



HAL
open science

L'enrubannage, une solution pour récolter et conserver les légumineuses fourragères ?

Anthony Uijttewaal, Pierre-Alexandre Tinnière, Eric Bricard, Alexis Férard,
Didier Deleau

► To cite this version:

Anthony Uijttewaal, Pierre-Alexandre Tinnière, Eric Bricard, Alexis Férard, Didier Deleau. L'enrubannage, une solution pour récolter et conserver les légumineuses fourragères ?. Innovations Agronomiques, 2017, 60, pp.107-124. 10.15454/1.5138521414870955E12 . hal-04482443

HAL Id: hal-04482443

<https://hal.inrae.fr/hal-04482443v1>

Submitted on 28 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

L'enrubannage, une solution pour récolter et conserver les légumineuses fourragères ?

Uijtewaal A.¹, Tinnière P.-A.¹, Bricard E.¹, Férard A.¹, Deleau D.²

¹ARVALIS-Institut du végétal, Station expérimentale de La Jaillière, F-44370 La Chapelle Saint-Sauveur

²ARVALIS-Institut du végétal, Station Expérimentale Saint Hilaire en Woëvre. 16 Rue du Moulin de Moncelle, F-55160 Saint-Hilaire-en-Woëvre

Correspondance : a.ujtewaal@arvalisinstitutduvegetal.fr

Résumé

En comparaison du foin et au regard de la teneur en matière sèche (MS) requise, les créneaux météorologiques favorables à la récolte des légumineuses en enrubannage sont plus nombreux ce qui permet de mieux cibler le stade de récolte. Les pertes liées aux conditions climatiques (pluies) sont également réduites. Lors de la fauche de la luzerne, l'utilisation d'une faucheuse rotative ou faucheuse conditionneuse à rouleaux permet de limiter les pertes mécaniques en-dessous de 5 % de la biomasse initiale. La possibilité de réaliser les opérations de fanage et d'andainage sur un fourrage humide ou réhumidifié limitent les pertes mécaniques lors de ces deux interventions. Durant la conservation, les pertes de matière sèche sont bien souvent limitées à environ 3 % et le préfanage a tendance à réduire encore ce poste de pertes. L'élévation de la teneur en matière sèche réduit la protéolyse durant la conservation et permet de conserver la valeur protéique du fourrage. L'obtention d'une teneur en matière sèche de 60 % semble être le meilleur compromis. Dans les conditions actuelles de réalisation, le principal écueil de ce mode de récolte-conservation demeure le risque de perforation du film plastique.

Mots-clés : Perte de matière sèche, Protéolyse, Machinisme, Agro-équipement, Séchage

Abstract: Is wrapping a good way to harvest and preserve fodder legumes ?

The use of a disc mower or roll conditioner mower allows to keep mechanical dry matter losses below 5% of the initial biomass. Compared to hay and regarding the required dry matter content, wrapping considerably reduces the climatic risk. The possibility to systematically perform tedding and windrowing operations on wet or moistened forage limits considerably mechanical losses. During storage, dry matter losses are often limited to about 3% and pre-wilting tends to further reduce this loss point. The increase in dry matter content reduces proteolysis during storage and maintains the forage protein value. Reaching 60% dry matter content seems to be the best compromise. Under present performing conditions, the main obstacle to this mode of harvesting and preservation remains the risk of perforation of the plastic film.

Keywords: Dry matter loss, Proteolysis, Agricultural equipment, Machinery, Field drying

Introduction

Le premier critère influençant la qualité du fourrage est le stade physiologique de la culture lors de la fauche. Pourtant, les étapes de récolte et de conservation du fourrage jouent un rôle majeur dans la modification de sa composition chimique, et donc de sa valorisation par les ruminants. Du fait de leur composition chimique particulière, les principales légumineuses prairiales sont réputées difficiles à

ensiler. D'un autre côté, leurs particularités morphologiques les rendent délicates à récolter sous forme de foin. Apparu au milieu des années 1980, l'enrubannage se positionne « à mi-chemin entre l'ensilage et le foin ». Bien que son coût de réalisation soit souvent pointé du doigt ce mode de récolte est plébiscité par les éleveurs pour la possibilité de réaliser des petits chantiers, de stocker le fourrage à l'extérieur, et par le fait de ne pas avoir de contraintes de gestion d'un front d'attaque (cas de l'enrubannage mono-balle), ainsi que sa souplesse d'utilisation. Mais l'enrubannage réunit-il les conditions nécessaires à la préservation de la quantité et de la qualité des légumineuses ? Cet article s'attache à répondre à ce questionnement en décrivant l'effet des principaux paramètres influençant la préservation quantitative et qualitative de la récolte. Les processus en question sont décrits à l'aide de résultats d'essais et de références bibliographiques basées sur la luzerne (*Medicago Sativa*), légumineuse fourragère de fauche par excellence.

1. Préserver la quantité et la qualité de la fauche au pressage

Les légumineuses de fauche présentent une sensibilité particulière aux pertes quantitatives et qualitatives durant l'action de récolte au champ. En raison de la sensibilité du pétiole qui relie la feuille à la tige, les feuilles sont les principaux organes concernés par ces pertes. De manière générale, ces pertes sont déterminées par l'agressivité des pièces travaillantes des matériels de récolte, ainsi que par la friabilité des feuilles lors des interventions mécaniques. Néanmoins, à l'instar de tous les fourrages récoltés, d'autres facteurs tels que la hauteur de coupe et la durée de séchage influent également sur le niveau global de pertes.

1.1 La fauche, trouver le bon compromis entre vitesse de séchage et pertes

1.1.1 Maitriser la hauteur de fauche

La hauteur de fauche joue à plusieurs niveaux sur la le fourrage récolté. En premier lieu, elle détermine la quantité de biomasse récoltable. Bien que l'enjeu semble plus faible pour la luzerne que pour d'autres graminées prairiales (Cabon, 1982), la biomasse est de l'ordre de 60 kgMS/cm/ha pour des hauteurs de coupe comprises entre 5 et 10 cm. L'influence sur la qualité n'est pas neutre non plus. En effet, rehausser la hauteur de coupe permet de récolter un fourrage plus riche en protéines et plus digestible par effet de concentration des éléments nutritifs d'intérêt (Thomas, 2007), mais réduit de fait la quantité de biomasse à récolter. A l'inverse, une fauche rase augmente la biomasse récoltable mais hypothèque le rendement des coupes ultérieures. En effet, les premiers centimètres de végétation sont les lieux de redémarrage des futurs bourgeons qui produiront la biomasse du cycle suivant. Au-delà des effets sur la biomasse récoltable ainsi que sa qualité nutritive, la hauteur de coupe influe sur la vitesse de séchage. Plus la coupe sera haute, plus l'air pourra facilement circuler sous l'andain et évacuer l'eau du fourrage.

Par ailleurs, il est assez bien connu qu'un fourrage fauché au ras du sol se caractérise par une teneur en matières minérales plus élevée (Wyss, 2011). Ceci tient à plusieurs raisons. Tout d'abord, les premiers centimètres des plantes composant le fourrage sont régulièrement « contaminés » par de la terre sous l'effet de « *splashing* » lors des épisodes pluvieux. Ensuite, lors d'une fauche rase, le fourrage n'est pas « *perché* » sur un tapis de chaumes et il devient difficile de le reprendre lors des opérations de fanage et/ou d'andainage : la nécessité de baisser les hauteurs de passage de dents des faneuses et andaineurs augmente alors le risque de souiller le fourrage avec de la terre. Notons également que les particules de terre contiennent des spores butyriques dont la présence et le développement sont néfastes à la conservation sous forme humide du fourrage.

Respecter une hauteur de fauche de 8 cm semble constituer le meilleur compromis afin d'allier valeur alimentaire, rendement et faible risque sanitaire. Sur le terrain, l'inclinaison du lamier permet de moduler la hauteur, et son ajustement dépend du type de faucheuse (troisième point pour les portées, longueurs

des biellettes pour les traînées). Des systèmes simples tels que les patins permettant de réduire l'usure du lamier et maîtriser 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. Cependant, maîtriser une hauteur de fauche sous-entend que la phase d'implantation de la légumineuse a été soignée afin de produire une surface de sol suffisamment plane et régulière.

1.1.2 Le choix du matériel de fauche et de ses réglages n'est pas neutre

En France, les légumineuses fourragères occupent une place limitée dans les assolements des exploitations. La luzerne occupe, par exemple, en moyenne 8 ha dans les exploitations bovines laitières Françaises (Rouillé et al., 2016). Il apparaît donc difficilement envisageable d'investir dans des matériels coûteux, spécifiquement conçus pour la culture et la récolte des légumineuses prairiales, même si des solutions collectives peuvent être envisagées. Néanmoins, bien connaître les répercussions de leur utilisation sur la quantité et la qualité du fourrage est une nécessité.

- **Les faucheuses ne présentent pas toutes la même agressivité vis-à-vis des feuilles**

En France aujourd'hui, il existe essentiellement 3 types de faucheuses.

