1.1. 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 à 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.

Sur le terrain, l'inclinaison du lamier permet de moduler la hauteur et son ajustement dépend du type de faucheuse (troisième point pour les faucheuses portées, longueurs des biellettes pour les traînées). Des systèmes simples tels que les patins permettant de réduire l'usure et garantir la hauteur de coupe, y compris à des vitesses élevées, ne sont généralement proposés qu'en option. Les constructeurs de faucheuses ont également intégré différentes technologies de suivi du dénivelé afin d'approcher une hauteur de coupe constante.

1.2. 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, 2009 et 2011, SAVOIE, 2012). La principale conséquence est la perte de MS variant de 1 à 7 % de la biomasse récoltée chez la luzerne (ORLOFF, 2008 et Tableau 2). De fait, la perte de ces matières solubles concentre les teneurs en protéines et fibres de la plante (ROTZ, 2005). Dans une étude portant sur la variation journalière des teneurs en glucides non pariétaux (GNP), MORIN (2012) a confirmé que les teneurs en GNP au cours de la journée variaient et atteignaient leur maximum en fin d'après-midi. Il 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. Les faucheuses conditionneuses à fléaux et à doigts ont été initialement développées pour les graminées tandis que des conditionneurs à rouleaux ont été mis au point pour les légumineuses. 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'humidité 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 de la légumineuse à récolter 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). Démonstré à plusieurs reprises en Amérique du Nord sur luzerne (SHINNERS et HERTZMANN, 2006 ; KUNG *et al.*, 2010), de récents essais menés par Arvalis - Institut du végétal montrent également l'importance de l'étalement du fourrage derrière la faucheuse : 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).

TABLEAU 2 – Comparaison de l'évolution des teneurs en matière sèche de fourrages en andains étroits ou en andains larges (Source : Arvalis - Institut du végétal, données non publiées).

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

1.3. Les pertes mécaniques

Y compris en conditions de séchage favorables, les pertes mécaniques chez les légumineuses constituent le plus gros poste de pertes sur les plans quantitatif et qualitatif. Ces pertes sont dues à la fragilité du pétiole qui assure le lien entre la tige et la feuille (SHEPERD, 1961). Ce lien est beaucoup plus fragile que celui qui lie le limbe aux tiges des graminées.

Au champ, le type de matériels utilisés, leurs réglages et les conditions d'intervention (heure de la journée, taux de MS des feuilles) conditionnent les quantités de MS laissées au sol (CROCQ *et al.*, 2014). Arvalis - Institut du végétal a mené une série d'essais entre 2011 et 2013 sur ces 3 leviers (UIJTTEWAAL *et al.*, 2016). Les références françaises à ce sujet dataient des années 80 et 90 (DULPHY, 1987 ; PECCATTE et DOZIAS, 1998 ; DULPHY et MARTIN-ROSSET, 2000). Elles ont été réactualisées et les valeurs extrêmes obtenues sont présentées dans le Tableau 3 en incluant l'ensemble des pertes mécaniques et par respiration.

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

Pertes par étape de récolte (%)	Pratiques adaptées	Pratiques non adaptées	Moyenne
Conditions de séchage	Bonnes	Mauvaises	
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

- 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 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, 1994). Des niveaux de pertes bien supérieurs peuvent être obtenus avec des faucheuses conditionneuses à fléaux.

- 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).

Il est possible de réduire les pertes en adaptant les réglages à la quantité de fourrage et à sa teneur en MS. L'abaissement 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.

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

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

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 légumineuses. L'acquisition de références fiables et précises en comparaison de matériels d'andainage reste difficile (BUCKMASTER, 1993, dans ROTZ, 2005). Par rapport aux giroandaineurs classiques, la forme des andains est différente ; la largeur de ramassage et le réglage des machines doivent donc être adaptés pour former des andains permettant une bonne aération du fourrage en fin de séchage (CROCQ, 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.

- 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) déterminent l'ampleur des pertes au pressage. L'enjeu semble néanmoins plus faible que pour les autres étapes. En 1985, KOEGEL relate 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 pieds pour un fourrage compris entre 42 et 67 % MS (Arvalis - Institut du Végétal, 2015, SOS Protein, données non publiées).

TABLEAU 5 – Evolution des matériels de récolte détenus par les CUMA en France depuis 1995 (source : FNCUMA, Etude statistique sur plus de 40 000 matériels).

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

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

2.1. 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 la protéolyse (MAC DONALD, 1991 ; MUCK et KUNG, 1997).