- Les faucheuses rotatives « à plat » ou « classique ». Ces outils sont constitués d'un lamier avec des assiettes, portant 2 à 3 couteaux, qui tournent à grande vitesse. Le seul effet mécanique produit sur le fourrage est donc un sectionnement de la tige par les couteaux.
- Les faucheuses conditionneuses à fléaux ou à doigts. En plus du lamier portant les couteaux, ces faucheuses disposent d'un système de conditionnement du fourrage, en l'occurrence, des fléaux ou doigts. Ces derniers sont disposés sur un axe horizontal, à la sortie du lamier. Les doigts ou fléaux tournent à grande vitesse et « frappent » le flux de fourrage avant son éjection. Ces matériels ont été principalement conçus pour accélérer le séchage des graminées, en grattant la cuticule et en déchirant les tiges afin de faciliter l'évacuation de l'eau.
- Les faucheuses conditionneuses à rouleaux (en matière plastique ou en acier). Ces matériels sont conçus spécifiquement pour produire un effet mécanique de pliage et écrasement des tiges de fourrages, toujours pour faciliter la sortie de l'eau, avec une agressivité réduite.

En 2016, ARVALIS-Institut-du-végétal, en partenariat avec les chambres d'agriculture du Limousin et la société Kuhn S.A., a mis en place en essai visant à étudier les pertes mécaniques de différents matériels de fauche existant sur le marché, ainsi que leurs réglages. Les pertes à la fauche ont été évaluées à l'aide de chaumes artificiels (Buckmaster, 1993 ; Sauter, 2011). La Figure 1 et le Tableau 1 présentent les modalités étudiées et les niveaux de pertes obtenus. L'essai a mis en jeu 3 types de faucheuses. De manière générale, la faucheuse rotative « classique » présente le niveau de pertes le plus faible, égal à 3.8 % de la biomasse initiale avant fauche. Les conditionneuses à rouleaux révèlent quant à elles un niveau de pertes un peu supérieur, compris entre 4.3 et 4.9 %. Des niveaux de pertes équivalents avaient déjà été rapportés en France lors d'un essai comparatif (Uijtewaal et al., 2016a). Au vu des résultats et de la variabilité associée, il apparaît difficile de conclure sur une différence de pertes entre un conditionnement avec un rouleau en fer et un conditionneur à rouleau en matière plastique, pour un même réglage. Shinnars et al. (2006) ont observé que les conditionneurs à rouleaux en fer avaient tendance à occasionner davantage de pertes que les conditionneurs en matière plastique. Le conditionnement avec des fléaux entraîne des pertes de MS supérieures aux autres types de faucheuse. Selon la configuration et les réglages, les pertes ont été comprises entre 5.7 et 9.3 %. Bien que la variabilité associée aux mesures de pertes soit importante, des tendances se dégagent. Par ailleurs, pour un même réglage d'intensité de conditionnement, le fait de déposer le fourrage sur une surface plus importante, juste après la coupe, semble générer davantage de pertes, à cause d'un éparpillement du fourrage plus important après fauche. Au contraire, lors de la dépose en andains étroits, de nombreuses feuilles détachées des tiges se retrouvent libres, mais piégées dans l'andain. En

éparpillant davantage le fourrage, une partie de ces feuilles tombent au sol, ce qui accroît la quantité de pertes affectées à la fauche. Ces constatations peuvent avoir une traduction opérationnelle immédiate en relativisant l'importance du choix du matériel de fauche selon le mode de récolte choisi. Pour l'ensilage, il peut s'avérer peu pénalisant de recourir à une faucheuse conditionneuse à fléaux dès lors qu'aucune opération « agressive » du type fanage n'est prévue avant la reprise du fourrage par le pick-up de l'ensileuse. A l'inverse, les éleveurs doivent bien garder à l'esprit que l'utilisation d'une faucheuse conditionneuse à fléaux peut engendrer une quantité de pertes importantes lorsque de multiples opérations sont prévues sur le fourrage avant sa récolte.

Tableau 1: Détails des modalités dont les résultats sont rapportés en Figure 1. Cond. = conditionneur

Dénomination de la modalité	FP M1	FCR fer S M2	FCR fer E M3	FCR PE S M4	FCD lent S M5	FCD lent E M6	FCD rap. E M7
Type de faucheuse rotative	classique	Cond. rouleaux « fer »	Cond. rouleaux « fer »	Cond. rouleaux « fer »	Cond. à doigts	Cond. à doigts	Cond. à doigts
Type d'andain	étalé	serré	étalé	serré	serré	étalé	étalé
Régime du conditionneur (tr.min-1)	∅				800	800	1000

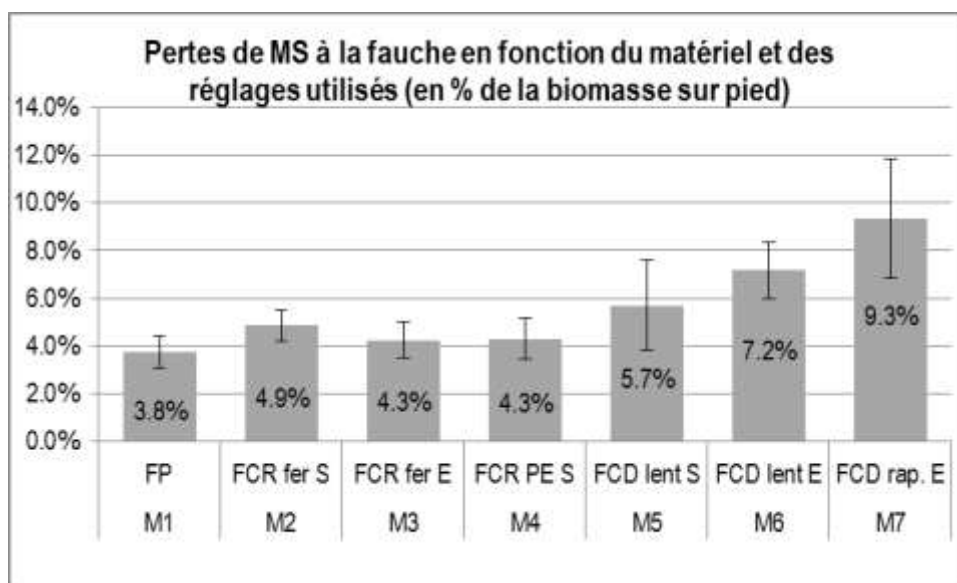


Figure 1 : Niveau de pertes de matière sèche (MS) à la fauche en fonction du matériel de fauche et des réglages utilisés. Résultats en % de la biomasse sur pied avant fauche, moyenne de 3 prélèvements par modalité. Luzerne pure, 2ème cycle, 6 semaines de repousse, 4.05 (+/-0.2) tMS/ha sur pied, Branceilles (19). Essai conduit en 2016 en partenariat entre Arvalis-Institut du végétal, les Chambres d'Agriculture du Limousin et Kuhn S.A.

D'autres auteurs ont mis en évidence que l'espace entre les rouleaux conditionneurs avaient un impact sur la quantité de pertes de feuilles, bien que l'enjeu semble limité (Shinners et al., 2006)). Entre un espacement de 2.6 et 1.2 mm, les pertes à la fauche ont été respectivement de 2.2 et 3.3 % de la biomasse initiale. L'effet sur la cinétique de séchage est décrit et discuté un peu plus loin.

Greenlees et al. (2000), n'ont pas montré d'effet du réglage de l'espace entre les conditionneurs et la tôle située juste à l'aplomb du rotor. Pour des écartements de 4, 8 et 11 cm, les pertes ont été

respectivement de 6.69, 6.76 et 6.77 %. Cet élément est pourtant un élément de préconisations en France, afin de faciliter le flux de fourrages et tenter de réduire le nombre d'impacts sur le fourrage de légumineuses.

Dans la même série d'essais, Greenlees et al. (2000) ont mis en évidence une réduction de pertes par la réduction de la vitesse du conditionneur. Entre une vitesse de 620 et de 790 tours.min⁻¹, les pertes enregistrées ont été significativement différentes au seuil de 10 %, d'une valeur respectivement de 6.2 et 7.3 %. En France, bien souvent, les régimes « rapides » de conditionnement des équipements sont compris entre 900 et 1 000 tours.min⁻¹. Ainsi, la gamme des 600 – 800 tours.min⁻¹, testée dans cet essai, constitue en fait la gamme basse possible avec les équipements du marché français. Il est donc nécessaire de bien repositionner les résultats du Tableau 1 quant aux vitesses basse et haute de conditionnement.

- **Vitesse de séchage, le 1er facteur déterminant reste l'étalement du fourrage**

Les phénomènes qui régissent la vitesse de séchage sont qualitativement bien connus, bien que leur modélisation n'ait pu aboutir à ce jour. Undersander et Saxe (2013) ont décrit ces phénomènes. Les premières heures qui suivent la fauche sont capitales afin de permettre l'évacuation d'un maximum d'eau de la plante. Durant la première phase (20 à 40 % MS), l'eau s'évacue quasi exclusivement par les stomates encore ouverts. Bien souvent, le rayonnement solaire est limitant lors de cette phase et répartir le fourrage permet d'accroître la vitesse de séchage. Sur le terrain, le recours au fanage ou l'utilisation des dispositifs d'éparpillement disponibles sur certaines faucheuses conditionneuses répondent à cet objectif. La Figure 2 illustre la cinétique de séchage d'une luzerne durant les 20 premières heures après la fauche selon 3 systèmes de fauche. Il ressort très nettement que plus l'étalement du fourrage est important, plus le fourrage sèche vite, qu'il ait été ou non conditionné. Sur cette même figure, on peut aussi noter que le corollaire à cela est que la reprise d'humidité par la rosée est d'autant plus élevée que le fourrage est étalé, sans bouleverser ici la hiérarchie des teneurs en MS. Sur un plan opérationnel, il est important de garder à l'esprit que l'eau déposée par la rosée est de l'eau « extra-cellulaire » qui s'évapore facilement.