- Le cas de l'ensilage

Après fermeture du silo, la première étape du processus d'ensilage est aérobie. Pour un type de fourrage donné, la porosité est déterminée par la teneur en eau du fourrage et par la densité de fourrage couramment exprimée en kg MS/m³. La porosité évolue de manière inverse avec la densité et l'humidité du fourrage. Selon HOLMES (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. Le principal est 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 et 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. L'échauffement du fourrage conduit à la liaison des protéines selon la réaction de Maillard. Plus l'échauffement est important et prolongé, et moins la protéine sera digestible même si le fourrage est très appétible du fait d'une odeur de caramel.

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.

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

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

Parmi les 5 études ayant pris en compte le facteur « longueur des brins » (Tableau 6), seule une (MUCK *et al.*, 2004a) 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 impactés négativement. Par ailleurs, les remorques ensileuses (ou autochargeuses) font leur retour sur le devant de la scène. Ces remorques opèrent sur l'ensilage de graminées ou de légumineuses et leur modularité en service « benne » accroît leurs possibilités. 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 4,5 cm.

En France, aujourd'hui, les chantiers d'ensilage de légumineuses sont de petites tailles, 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 al.*, 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 sitôt 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 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 TOBACCO, 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 égales 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.

2.2. Conservation par voie humide, le maintien des conditions anaérobies est impératif

Apparus au début des années 2000, les films de types « barrière à oxygène », issus de la coextrusion de polyéthylène (PE) avec du polyamide ou EVOH (Ethylène Vinyl Alcohol), se caractérisent par une perméabilité à l'oxygène 300 fois inférieure à celle des films en PE seul selon BORREANI et TOBACCO (2012) (cité par WILKINSON, 2013). Dans une méta-analyse conduite par WILKINSON en 2013, 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 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

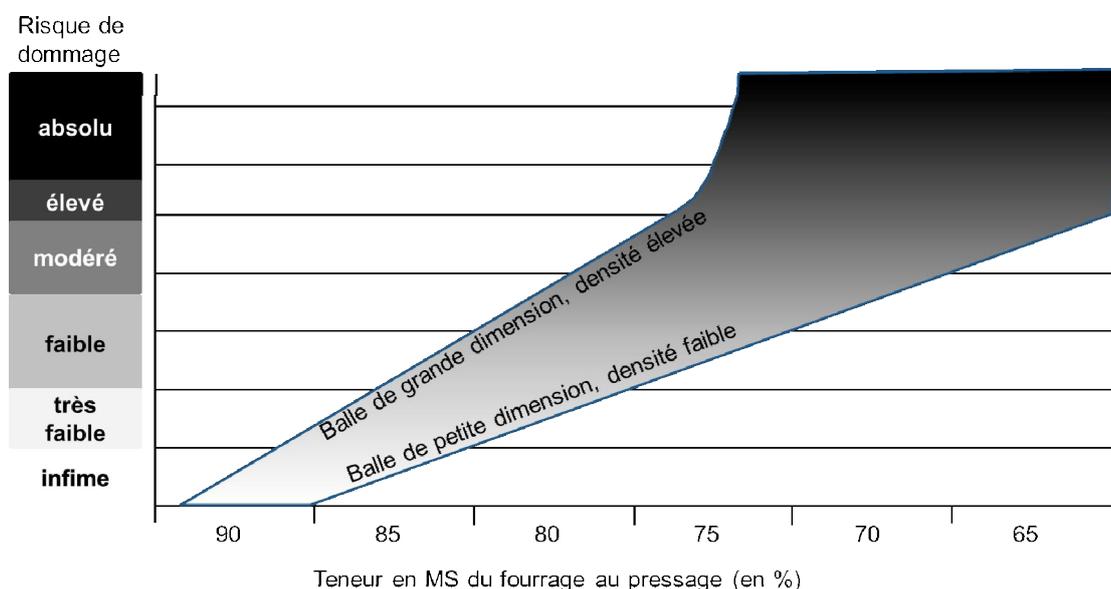
également plus faible. Ces bénéfices peuvent être accrus par l'utilisation de filet de type « cover-edge », permettant de recouvrir les bords des balles, lieux fréquents de perçage. Apparu très récemment, le liage par film plastique permet, selon BISAGLIA et TOBACCO (2011), de réduire le développement 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, 2013).

2.3. Conservation par voie sèche, un compromis à trouver entre teneur en MS et densité

L'évolution des capacités des presses à balles rondes, majoritairement de type chambre variable (Tableau 5), a pu séduire certains éleveurs dans la confection de balles de foin de densité élevée (gain de temps de liage, manutention, stockage, distribution en râteliers et autres). D'un autre côté, pour éviter les pertes de feuilles au pressage, le pressage des légumineuses a souvent lieu sur un fourrage légèrement réhumidifié et dont il est parfois difficile d'estimer la teneur en MS au champ. Cependant, les risques encourus par une densité trop élevée au regard de la teneur en MS du fourrage, pouvant aller jusqu'à l'incendie, sont à prendre en compte (Figure 1, HANCOCK, 2012). Lors de l'échauffement du fourrage, des pertes d'énergie et de protéine interviennent. Les protéines sont liées selon la réaction de MAILLARD dont on estime que l'activité devient préjudiciable lorsque la température dépasse 30°C. YAN en 2011, a mis en évidence des pertes de digestibilité de la matière organique allant de 7 à 13% pour des foins et enrubannages dont la somme de température au stockage (base 30°C) était de 1 000°C.jours, soit l'équivalent d'un échauffement à 50°C durant 50 jours.

Une augmentation de la teneur en protéine liée à la fibre (N-ADF) ainsi qu'une perte d'appétence variable en fonction du développement de moisissures ont pu être constatées sur des foins ayant chauffé (AMYOT, 2003). Aujourd'hui, par la simplicité des réglages proposés ainsi que leur pilotage possible depuis la cabine, il s'avère intéressant d'exploiter au maximum les fonctionnalités des presses au service de la qualité des fourrages. Par exemple, en situation jugée « limite » (teneur en MS < 78 - 80 %), l'activation de l'option « cœur mou » permettrait de diminuer la pression appliquée au cœur du fourrage et ainsi la densité de la balle. Même s'il a lieu, l'échauffement sera de plus faible ampleur.

FIGURE 1 – Risque de dommage sur foin en fonction de la teneur en MS, de la dimension et de la densité des balles. D'après HANCOCK, 2012



2.4. 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 (augmentation des teneurs en azote soluble), diminuant ainsi leur valeur PDIE. 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 peut être insuffisant 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.

Implicitement, l'accroissement des largeurs de travail réduit le trafic dans les parcelles, ce qui a pour conséquence de réduire les zones tassées, les dommages causés aux jeunes bourgeons. En revanche, les combinés de fauche double ou triple, 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 (THIEBEAU, 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 trainées, permettant la prise en charge de deux balles, fera de la dépose de la balle filmée, l'opération la plus coûteuse en temps. Cependant, tant que des mécanismes respectant l'intégrité du film ne seront pas trouvés, la dépose de la balle à l'arrêt restera nécessaire.

On observe un retour, certes timide, des autochargeuses munies de système de coupe. Offrant plus de souplesse de chantier qu'une automotrice, leur retour répond notamment pour les légumineuses à un besoin de coupe fréquente afin de préserver la qualité tout en récoltant de faibles volumes. Il est à noter que selon les modèles, les systèmes de démêlage, bien que limitant le débit de vidange facilite le travail d'étalement au silo, pour des volumes conséquents à décharger et étaler. Une autre possibilité de bien gérer l'étalement et le tassement du fourrage au silo consiste en l'adoption d'un cylindre démêleur animé par la prise de force du tracteur tasseur, solution également intéressante pour les ensileuses automotrices. Ces dernières ont en effet comme principale limite leur puissance et donc leur débit qui, ne cessant d'augmenter, posent de véritables difficultés de tassement au silo.

Contrairement au fanage, où nous n'imaginons que peu d'évolution excepté l'accroissement de la largeur de travail, **c'est dans l'andainage que 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 aux 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 variables 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. Ces types de dispositifs apparaissent sur les ensileuses automotrices et seront bientôt disponibles sur les presses à balles carrées.

- 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.