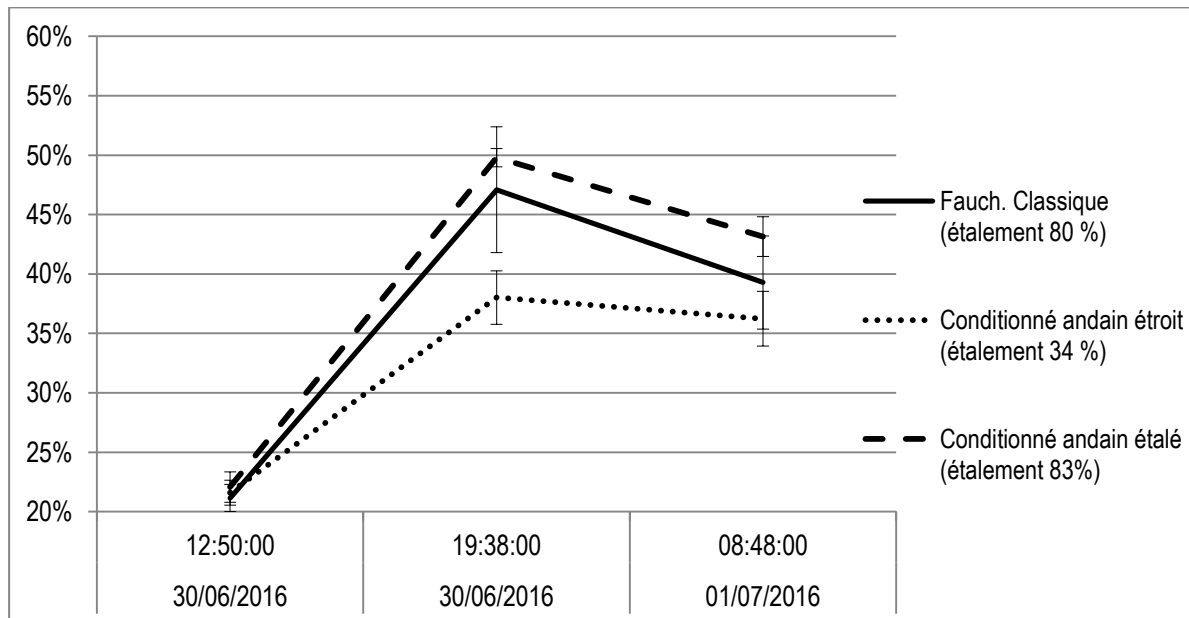


Figure 2 : Evolution de la teneur en MS de la luzerne (en %) durant les 20 h qui suivent la fauche en fonction de l'étalement et du conditionnement du fourrage. Luzerne pure, 2ème cycle, 6 semaines de repousse, 4.05 (+/-0.2) tMS/ha sur pied, Branceilles (19). Essai conduit en 2016 en partenariat entre Arvalis-Institut du végétal, les Chambres d'Agriculture du Limousin et Kuhn S.A.

D'une manière générale, il est important que le fourrage atteigne une teneur en MS supérieure ou égale à 40 % en un minimum de temps afin de limiter les pertes par respiration des propres cellules de la plante (Rotz et Muck, 1994 ; Beaumont, 2009 et 2011). Au-delà de cette teneur en MS, l'activité respiratoire des cellules est fortement réduite, bien que non nulle, ce qui contribue à maintenir la digestibilité et donc la valeur énergétique du fourrage.

Durant la deuxième phase de séchage (40 à 70 % MS), le séchage ralentit. L'eau sort à la fois par les feuilles mais également par les tiges. Dans les deux cas, la sortie d'eau est freinée par la cuticule cireuse. C'est alors que l'effet du conditionnement, en ayant créé des points de sortie privilégiée de l'eau, accroît la vitesse de séchage par rapport à un même fourrage non conditionné. Plusieurs auteurs ont rapporté l'effet bénéfique du conditionnement à partir de cette phase. Les différences d'effet du conditionnement à fléaux par rapport aux rouleaux semblent variables et l'hétérogénéité souvent constatée lors des essais au champ rend difficile la mise en évidence de différence significative (Greenlees et al., 2000). Par ailleurs, Shinnors et al. (2006) ont mis en évidence que le type de conditionneur à rouleaux et les réglages appliqués (écartement entre rouleaux) pouvaient influencer sur la cinétique de séchage. Rappelons à ce moment que les feuilles sèchent 1.5 à 2 fois plus vite que les tiges ; ainsi, recourir à un matériel de fauche préservant les feuilles concourt à faire sécher le fourrage plus rapidement. Il n'est pas à exclure que les effets décrits précédemment (pertes de feuilles x vitesse de séchage du fait du conditionnement), soient confondus lors des essais au champ. De plus, la stricte étude de l'effet du conditionnement (quel qu'en soit le type) apparaît impossible car la structure de l'andain produit par une faucheuse-conditionneuse diffère très largement de celle d'une faucheuse rotative sans conditionneur (Uijtewaal comm. personnelle).

Enfin, la troisième et dernière phase de séchage (de 70 à 85% MS) est la plus longue, bien que la quantité d'eau restant à évacuer soit faible. L'eau ne sort plus que par les tiges. Elle doit traverser la cuticule cireuse et est partiellement retenue par des forces hygroscopiques exercées par les solutés tels que les sucres et les protéines. Durant cette phase, il devient important de disposer de conditions climatiques favorables (vent et air sec) et d'en tirer partie en confectionnant des andains dressés et aérés, permettant la pénétration d'air sec à l'intérieur de la masse de fourrage. Cette phase est extrêmement sensible à plusieurs titres. En fonction des zones géographiques, des années et des saisons, il est parfois difficile d'obtenir une fenêtre météorologique favorable à l'atteinte des 85 %MS au champ, requis pour la bonne conservation du foin. Par ailleurs, comme évoqué précédemment, la teneur en MS élevée du fourrage le rend d'autant plus sensible aux pertes mécaniques.

1.2 Fanage et andainage, les conditions d'intervention sont déterminantes

En raison notamment de la plus forte présence de stomates sur les feuilles, ces dernières sèchent plus vite que les tiges. Au-delà de 85 % MS, les feuilles se brisent facilement en miettes. Le bris de feuilles constitue un poste important de pertes lors de la récolte au champ. En raison de leur constitution chimique, les feuilles concentrent l'essentiel de la valeur alimentaire (glucides pariétaux et non pariétaux digestibles et matières azotées). La préservation de ces organes constitue un enjeu majeur tout au long du processus de récolte. L'intervention sur un fourrage encore humide ou ré-humidifié par la rosée permet de réduire notablement les pertes. C'est ce qui a été observé dans deux essais conduits en 2013 sur les stations expérimentales Arvalis de Saint-Hilaire en Woëvre et La Jaillière (Uijtewaal et al., 2016b) (Tableau 2). L'incidence qualitative et quantitative d'une intervention (pré-andainage et andainage à l'aide d'un giro-andaineur) l'après-midi, sur un fourrage réhumidifié par rapport à ces mêmes interventions le matin en conditions réhumidifiées est rapporté dans le Tableau 2. Ces résultats illustrent bien qu'il est primordial de choisir les moments d'intervention afin de produire un fourrage de qualité. Dans les conditions de l'essai conduit sur le site de La Jaillière, le préjudice lié aux pertes quantitatives et qualitatives s'élève entre 70 et 110 euros/ha, selon le contexte économique

retenu. De manière générale, la sensibilité à la perte mécanique est d'autant plus forte que la teneur en MS du fourrage est élevée (Pitt, 1990).

Tableau 2 : Pertes qualitatives et quantitatives dues aux opérations PA (pré-andainage) + A (andainage). « lent » = régime lent de la prise de force PA à 310 tr.min⁻¹ puis A à 470 tr.min⁻¹. « rapide » = régime rapide de la prise de force PA à 470 tr.min⁻¹ puis A à 470 tr.min⁻¹. (Uijtewaal et al., 2016b)

Modalité de pré-andainage et andainage	Saint-Hilaire en W. (55)		La Jaillière (44)		
	% MS pl. entière (moy. PA + A)	Pertes qualitatives PA + A (point MAT)	% MS pl. entière (moy. PA + A)	Cumul de pertes PA + A (kg MS/ha)	Pertes qualitatives PA + A (point MAT)
1 Matin « lent »	71.0	-0.1	67.4	315	-0.4
2 Matin « rapide »	70.4	-0.25	69	277	-0.3
3 Ap-midi « rapide »	90.2	-2.8	76.9	667	-1.8

Il y a encore peu de temps, les andaineurs à tapis et bande, conçus spécifiquement pour la récolte des légumineuses fourragères, n'étaient utilisés que par les industriels de la déshydratation de fourrages. Depuis peu, on observe une ouverture du marché à de nouveaux constructeurs qui proposent des modèles de largeur allant de 3 à 11 m environ. Leur prix reste cependant encore prohibitif, bien qu'ils puissent bénéficier d'aides à l'investissement en France. A largeur équivalente, leur coût est environ 3 à 5 fois supérieur à celui d'un giro-andaineur. Ils constituent cependant les matériels les plus adaptés à la conduite des légumineuses et offrent des débits de chantier importants, à la différence des matériels tels que les retourneurs d'andains.

1.3 Le pressage, une opération sans grande conséquence sur les pertes au champ

Lors de la récolte sous forme enrubannée, les pertes mécaniques de la fauche au pressage sont bien souvent comprises entre 10 et 15 % de la biomasse initiale. Elles peuvent largement excéder cette fourchette lorsque les pratiques sont inadaptées. Au pressage, l'enjeu semble relativement limité puisque la compilation des données de 6 essais différents conduits sur luzerne (Borreani et Tabacco, 2006 ; Arvalis 2015 et 2016, données non publiées) indique que les pertes au pressage sont en moyenne de 1.3 %, et comprises entre 0.2 et 2.9 % de la biomasse initiale pour des teneurs en MS au pressage comprises entre 31 et 67 % MS. Les auteurs n'ont pas ici fait mention de tendance à l'augmentation des pertes avec l'augmentation de la teneur en MS, bien qu'une intervention sur un fourrage légèrement ré-humidifié puisse être recommandée. Lors de l'opération de pressage, il semble que l'utilisation d'une presse à balles rondes à chambre fixe puisse occasionner davantage de pertes que son homologue à chambre variable. Ceci peut être attribué au fait qu'à l'intérieur de la chambre de pressage d'une presse à chambre fixe, le fourrage foisonne et puisse ainsi se briser. Ce phénomène

serait très réduit dans un modèle à chambre variable au sein de laquelle le fourrage est contraint et enroulé dès le cœur de la balle.

Enfin, en France, la présence d'un dispositif de hachage (rotocut), situé entre le pick-up et la chambre de la presse, équipe de plus en plus de presses (Uijtewaal et al., 2016a). Ce dernier est constitué de couteaux (de 10 à 25), répartis sur la largeur du canal de la presse et entre lesquels le fourrage est contraint de passer afin d'être coupé. Cet équipement réduit notablement la taille des brins, sans pour autant produire une taille de brins uniforme (Borreani et Tabacco, 2006). L'activation de ce système accroît le besoin de puissance, ainsi que la consommation de fuel de +0.15 l/balle (Savary, 2016). Néanmoins, le hachage du fourrage facilite la préparation/distribution de la ration en limitant notamment le temps de préparation de la mélangeuse. Lors du pressage, l'activation du système de coupe engendre des pertes de MS. La compilation des données de 6 essais différents conduits sur luzerne (Borreani et Tabacco, 2006 ; Arvalis 2015 et 2016, données non publiées) indique que dans les mêmes conditions, l'activation du rotocut fait passer en moyenne les pertes de 0.9 à 1.7 %. Bien que limité dans son ampleur, ce poste de pertes n'est pas nul. Cet accroissement des pertes est essentiellement dû à la production de brins de fourrages plus fins, passant plus facilement au travers des rouleaux et courroies de la chambre de pressage.

2. Que se passe-t-il durant la conservation sous forme enrubannée ?

Après les opérations de pressage-enrubannage, le sort du fourrage est quasiment scellé. Les principaux déterminants de la conservation en termes de quantité et qualité sont fixés. Cette partie s'attache à décrypter les points essentiels influençant sensiblement la préservation de la quantité et de la qualité de la récolte.

2.1 La teneur en MS au pressage dicte l'essentiel des processus biochimiques en conservation

En comparaison de l'ensilage, les fermentations qui ont lieu sont généralement d'une intensité moindre en enrubannage. L'augmentation de la teneur en MS limite les fermentations, ce qui se traduit par des teneurs en acides organiques (lactique et acétique) plus faibles, un pH élevé, et une moindre consommation des sucres solubles par les micro-organismes (Muck, 2006). Plusieurs phénomènes sont en cause. La teneur en MS supérieure de l'enrubannage restreint l'activité microbienne en réduisant l'activité de l'eau. Cette caractéristique est illustrée dans la Figure 3 qui décrit l'évolution de quelques paramètres fermentaires d'un même fourrage pressé et enrubanné, à 2 teneurs en MS différentes. En enrubannage, y compris avec hachage du fourrage, les brins sont plus longs que dans l'ensilage, ce qui limite l'accès aux sucres solubles intracellulaires, substrat des fermentations. Enfin, il se pourrait que la plus faible densité des balles limite l'éclatement des cellules par compression et soit en partie à l'origine des diminutions de fermentations (Muck, 2006).

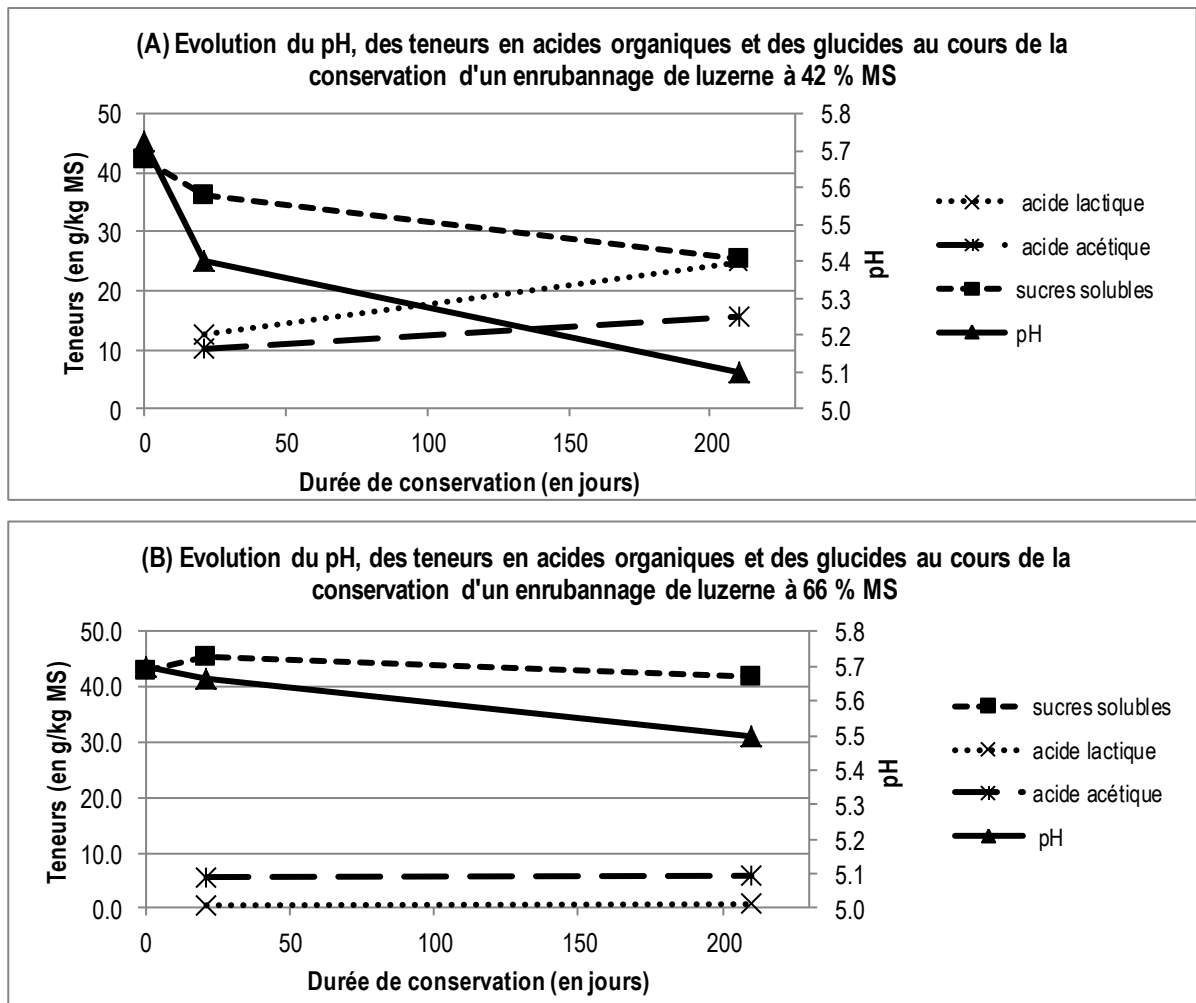


Figure 2 : Evolutions du pH, des teneurs en acides organiques et glucides solubles au cours de la conservation d'une luzerne sous forme enrubannée. (A) 42 % MS et (B) 66 % MS au pressage. Essai Arvalis - Institut du végétal 2015, programme SOS Protein.

Sur un plan opérationnel, ces constatations ont des effets immédiats. La luzerne est connue pour sa difficulté à être conservée sous forme humide en raison de son fort pouvoir tampon (fortes teneurs en MAT et minéraux) et sa faible teneur en sucres solubles. Ainsi, comme le suggéraient Wieringa dès 1969, et plus tard Leibensperger et Pitt (1987), l'élévation de la teneur en MS d'un fourrage rend sa conservation par voie humide de moins en moins dépendante à la baisse du pH du milieu. Le développement des principaux organismes nuisibles (bactéries butyriques essentiellement) devient alors réduit, voire inexistant, pour des teneurs en MS supérieures à 60 %. Au sein d'une balle enrubannée, la teneur en MS doit être homogène afin que ces conditions soient réunies en tout point. Il est tout à fait probable qu'une balle dont la teneur en MS moyenne serait de 60 % contienne des bactéries butyriques ainsi que leurs produits de fermentations (acides butyriques), preuve de leur activité métabolique. Il suffit d'un volume restreint dans la balle dont la teneur en MS serait trop faible pour permettre le développement de ces bactéries.