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. 24p.
- 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 Journal*, 98, 1-7.
- BRISSON J. (2008) : « Le traitement des fourrages, de la récolte à la vache », 32^{ème} Symposium sur les bovins laitiers, Drumondville
- 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 ». Recueil des communications du Forum des Fourrages Bovins Viande. Châteauroux. 163-167
- CONTRERAS-GOVEA, F.E., MUCK, R.E., MERTENS, D.R., AND 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), 13 pages
- 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 pages
- DEMARQUILLY B. (1982) : « Valeur alimentaire des légumineuses (luzerne et trèfle violet) en vert et modifications entraînées par les différentes méthodes de conservation », *Fourrages* n°90.
- DULPHY J.P.,(1987) : « Fenaison : 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, 21,22,23 mai 1985, Centre de recherches zootechniques et vétérinaires, INRA de Theix, 103-124.
- DULPHY J.P., MARTIN ROSSET W., 2001. « Valeurs comparatives de différents types de fourrage conservés ». In Garel J.P., 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, p12-30
- FILYA, I., MUCK, R.E., AND CONTRERAS-GOVEA, F.E. (2007). « Inoculant effects on alfalfa silage: fermentation products and nutritive value », *Journal of Dairy Science*, 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.
- HANCOCK D. (2012) : « Hay moisture : how dry is dry enough ? ». *Hay and Forage Grower*, June 2012.
- HASHEMZADEH-CIGARI, F., KHORVASH, M., GHORBANI, G.R., AND TAGHIZADEH, A. (2011). « The effects of wilting, molasses and inoculants on the fermentation quality and nutritive value of lucerne silage », *South African Journal of Animal Science*, 41.
- HOLMES B.J, MUCK R. E. (2008) : « Density and porosity in bunker or pile silos », 2p.
- HOLMES B.J, MUCK R. E. (1999) : « Factors affecting bunker silo densities », 6p.
- 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.
- KOEGEL R.G, STRAUB R.J., WALGENBACH R.P. (1985) : « Quantification of mechanical losses », *Transactions of ASAE*, 28, 1047-1051.
- KUNG JR., L., (2010) : « A Review on Silage Additives and Enzymes ». Department of Animal and Food Sciences University of Delaware Newark, DE 19717-1303, 16p
- 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 », Southern Pasture and forage crop improvement conference. Proceedings 8p.
- 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. In Silage : field to feedbunk ». Northeast Regional Agric. Engng. Service.
- 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 » in C.G. SUMMERS and D.H. PUTMAN eds. *Irrigated alfalfa management in mediterranean and desert zones*. Chapter 14. University of California Agriculture and Natural Resources. 8300
- 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.
- PFIMLIN J. (1998). « Evolution des modes de conservation de l'herbe en Europe : acquis et perspectives », *Fourrages*, 156, 611-618.
- PITT R.E., (1990). « Silage and Hay preservation » [NRAES-5]. Ithaca, NY : Northeast Regional Agricultural Engineering Service
- POSTULKA, R., DOLEZAL, P., PELIKAN, J. AND KNOTOVA, D. (2012). « Effect of dry matter content and inoculation on ruminal protein degradability in alfalfa silages », *Iranian Journal of Applied Science*, 2:45:49.
- RIZK, C. (2004). Thesis : Effects of inoculation on alfalfa silage quality and its feeding on the performance of dairy cattle.
- 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, WI. pp. 828-868.
- ROTZ C.A., (2005). « Postharvest changes in alfalfa quality » Proceedings, California alfalfa and forage symposium, 12-14 december, 2005, Visalia, CA, 253-262.
- RUPPEL K.A., PITT R.E., CHASE L.E., GALTON D.M. (1995) : « Bunker silo management and its relationship to forage preservation on dairy farms », *J. Dairy Sci.* 78, 141-153.
- 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^{ème} Symposium sur les bovins laitiers, Drumondville.
- SHEPERD W. (1961) : « The susceptibility of hay species to mechanical damage. II. Effets of moisture content and variety », *Australian Journal of Agricultural Research*, vol. 12, n°5, p783.
- SHINNERS, K.J. AND M.E. HERZMANN. 2006 : « Wide-swath drying and post cutting processes to hasten alfalfa drying ». ASABE Paper No. 061049.
- SHINNERS K.J., HUENINK B.M., MUCK R.E., ALBRECHT K.A. (2009) : « Storage characteristics of large round and square bales : low moisture wrapped bales », *American society of agricultural and biological engineers*, 52, 401-407.
- 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*, p211.
- UJTTEWAAL A., KARDACZ, P, CROCQ 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 ». Poster Journées AFPF, ce document.
- VERNOT O. (2012) : « La récolte du foin de luzerne en pays de la loire, comment produire du foin de haute qualité » MFE Isara – Arvalis-Institut du végétal. 68p
- VIGNAU-LAUSTAU L., HUYGHE C. (2008) : « Récolte et conservation par voie humide. In Stratégies fourragères : pâturage, ensilage et foin. Ed. 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 science*, 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.