Par ailleurs, Amyot (2008) a montré que, dans certaines conditions, l'activation du rotocut pouvait permettre de sécuriser la conservation sur les plans chimique et bactériologique. En comparaison avec un même fourrage non haché, il a montré que le hachage permettait d'accélérer la vitesse d'acidification et/ou d'abaisser le pH final du fourrage. Cette caractéristique peut s'avérer décisive

lorsque c'est le pH du milieu qui est le facteur limitant du développement des micro-organismes nuisibles, notamment les bactéries butyriques. Il s'agit essentiellement des enrubbages réalisés en conditions humides. Cependant, l'amélioration des paramètres de conservation n'est pas systématiquement observée (Borreani et Tabacco, 2006).

La densité des balles a souvent été mise en avant comme un facteur important de la qualité de conservation par voie humide, en réduisant la porosité du fourrage et ainsi la quantité d'oxygène à épuiser lors de la 1^{ère} phase aérobie du processus d'ensilage. Cette observation a été rapportée par Han (2004) (cité par Muck, 2006). L'enjeu semble néanmoins faible au regard de l'importance de la teneur en MS au pressage.

2.1.1 Une protéolyse faible sous réserve d'une teneur en MS suffisante

La protéolyse est le phénomène biochimique qui conduit à transformer l'azote des protéines en des formes plus solubles (peptides, acides aminés libres, ammoniac et amines). On quantifie bien souvent la protéolyse par le dosage de la teneur en azote soluble du fourrage, exprimé en % de l'azote total (Amyot, 2003). Ce phénomène commence dès que la plante est fauchée (Owens et al., 1999) mais l'essentiel de la protéolyse se déroule durant la conservation, sous l'action des enzymes de la plante et des bactéries protéolytiques présentes dans le fourrage (Figure 4). Les légumineuses (dont la luzerne), du fait de leur fort contenu en protéines, sont très sensibles aux phénomènes protéolytiques (Muck, 1987). De manière générale, plus un fourrage est riche en protéines, plus il est sensible à la protéolyse. Ceci tient notamment au fait qu'une part importante des protéines provient des feuilles. Les principales protéines contenues dans les feuilles sont impliquées dans la photosynthèse et sont connues pour être solubles (Getachew et al., 2006). Parmi les légumineuses, seuls le trèfle violet, le sainfoin et le lotier y sont moins sensibles, du fait de particularités biochimiques : présence de Polyphénol Oxydase chez le trèfle violet et de tannins condensés chez le sainfoin et le lotier (Aufrère et al., 2012).

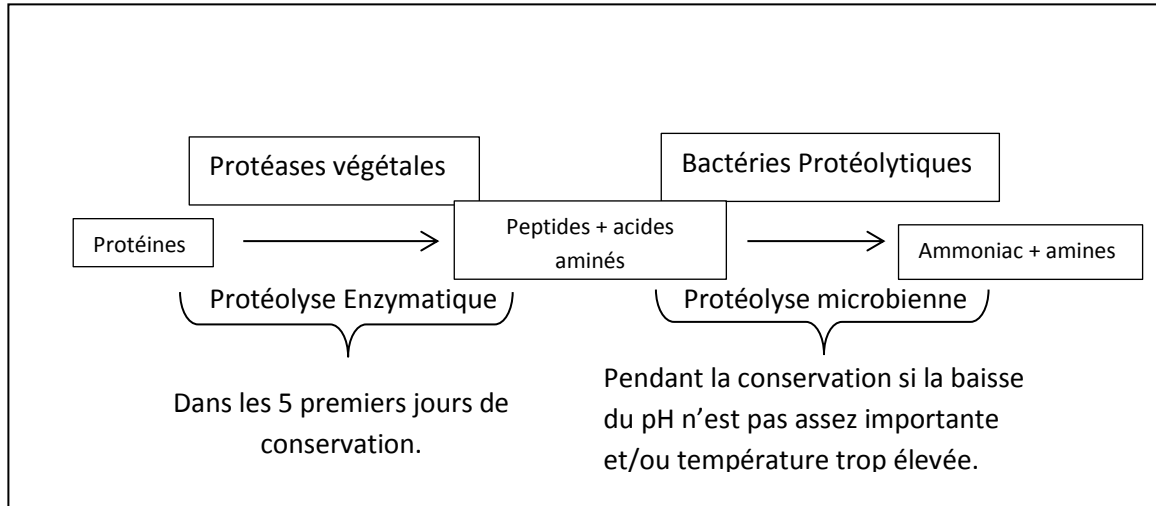


Figure 4 : Description du phénomène de protéolyse durant la conservation des fourrages par voie humide. D'après Amyot (2003)

Derrière la conservation des protéines se cachent des enjeux zootechniques (nutrition) et environnementaux (rejet d'azote). L'ingestion d'une forte proportion d'azote soluble génère un déséquilibre de la balance azotée dans le rumen des animaux. L'azote en excès est détoxifié et rejeté dans l'environnement, principalement dans les urines et en quantité variable dans le lait. Afin de maximiser la valorisation de l'azote contenu dans le fourrage, il est donc préférable de mettre en œuvre

les moyens nécessaires pour réduire l'intensité de la protéolyse (Demarquilly et al., 1982 ; Broderick, 2001).

La protéolyse d'origine enzymatique semble être la plus importante (McKersie et Buchanan-Smith, 1982). Elle est également la plus rapide en termes de vitesse d'action puisque l'on estime que l'essentiel de l'activité protéolytique se déroule durant les 3 à 5 premiers jours de conservation par voie humide avec une intensité décroissante. L'enjeu réside donc dans l'inhibition ou la réduction drastique de l'activité des enzymes. Cette dernière est régie essentiellement par deux facteurs :

- Le pH du milieu. Le pH optimal des protéases végétales serait compris entre 5 et 6 (Rotz et al., 1994). Néanmoins, selon l'étude de Tao et al. (2012), les enzymes responsables de la majeure partie de la protéolyse dans les ensilages de luzerne sont actives sur une gamme de pH allant de 3 à 7. Bien qu'une baisse de pH permette de réduire leur activité (Tao et al., 2012), le processus d'ensilage ne permet pas d'abaisser suffisamment et assez rapidement le pH au point de les inhiber totalement (Demarquilly et al., 1998). En modifiant rapidement le pH, l'adjonction d'un acide lors du pressage-enrubannage pourrait en revanche permettre de contribuer à la réduction de ce phénomène.
- La teneur en MS du fourrage. Il a été démontré à plusieurs reprises qu'à teneur en MAT donnée, l'élévation de la teneur en MS du fourrage lors de la mise en silo ou du pressage permettait de réduire la protéolyse durant la conservation (Gouet et al., 1965 ; Merchen et Satter, 1983 ; Muck, 1987). Cette constatation a été récemment confirmée dans deux essais conduits par ARVALIS-Institut-du-végétal en 2015 et 2016. (Figure 5).

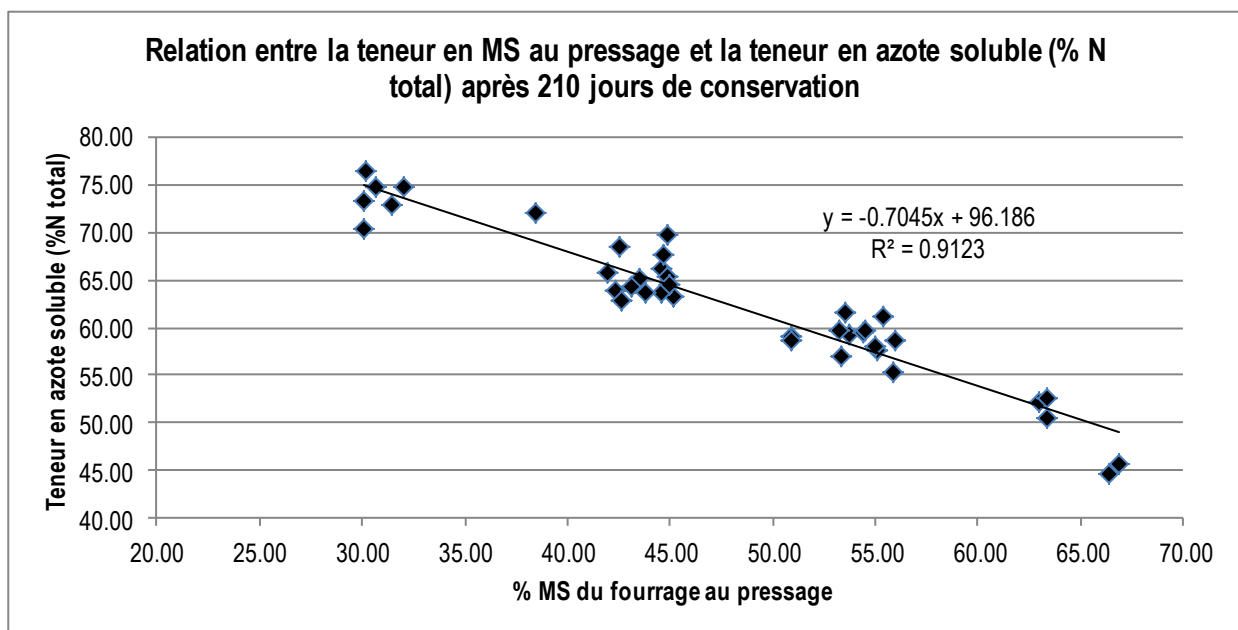


Figure 5 : Relation entre la teneur en MS du fourrage (luzerne) au pressage et la teneur en azote soluble après 210 jours de conservation. 2ème coupe, teneurs en MAT au pressage = 185 à 200 g/kgMS. 1 point = 1 balle enrubannée. Compilations des données d'essais 2015 et 2016, ARVALIS Institut du végétal, programme SOS Protein

En France, le mode de calcul de la dégradabilité ruminale des protéines (= dégradabilité théorique [DT]) tient compte de la teneur en MAT du fourrage et de sa teneur en MS (Nozières et al., 2005). Ces deux critères constituent les deux prédicteurs majeurs de la solubilité de la protéine, et donc de la teneur en azote soluble. En 1991, Buchanan – Smith (cité par Amyot, 2003), mentionnait le lien qui existe entre la

teneur en azote soluble et la dégradabilité ruminale des matières azotées, avec cependant un effet dépréciatif de la protéolyse sur la valeur azotée bien plus fort que celui donné par le mode de calcul Français. Il est à noter qu'en 2005, Nozières et al. signalent que la relation établie pour le calcul de la DT est basée essentiellement sur des fourrages très bien conservés dont la teneur en azote soluble dépassait 60 % que pour des 2 des 48 fourrages conservés humides.). Or, aujourd'hui, ce sont près de la moitié des ensilages et enrubannages récoltés qui présentent des teneurs en azote soluble supérieures à 60 % (Uijtewaal, comm. personnelle).

Quoi qu'il en soit, l'élévation de la teneur en MS permet de protéger partiellement les matières azotées durant la conservation et contribue ainsi à préserver les protéines digestibles dans l'intestin d'origine alimentaire (PDIA). Ceci permet aux fourrages de légumineuses de répondre aux besoins nutritionnels élevés des animaux et d'améliorer le bilan azoté de la ration.

2.2 Des pertes de MS globalement faibles durant la conservation

Il est couramment admis que les pertes durant la conservation par voie humide (ensilage ou enrubannage) sont relativement importantes. La Figure 6 reprend les niveaux de pertes rapportés par plusieurs auteurs ayant notamment étudié l'effet de la teneur en MS au pressage sur les pertes durant la conservation. Ces données regroupent des durées de conservation variables, allant de 154 à 364 jours. Néanmoins, les points reliés entre eux constituent les données moyennes intra-essais, obtenues à iso-durée de conservation. Les données compilées des essais conduits par Arvalis en 2015 (projet Luziva), 2016 (SOS Protein), ainsi que les données des essais conduits par Shinnars en 2000 et 2001 (Shinnars et al., 2009) illustrent qu'il existe une tendance à la réduction des pertes de MS durant la conservation avec l'élévation de la teneur en MS, dans la gamme étudiée. Bien que le lien soit faible, il apparaît qu'en moyenne, un pressage à 60 contre 45 % MS permet de préserver 1 % de MS.

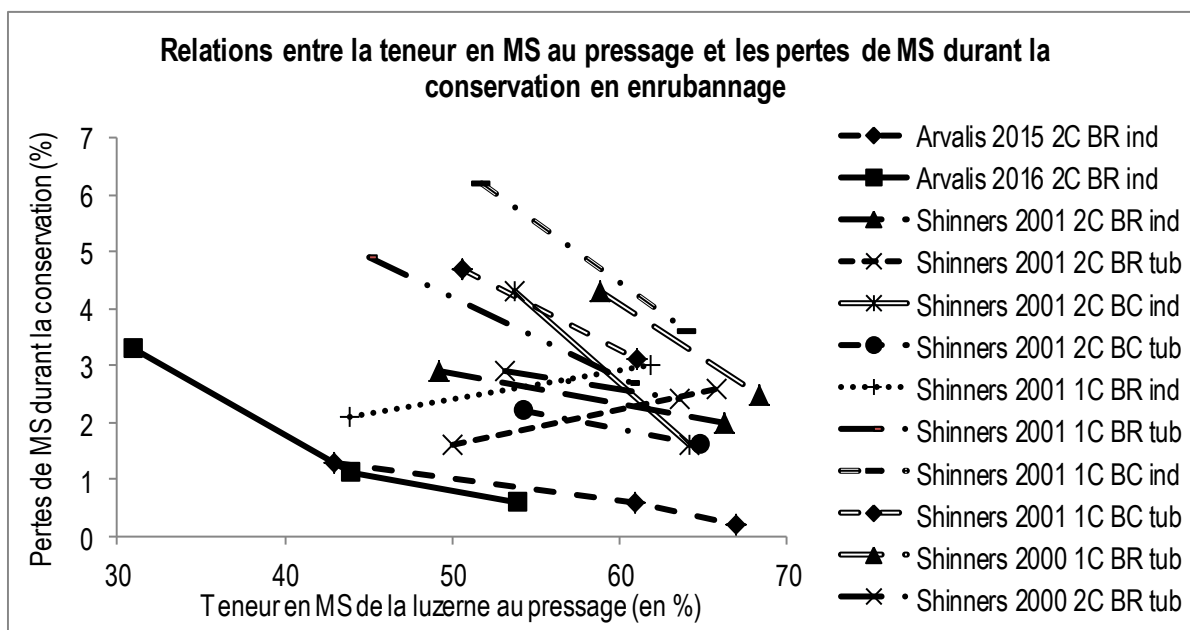


Figure 6 : Relations entre la teneur en MS au pressage et les pertes de MS durant la conservation sous forme enrubannée (en % de la MS initiale de la balle). 1C : 1er cycle, 2C : 2ème cycle, BR : balle ronde, BC : balle carrée, ind : enrubannage en balle individuelle, tub : enrubannage en tube (continu).

A teneur en MS donnée, l'utilisation du système de hachage évoqué plus haut peut être un moyen de sécuriser la conservation. Borreani et al. (2006) ont montré à plusieurs reprises que le rotocut permettait

de réduire, au moins en tendance, les pertes de MS durant la conservation. Bien que l'effet soit limité dans son ampleur, les réductions semblent d'autant plus importantes que le fourrage est humide (<45 %MS). Cette tendance a été récemment observée en France dans un essai conduit sur luzerne. L'activation du rotocut a permis de réduire les pertes de MS lorsque la teneur en MS au pressage était de 31% mais pas lorsqu'elle était de 44 et 54% (Arvalis 2016, SOS Protein, données non publiées).

2.3 Le maintien de l'intégrité du film plastique est impératif

Du fait du fort ratio surface/volume, l'enrubannage est un mode de conservation dont la réussite tient en grande partie au maintien de l'intégrité du film plastique. A la différence de l'ensilage en silo couloir, près de la moitié du fourrage d'une balle enrubannée se situe à moins de 12 cm du film plastique qui constitue la seule barrière avec l'air extérieur (Forristal et O'Kieley, 2005). Une simple perforation peut donc rompre l'anaérobie et engendrer des pertes significatives.

2.3.1 Liage et filmage de la balle, deux piliers du maintien des conditions anaérobies

- **Le mode de liage influe sur le risque de perforations**

Le liage ficelle a pendant longtemps été majoritaire. Il est aujourd'hui minoritaire au profit du liage filet (Uijtewaal et al., 2016). Comparativement au liage ficelle, ce dernier offre une surface de balle plus « lisse » en rabattant notamment les tiges et brins de fourrages rigides récalcitrants en parallèle de la surface de la balle. L'utilisation du système de couverture des bords (dit « cover edge ») pourrait permettre d'accroître cet avantage en produisant des bords de balle « lisses » et ainsi réduire les perforations sur les arêtes des balles. Depuis quelques années en France, le liage par film plastique a fait son apparition. Il consiste à lier la balle avec un film plastique fin, de même nature que le film utilisé pour enrubanner la balle. Dans une étude comparative entre deux systèmes de liage (filet versus film plastique), Bisaglia et al. (2011) ont observé un moindre développement de moisissures sur les balles ayant bénéficié du liage par film plastique. Ce mode de liage peut donc constituer une opportunité pour l'enrubannage des légumineuses bien que les auteurs aient rapporté une consommation massique supérieure de plastique (+ 8.7 %).

- **Le mode d'enrubannage joue un rôle dans le risque de perforations**

Outre l'application d'un nombre de couches de film plastique supérieur (6 à 8) par rapport à l'enrubannage de graminées (4 à 6), il n'existe pas de réglages des enrubanneuses, spécifiques pour les légumineuses. Il convient néanmoins de procéder aux réglages essentiels concernant l'étirement et le chevauchement des couches (Gaillard, 1998).

Dans les essais conduits par Shinnars et al. (2009), la réalisation d'enrubannage en continu en comparaison de l'enrubannage monoballe n'a pas montré de différences en termes de préservation de la MS et de la qualité du fourrage. Néanmoins, la question du biais expérimental au regard des pratiques des éleveurs peut être soulevée. En effet, en conditions expérimentales, les soins nécessaires au maintien de l'intégrité du film plastique du champ au stockage sont apportés et dans la négative, les trous sont rebouchés. Dans la pratique, la réalisation de l'enrubannage en continu ou l'enrubannage en balle individuelle sur le site de stockage constitue un moyen de mieux maintenir l'intégrité du film plastique en ne déposant pas la balle filmée sur les chaumes rigides au champ ainsi qu'en réduisant le nombre de manipulations de la balle, une fois filmée. Ces deux « alternatives » à l'enrubannage au champ requièrent néanmoins une logistique spécifique dans laquelle il devient important d'assurer un délai maximal de 24 à 36 heures entre le pressage et l'enrubannage afin de prévenir l'échauffement du fourrage et la baisse de valeur alimentaire (Diyigena, 2016).

Sur ce dernier point, les combinés presse-enrubanneuse, plébiscités pour leur efficacité en termes de débit de chantier et de faible besoin en main d'œuvre, sont des matériels assurant le pressage et

l'enrubannage en un seul passage, réduisant le délai entre le pressage et l'enrubannage à seulement quelques minutes. Par conception, la dépose de la balle se fait systématiquement au champ, sur des chaumes rigides. En générant ainsi des perforations, ces matériels ne constituent pas réellement une opportunité pour la récolte des légumineuses fourragères.

Depuis quelques années, les technologies au profit de l'enrubannage ont largement évolué. Du double pré-étireur de plastique au triple satellite, nous proposons ici de nous arrêter sur une technologie pouvant apporter un « plus » dans la récolte des légumineuses. A la différence du système traditionnel, la technologie dite « 3D » consiste à déposer d'abord le film plastique sur la totalité de la face ronde de la balle alors qu'elle tourne selon son axe horizontal. Ensuite, à l'instar du système traditionnel, le film plastique est déposé alternativement sur les faces planes et arrondie, durant la rotation de la balle selon son axe horizontal (Borreani et al., 2007). L'influence de cette technologie sur les qualités de conservation des fourrages, ainsi que sur le risque de perforations et de développement de moisissures visibles à la surface des balles a été testée (Borreani et al., 2007). Les auteurs rapportent que les balles filmées en 4 couches avec le système traditionnel ont présenté des trous dans le film plastique, ainsi que des moisissures visuelles. Bien que difficilement comparables, les balles filmées avec 5 couches déposées avec la technologie 3D n'ont pas présenté de trous ni de moisissures. Ceci peut tenir à deux raisons majeures. D'une part, la répartition du film plastique entre les différentes faces est plus homogène qu'avec le système traditionnel. Par ailleurs, la manière avec laquelle le film plastique est déposé sur les angles de la balle peut réduire le risque de perforations en épousant mieux la forme de l'arête. En étant appliqué de manière « tangentielle », la dépose du film contribue à plaquer les tiges récalcitrantes et les diriger dans le sens de la dépose du film, devenant de fait, moins agressif.

2.3.2 Bonne tenue de balle exigée

Durant le stockage, l'empilement sans risque des balles enrubannées requiert une bonne tenue des balles. Dans la négative, l'affaissement du tas engendre des sur-étirements du film et accroît de fait la perméabilité à l'oxygène du film plastique. L'obtention d'une balle dense tient à plusieurs paramètres.

Tout d'abord, la confection d'un andain large permet une alimentation régulière de la chambre de pressage et optimise ainsi l'occupation du volume de la balle. Par ailleurs, le type de presse (chambre fixe *versus* chambre variable) influence la densité de la balle. Les presses à chambre variable offrent la possibilité d'exercer une pression sur le fourrage afin d'accroître la densité des balles. A même teneur en MS, l'utilisation d'une presse à chambre variable permet d'obtenir une densité plus élevée qu'une presse à chambre fixe (Figure 7). Il est important de noter que la teneur en MS au pressage joue un rôle prépondérant sur la densité exprimée en kg MS/m³. Entre un fourrage à 31 et 54 % MS, la densité au pressage est accrue de +43% avec une presse à chambre variable. Une tendance à l'accroissement des densités est également observée avec une presse à chambre fixe (Figure 7). Cette constatation a également des conséquences économiques importantes en permettant de réduire les coûts de récolte par le recours à un préfanage important. Ainsi, en augmentant la densité tout en produisant des balles plus légères, l'élévation de la teneur en MS garantit la bonne tenue des balles durant le stockage.

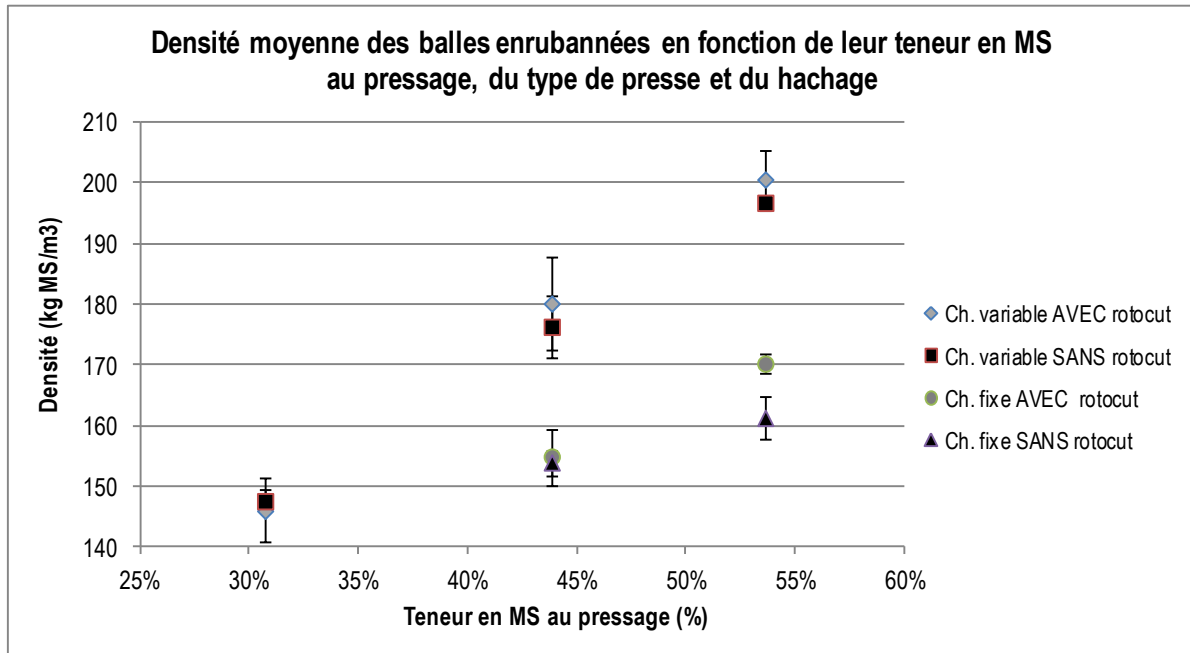


Figure 7 : Effets du % MS du fourrage au pressage, du type de presse et du hachage sur la densité des balles en kgMS/m³. Ch. : chambre. Essai réalisé en 2016, luzerne pure, 2^{ème} cycle. Arvalis Institut du végétal, SOS Protein

Le rotocut permet d'accroître la densité des balles, mais sa contribution semble marginale et variable au regard de l'effet des autres pratiques de récolte. En 2006, Borreani et Tabacco rapportent des accroissements de densité compris entre +2.5 et +4.7 %. D'autres auteurs rapportent des différences supérieures, comprises entre +7.8 et +14.3 % (Bisaglia et al., 2001). En 2016, ARVALIS Institut du végétal a constaté des différences de densité en moyenne de +1.8 %, allant de -1.2 % à +5.6 % en faveur du fourrage haché (Figure 7). Bien que le hachage augmente en tendance la densité de la balle, il n'est pas à exclure que son utilisation puisse être préjudiciable à la bonne tenue des balles, notamment lorsque le fourrage est insuffisamment préfané. Il n'existe cependant aucune référence sur le sujet.

2.3.3 L'élévation de la teneur en MS a des effets pervers

L'élévation de la teneur en MS s'accompagne en règle générale d'une augmentation du risque de pertes de feuilles, se traduisant par un manque à récolte et une baisse de la valeur azotée et de la digestibilité du fourrage (Demarquilly et al., 1998 ; Baumont et al., 2011). Par ailleurs, au fur et à mesure du préfanage, l'augmentation de la teneur en MS du fourrage accentue la rigidité du fourrage, essentiellement des tiges. Cette rigidité peut s'avérer préjudiciable à l'intégrité du film plastique en le perforant ou en créant des micro-abrasions locales, aux endroits où la balle présente une surface ébouriffée. Les micro-abrasions qui en résultent présentent vraisemblablement une perméabilité à l'oxygène plus élevée. De fait, la présence d'oxygène, si minime soit-elle, permet des réactions aérobies dont l'intensité dépend plus ou moins du pH et peut également entraîner une remontée du pH lorsque les acides sont métabolisés par les micro-organismes aérobies (levures, moisissures). Cette hypothèse est étayée par McEnery et al. (2011), qui ont constaté que le développement de moisissures était d'autant plus important que la durée de conservation était longue. Pour une même durée de conservation, l'élévation de la teneur en MS a pour effet d'accroître le développement de moisissures à la surface des balles (Figure 8).

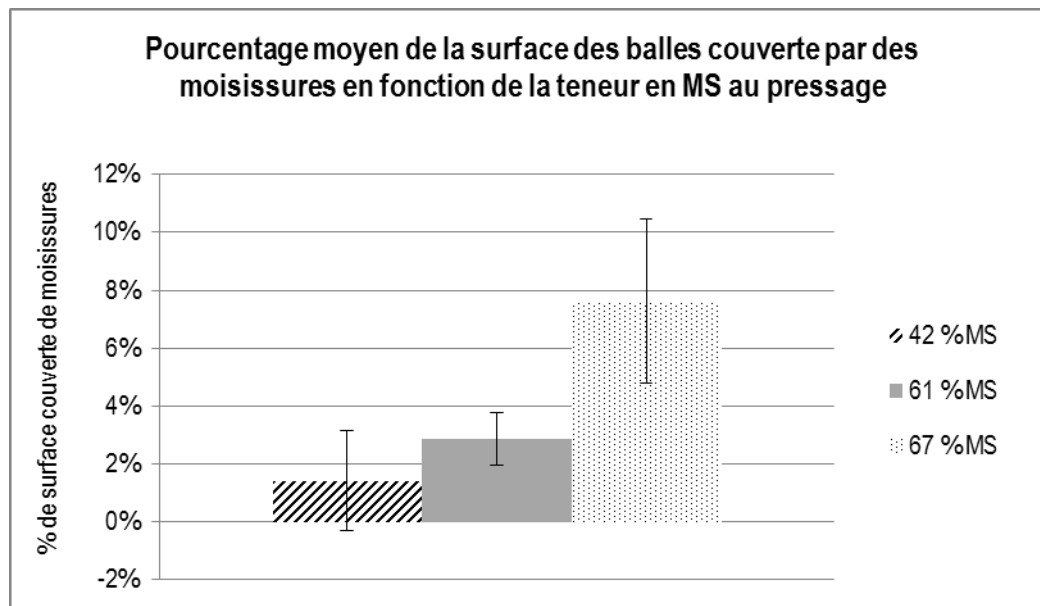


Figure 8 : Pourcentage moyen de la surface des balles couverte par des moisissures en fonction de la teneur en MS au pressage (en %). Notations effectuées sur 5 balles par modalité après 240 jours de conservation. 8 couches de film plastique. (ARVALIS Institut du végétal, 2015, projet Luziva, données non publiées)

Conclusion

Du fait de la teneur en MS requise (60 – 65 %), l'enrubannage apparait comme une solution opportune pour récolter et conserver les légumineuses fourragères. Au regard du foin, ce mode de récolte offre tout d'abord une souplesse bien plus importante vis-à-vis des conditions météorologiques au moment de la récolte. Sous nos latitudes, il est bien souvent délicat d'atteindre une teneur en MS suffisante pour une conservation sécurisée sous forme de foin. Du fait d'un nombre de manipulations avant pressage réduit et de la possibilité technique d'intervenir systématiquement sur un fourrage humide ou ré-humidifié, l'enrubannage réunit les conditions pour minimiser les pertes au champ. Du point de vue de la valorisation animale, l'enrubannage présente une digestibilité et donc une valeur énergétique inférieure à l'ensilage du fait d'une durée de préfanage et de pertes mécaniques en général supérieures. En revanche, l'élévation de teneur en MS permet de préserver l'intégrité des protéines durant la conservation. Globalement, l'évolution des matériels de récolte a permis d'accompagner l'essor des graminées prairiales, tout en permettant de produire un travail de qualité pour les légumineuses prairiales. La réduction des consommations de plastique et le maintien de l'intégrité du film plastique tout au long du process de production apparaissent néanmoins comme les deux principaux enjeux auquel l'enrubannage devra répondre dans les années à venir.

Références bibliographiques

Amyot A., 2003. Bien comprendre ce qui se passe dans le fourrage, du champ...à l'animal, un atout pour améliorer sa régée. Colloque régional sur les plantes fourragères. 24p.

Amyot A., 2008. Effet du hachage, de la matière sèche et du stade sur la qualité de l'ensilage de luzerne en balles rondes. Rapport final IRDA, 51p.

Aufrere J., Theodoridou K. Baumont R., 2012. Valeur alimentaire pour les ruminants des légumineuses contenant des tannins condensés en milieux tempérés. INRA Prod. Anim. 25 (1), 29-44.

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.
- Borreani G., Bisaglia C., Tabacco E., 2007. Effects of a new-concept wrapping system on alfalfa round-bale silage. *Transactions of the ASABE*. Vol. 50(3): 781–787.
- Broderick G.A., 2001. Maximizing utilization of alfalfa protein : the example of the lactating dairy cow. In *Quality in Lucerne and medics for animal production*. Zaragoza : CIHEAM, 2001, p.183-192.
- Buckmaster D.R., 1993. Alfalfa raking losses as measured on artificial stubble. *American Society of Agricultural Engineers*. Vol 36, 645-651.
- Cabon G., 1982. Les pertes en cours de récolte et de conservation de la luzerne et du trèfle violet. *Fourrages*, 90, 161-172.
- 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*.
- Demarquilly C., Dulphy J.P., Andrieu J.P., 1998. Valeurs nutritive et alimentaire des fourrages selon les techniques de conservation : foin, ensilage, enrubannage. *Fourrages*, 155, 349-369.
- Gaillard F., 1998. De la fauche à la distribution des fourrages. Les innovations récentes du machinisme. *Fourrages*, 155, 319-330.
- Getachew G, Depeters E.J., Pittroff W., Putnam D.H., Dandekar A.M., 2006. Does Protein in Alfalfa Need Protection from Rumen Microbes? *The Professional Animal Scientist* 22 (2006):364–373.
- Gouet P., Fatianoff N., Zelter S.Z., Durand M., Chevalier R., Dumay C., Janot F., 1965. Influence de l'élévation du taux de matière sèche sur l'évolution biochimique et bactériologique d'une luzerne conservée par ensilage. In *Annales de Biologie Animale Biochimie Biophysique* Vol. 5, No. 1, pp. 79-100. EDP Sciences.
- Greenlees W.J., Hanna H.M., Marley S.J., Bailey T.B., Shinnors K.J., 2000. A Comparison of Four Mower Conditioners on Drying Rate and Leaf Loss in Alfalfa and Agrass. *Applied Engineering in Agriculture* VOL. 16(1): 15-21.
- Leibensperger R.Y., Pitt R.E., 1987. A model of clostridial dominance in ensilage. *Grass and Forage Science*, v.42, p.297-317.
- McEniry J., Forristal P.D., O'Kiely P., 2011. Factors influencing the conservation characteristics of baled and precision-chop grass silages. *Irish Journal of Agricultural and Food Research* 50: 175–188.
- McKersie B.D., Buchanan-Smith J., 1982. Changes in the levels of proteolytic enzymes in ensiled alfalfa forage. *Canadian Journal of Plant Science*, 62(1), 111-116.
- Merchen N.R., Satter L.D., 1983. Changes in nitrogenous compounds and sites of digestion of alfalfa harvested at different moisture contents. *Journal of Dairy Science*, 66(4), 789-801.
- Muck R.E., 1987. Dry matter level effects on alfalfa silage quality. I. Nitrogen transformation. *Transactions of the ASAE*. Vol 30, No. 1 p7-14.
- Muck R.E., 2006. Fermentation characteristics of round bale silages. *Southern Pasture and forage crop improvement conference*. Proceedings 8p.
- Niyigena V., 2016. Effect of Delayed Wrapping and Wrapping Source on Intake and Digestibility of Alfalfa Silage in Gestating Sheep. *Theses and Dissertations*. 1829.
- Nozieres M.-O., Dulphy J.-P., Peyraud J.-L., Poncet C., Baumont R., 2005. Estimation, pour les fourrages, de la dégradabilité des protéines (DT) dans le rumen et de la digestibilité réelle des protéines alimentaires dans l'intestin grêle (dr) : conséquences sur leurs valeurs PDI. *Renc. Rech. Ruminants*, 12, 105-108.

Owens V.N., Albrecht K.A., Muck R.E., 1999. Protein degradation and ensiling characteristics of red clover and alfalfa wilted under varying levels of shade. *Canadian Journal of Plant Science*, 79(2), 209-222.

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.

Rouillé B., Delaby L., Delagarde R., Caillaud D., Désarménien D., Daveau B., Guibert S., 2016. Intérêt des légumineuses fourragères pâturées et/ou récoltées dans l'alimentation des vaches laitières en France. Recueil des communications Journées AFPP 2016, 20&21 mars 2016. Paris.

Sauter J., Latsch R., Hensel O., 2011. Comparison of methods for determining shatter losses in hay harvesting. *Landtechnik* 66, no. 3, pp. 198–200.

Savary C., 2016. Quelle consommation de carburant pour la récolte de l'herbe. Dossier fenaison. *Agri* 72. 14-15.

Shinners K.J., Huenink B.M., Muck R.E., Albrecht K.A., 2009. Storage characteristics of large round alfalfa bales: dry hay. *Transactions of the ASABE*. Vol. 52(2): 409-418.

Shinners K.J., Wuest J.M., Cudoc J.E., Herzmann J.E., 2006. Intensive conditioning of alfalfa: drying rate and leaf loss. 2006 ASABE Annual International Meeting. Oregon Convention Center Portland, Oregon 9 - 12 July 2006.

Tao L., Guo X.S., Zhou H., Undersander D.J., Nandety A., 2012. Short communication: Characteristics of proteolytic activities of endo-and exopeptidases in alfalfa herbage and their implications for proteolysis in silage. *Journal of dairy science*, 95(8), 4591-4595.

Thomas E.D., 2007. Harvesting alfalfa and alfalfa-grass. How should we mow? Page 211, March 25, 2007, issue of *Hoard's Dairyman*.

Uijtewaal A., Kardacz P., Crocq G., 2016b. Récolte de foin de luzerne : effet des heures d'intervention et du réglage de la vitesse de rotation de toupies à l'andainage sur les pertes quantitatives et qualitatives. Poster Journées AFPP 20&21 mars 2016, Paris.

Uijtewaal A., Chapuis S., Crocq G., Lépée P., 2016a. Quoi de neuf en matière de récolte et conservation des légumineuses fourragères ? Recueil des communications p107-119. Journées AFPP 20&21 mars 2016, Paris.

Undersander D., Saxe C., 2013. Field Drying Forage for Hay and Haylage Focus on Forage - Vol 12: No. 5.

Wieringa G.W., 1969. Influence of moisture and nutrient content of forage plants on fermentation processes. Pages 133-137 in *Proceedings of the 3rd General Meeting of the European Grassland Federation*, Braunschweig, Allemagne.

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.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0)



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL)