

Transformation des plantes au cours de leur conservation et conséquences sur leur valeur pour les ruminants

R. Baumont¹, Y. Arrigo², V. Niderkorn¹

1 : INRA, UR1213 Herbivores, F-63122 Saint-Genès Champanelle, France ; baumont@clermont.inra.fr

2 : Agroscope Liebefeld-Posieux (ALP), CH-1725 Posieux, Suisse.

Résumé

La constitution de stocks de fourrages conservés est indispensable pour alimenter les animaux au cours des périodes durant lesquelles la croissance des plantes prairiales s'arrête ou est insuffisante. Ces stocks peuvent être constitués au moment où la pousse de l'herbe excède les besoins des animaux, essentiellement au printemps donc, et à partir de cultures dédiées comme le maïs fourrage.

Conservé un fourrage suppose de stabiliser le matériel vivant qui le constitue initialement, le fourrage vert. Cette stabilisation peut être obtenue soit par voie sèche qui nécessite la dessiccation du fourrage jusqu'à une teneur en MS de 85%, soit par voie humide qui nécessite la conjonction de l'anaérobiose et de l'acidification du milieu. On dispose maintenant d'une large palette de techniques dans chacune des voies de conservation, ou bien les combinant, permettant de réaliser des fourrages conservés à des teneurs en matière sèche (MS) variant de 20 à 85% : ensilage en coupe directe, ensilage préfané, ensilage mi-fané, foin séché en grange par ventilation, foin séché au sol. Les processus mis en jeu et les conséquences des différentes techniques de conservation sur la valeur alimentaire des fourrages sont désormais bien connus pour les principaux paramètres de la valeur alimentaire, et pour les fourrages classiques. Ils ont pu faire l'objet de relations quantifiées utilisées pour prévoir leur valeur.

Pour les fourrages fanés, la rapidité du séchage (en limitant les pertes par respiration et par lessivage) et la conservation des parties feuillues sont les clés pour maintenir la valeur alimentaire la plus proche possible de celle du fourrage vert. Le séchage par ventilation d'un fourrage ayant atteint rapidement 50-55% de MS, ou le fanage au sol par beau temps permettent d'obtenir les meilleurs résultats.

Si les techniques d'ensilage permettent de maintenir la valeur énergétique du fourrage vert initial, leur principal problème réside dans la diminution importante de l'ingestion lorsque les produits des fermentations secondaires (acides gras volatils, amines) sont présents en grande quantité, et dans la diminution importante de la valeur azotée du fait également des produits de fermentation et de l'augmentation de la dégradabilité de l'azote. Pour l'herbe, limiter la formation des produits de fermentation et la solubilisation de l'azote passe par l'utilisation de conservateurs efficaces pour les coupes directes ou par le préfanage. La technique des fourrages mi-fanés enrubannés, souple à mettre en œuvre, permet d'obtenir des fourrages bien conservés de valeur alimentaire suffisante pour des animaux à besoins modérés.

Les conséquences des différentes techniques de conservation sur les composés d'intérêt pour la qualité des produits (acides gras, micronutriments, acides aminés) restent à mieux préciser. Des pistes sont à explorer pour améliorer la qualité des fourrages conservés et mieux prendre en compte l'aptitude à la conservation dans l'élaboration des mélanges fourragers et des prairies multispécifiques. L'utilisation de plantes riches en glucides solubles ou de plantes contenant des composés secondaires (tanins à des concentrations ne diminuant pas la digestibilité, polyphénol-oxidase) limitant la solubilisation de l'azote devrait permettre d'améliorer la valeur alimentaire des fourrages fermentés. L'aptitude au séchage des plantes fourragères nécessiterait également d'être plus étudiée.

Introduction

La constitution de stocks de fourrages conservés est indispensable pour **alimenter les animaux** au cours des périodes durant lesquelles la croissance des plantes prairiales s'arrête ou bien est insuffisante pour nourrir le troupeau. Il s'agit des **périodes hivernales**, dont la durée varie en Europe de 3 à 6 mois maximum pour les régions septentrionales et les zones de montagne, mais aussi des **périodes de sécheresse estivale** dont la fréquence et la durée risque d'augmenter avec le réchauffement climatique. Ces stocks peuvent être constitués au moment où la pousse de l'herbe excède les besoins des animaux, essentiellement au printemps donc, et à partir de cultures dédiées comme le maïs fourrage.

La pratique de la conservation des fourrages est très ancienne ; elle a accompagné la sédentarisation de l'élevage lorsque le déplacement des troupeaux pour rechercher les ressources fourragères a été abandonné, même si des pratiques de transhumance ont perduré en zone de montagne. Longtemps basée sur le foin, les principales étapes de la conservation des fourrages ont été récapitulées par BÉRANGER (1998) avec, notamment, le développement de l'ensilage de l'herbe qui a contribué à la Révolution fourragère débutée dans les années 1950, en permettant des récoltes de printemps plus précoces, donc de meilleure valeur pour les animaux, et en libérant ainsi plus tôt les surfaces pour alterner le pâturage et la fauche (*FOURRAGES* n°56, AFPP, 1973). Dans les années 1970, le développement du maïs fourrage pour constituer des stocks hivernaux repose également sur la technique de l'ensilage. Plus récemment, dans les années 1990 est apparue la technique des fourrages enrubannés qui offre les avantages de l'ensilage et la souplesse du foin dans la réalisation des chantiers de récolte. Les techniques de séchage du foin par ventilation en grange ont également progressé au cours de la dernière décennie (VIGNAU-LOUSTAU et HUYGHE, 2008).

Conservé un fourrage suppose de stabiliser au mieux le matériel vivant que constitue le fourrage vert initial, de façon à pouvoir le stocker plusieurs semaines ou plusieurs mois sans qu'il ne s'altère et qu'il conserve une valeur alimentaire élevée. Cette stabilisation peut être obtenue soit par voie sèche qui nécessite la dessiccation du fourrage jusqu'à une teneur en matière sèche (MS) de 85%, soit par voie humide qui nécessite la conjonction de l'anaérobiose et de l'acidification du milieu. On dispose maintenant d'une large palette de techniques dans chacune des voies de conservation, ou bien les combinant, permettant de réaliser des fourrages conservés à des teneurs en MS variant de 20 à 85%. L'objectif de cet article est de présenter dans quelle mesure ces différentes techniques vont modifier la valeur alimentaire du fourrage, sachant qu'une bonne conservation doit viser à maintenir cette valeur aussi proche que possible de celle du fourrage vert initial. Pour cela nous allons **présenter les transformations subies** par les plantes au cours de leur conservation puis **caractériser les effets induits sur la valeur alimentaire**. Dans une dernière partie, nous résumerons les **clés pour réaliser des fourrages conservés de la meilleure valeur alimentaire possible**. Dans cet article, nous nous centrerons sur la conservation à la ferme des fourrages verts issus des graminées, des légumineuses et des prairies. Nous évoquerons aussi le cas de la luzerne déshydratée et de l'ensilage de maïs.

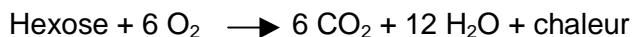
1. Transformations subies par les plantes depuis la fauche jusqu'à la stabilisation des fourrages conservés

De la fauche jusqu'à la stabilisation du fourrage conservé, les plantes subissent des transformations successives dépendant des conditions physico-chimiques de l'environnement dans lesquelles elles sont placées. Ces conditions évoluent en fonction du mode de conservation appliqué et des étapes de sa mise en œuvre. Ces transformations peuvent être regroupées en trois groupes de processus : la respiration, la dessiccation et la fermentation (Figure 1).

1.1. La respiration

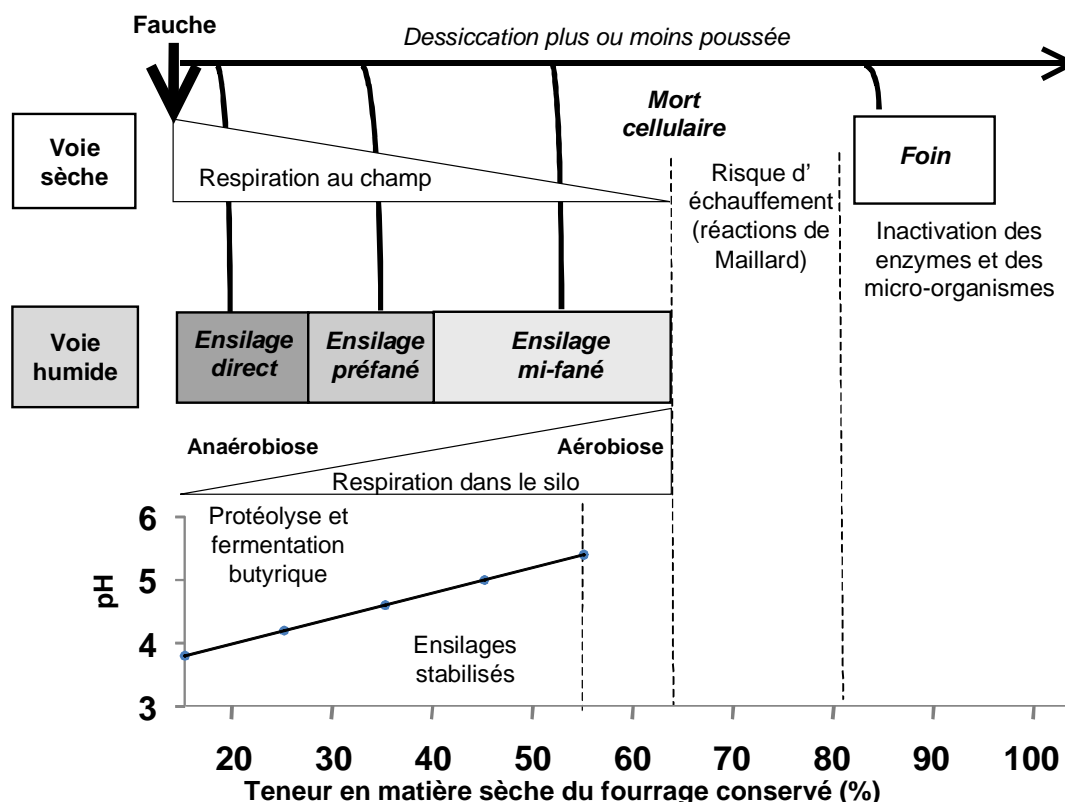
Lorsqu'une plante fourragère est coupée, elle est encore vivante et la respiration cellulaire se poursuit tant qu'elle contient plus de 35-40% d'eau (GREENHILL, 1959). La respiration correspond à l'ensemble des processus métaboliques (glycolyse, cycle de l'acide citrique et chaîne de transport d'électrons) impliqués dans la libération de l'énergie d'origine photosynthétique emmagasinée (HOPKINS, 2003). Les voies respiratoires utilisent principalement le glucose et le fructose provenant

de l'hydrolyse des fructosanes et du saccharose et aboutissent, tout comme dans une réaction de combustion, à la formation de CO₂, d'eau et de chaleur :



La respiration diminue donc la quantité de glucides solubles dans les plantes fourragères qui représente initialement de 4 à 30% de la matière sèche (MS). Elle entraîne ainsi une perte de MS très digestible et consomme le substrat nécessaire au développement ultérieur de la flore lactique de l'ensilage affectant la rapidité et la qualité de la fermentation. Les pertes en glucides solubles par la respiration sont d'autant plus élevées que le temps nécessaire pour atteindre la mort cellulaire s'accroît dans le cas des foin, ou que, dans le cas des ensilages, la période entre la fauche et l'établissement de l'anaérobiose dans le silo est longue. Dans le cas des fourrages séchés, ces pertes en glucides solubles sont négligeables lorsque le fourrage est déshydraté ou séché rapidement par beau temps, mais elles peuvent devenir élevées (de 50 à 66% des teneurs en glucides solubles dans le fourrage vert) en cas de séchage lent et de lessivage par la pluie (JARRIGE *et al.*, 1995).

FIGURE 1 – Représentation des différents processus mis en jeu dans les transformations subies par le fourrage au cours de sa conservation par voie humide ou par voie sèche. Pour les ensilages, la droite du pH selon la teneur en matière sèche du fourrage ensilé représente l'évolution du pH de stabilité de l'ensilage, c'est-à-dire le pH qui doit être atteint pour stopper la protéolyse et le risque de fermentation butyrique.



1.2. La dessiccation

La première phase de dessiccation au champ s'effectue par évapotranspiration au niveau des stomates des feuilles. La nuit ou à l'ombre dans le fond des andains, les stomates sont fermés. Cette **première perte d'eau est rapide tant que les stomates sont ouverts** et parce qu'une partie (2/3 environ) de l'eau des tiges migre vers les feuilles qui se dessèchent plus vite que les tiges (DEMARQUILLY, 1987). **Ensuite, la perte d'eau se ralentit car la cuticule dont la partie extérieure cireuse est très imperméable empêche celle-ci de s'évaporer.** Ces deux voies de perte d'eau déterminent les phases rapides et lentes des cinétiques de dessiccation en conditions maîtrisées permettant de caractériser la vitesse de séchage d'un fourrage (JONES et PRICKETT, 1981).

La dessiccation demande de 2-3 jours à parfois plus de 8 jours. La **vitesse de dessiccation** de l'herbe diminue avec l'élévation de l'humidité du sol, du niveau de saturation hydrique de l'air et de la

densité des andains tandis qu'elle s'accroît avec la teneur en matière sèche à la fauche, l'ensoleillement, la vitesse du vent et la température de l'air et des andains. Elle dépend également de la production à l'hectare, qui augmente la quantité d'eau à évaporer, et du matériel de fauche et de conditionnement ; par exemple, augmenter la largeur des andains augmente la vitesse de dessiccation (KUNG *et al.*, 2010). Elle varie aussi avec la famille botanique, l'espèce fourragère et le rapport feuilles/tiges. Sur la base de critères morphologiques, LECONTE *et al.* (2008) ont classé les principales espèces prairiales selon leur aptitude au séchage. Ainsi, les légumineuses sèchent plus vite que les graminées. La luzerne, qui possède dix fois plus de stomates sur ses feuilles que les graminées, sèche très rapidement, ce qui explique son aptitude à la déshydratation et au séchage en foin. En revanche, certaines espèces très riches en eau comme le trèfle violet sèchent difficilement.

Les **actions mécaniques** (fauche, conditionnement, andainage, pressage) affectent l'intégrité des plantes. Les feuilles moins résistantes car moins lignifiées que les tiges sont plus sensibles à l'action des outils. Les pertes que ces actions provoquent affectent donc un matériel végétal très digestible. Les **pertes de feuilles** affectent d'autant plus les plantes que celles-ci sont dans un état de dessiccation avancé et touchent davantage les légumineuses que les graminées en raison de la fragilité du lien entre les tiges et les feuilles (VIGNAU-LOUSTAU et HUYGHE, 2008).

Lorsque la teneur en matière sèche du fourrage atteint 65%, les cellules végétales meurent et perdent leur potentiel de perméabilité sélective (Figure 1). **Si une réhumidification** du fourrage **intervient** sous l'effet de la pluie, une partie des sucres, des matières azotées et des minéraux solubles dans l'eau quittent alors les cellules et sont entraînées par lessivage. Ce n'est que lorsque la teneur en matière sèche atteint 85% que les enzymes de la plante sont inactives et que le développement des moisissures devient impossible. Lors de la fenaison, peuvent s'ajouter des pertes liées à l'échauffement si les foins sont pressés insuffisamment secs. L'échauffement est dû à la respiration des cellules végétales encore vivantes et à l'activité des bactéries et des moisissures, et entraîne des réactions de Maillard entre les protéines et les sucres.

1.3. La fermentation

Au cours du processus d'ensilage, les glucides solubles hydrolysés constituent la principale source d'énergie pour les micro-organismes. Ces glucides solubles disparaissent presque totalement sauf dans les ensilages très préfanés ou préparés avec une addition importante de conservateur acide. **Les glucides solubles sont remplacés par de l'acide lactique, des acides gras volatils (AGV) et des alcools.** A l'inverse, l'amidon des céréales ainsi que les glucides constituant les parois des cellules végétales jouent un rôle réduit comme substrat de la flore lactique bien que les hémicelluloses puissent être en partie hydrolysées par les hémicellulases de la plante.

Les protéines qui représentent généralement 70 à 80% de l'azote (N) total de la plante sont dégradées par les protéases de la plante jusqu'au stade acides aminés. **La protéolyse élève la teneur en azote soluble** jusqu'à 40-60% de l'N total **et se poursuit jusqu'à ce que le pH descende en dessous de 4,0** (MC PHERSON, 1952 ; BRADY, 1960 ; JARRIGE *et al.*, 1995). Cependant, des composés secondaires présents notamment dans certaines espèces de légumineuses, peuvent moduler la protéolyse dans les silos mais aussi dans le rumen des animaux (NIDERKORN et BAUMONT, 2009). La polyphénol oxydase, particulièrement active dans le trèfle violet et le dactyle, catalyse l'oxydation des phénols en quinones, composés capables de former des complexes avec les protéines, protégeant celles-ci de l'action des protéases végétales (LEE *et al.*, 2008). L'activation de cette enzyme chloroplastique nécessite que les cellules soient endommagées pour être en contact avec les composés phénoliques présents dans les vacuoles ainsi qu'un temps de contact suffisant avec l'oxygène, ce qui explique qu'elle soit activée lors du processus d'ensilage mais qu'elle ne le soit pas dans les conditions anaérobies du rumen lorsque les plantes sont ingérées en vert. Les autres composés secondaires végétaux susceptibles de réduire la protéolyse dans les silos et le rumen sont les tanins condensés (THEODORIDOU *et al.*, 2011) et les saponines (ABREU *et al.*, 2004). Le mode d'action de ces composés consiste également à la formation de complexes avec les protéines végétales.

Lorsque les plantes sont placées dans un **environnement anaérobie**, les cellules végétales meurent par manque d'oxygène et le contenu intracellulaire est libéré par plasmolyse. Il est alors utilisé pour la croissance de la flore bactérienne anaérobie présente initialement sur les plantes. Alors que le pH diminue, la flore lactique résistante à l'acidité du milieu se développe, inhibe la croissance des autres micro-organismes et transforme les glucides solubles en acide lactique. La quantité

d'acide lactique nécessaire pour abaisser à 4,0 le pH d'un fourrage dépend de sa teneur en protéines qui augmente son pouvoir tampon. Ce pouvoir tampon est ainsi élevé pour les légumineuses ou les graminées très fertilisées en azote, et faible pour le maïs. Si le fourrage est suffisamment riche en glucides solubles, l'abaissement du pH est tel que l'inhibition complète de toute activité microbienne (y compris de la flore lactique) et de toute activité protéolytique amène l'ensilage à un état stable (Figure 1). En revanche, si l'acidification est insuffisante ou insuffisamment rapide, des fermentations secondaires ont lieu. Les bactéries du genre *Clostridium* prolifèrent, utilisent les glucides résiduels et l'acide lactique préformé et les transforment en acides butyrique et acétique (MCDONALD, 1981). La remontée du pH favorise les espèces protéolytiques putréfiantes qui dégradent les acides aminés en ammoniac ou en amines dont certaines sont toxiques.

Le processus d'ensilage entraîne **des pertes** de différentes origines : i) les **gaz issus des fermentations** anaérobies, ii) les **jus** lorsque les fourrages sont ensilés à une teneur en matière sèche inférieure à 25%, iii) les **parties moisies en surface** de l'ensilage lorsque l'étanchéité du silo est insuffisante, iv) les pertes dues au développement de bactéries aérobies, de levures et de moisissures **après l'ouverture du silo**, qui se traduisent par l'échauffement de l'ensilage. Si l'ensilage a été réalisé dans le respect des bonnes pratiques de fabrication, les moisissures et leurs toxines (mycotoxines) ne sont pas retrouvées en quantités potentiellement dangereuses pour les animaux, mais les mycotoxines préformées au champ, notamment sur le maïs, restent généralement stables dans les silos (NIDERKORN *et al.*, 2007).

1.4. Combinaison des processus de transformation

En réalité, les processus de respiration, dessiccation et fermentation interviennent à différents niveaux dans tous les modes de conservation des fourrages (Figure 1). Cependant, la confection d'ensilages mi-fanés et de balles rondes enrubannées combine volontairement une dessiccation partielle suivie d'une fermentation. La phase de fanage avant mise en silo doit amener le fourrage à une teneur en matière sèche d'au moins 30% de MS si le fourrage est haché, et d'au moins 45% si le fourrage est en brins longs et conservé sous forme de balles rondes enrubannées. Ce fanage partiel ralentit l'ensemble des fermentations et diminue les pertes de matière sèche sous forme de jus. Comme un fourrage humide requiert plus d'acides pour atteindre le pH de stabilité qu'un fourrage plus sec (Figure 1), **le préfanage réduit la formation de produits de fermentation** en particulier celle des AGV. **L'enrubannage permet de limiter considérablement les fermentations secondaires** grâce à une élévation suffisante de la teneur en matière sèche qui empêche l'activité des bactéries butyriques et le développement des moisissures grâce à l'anaérobiose.

2. Conséquences sur les paramètres de la valeur alimentaire

Les transformations subies par les plantes au cours de leur conservation modifient leur composition en macro- et en microconstituants chimiques et de ces modifications découleront les modifications des paramètres de la valeur alimentaire. Rappelons que la digestibilité et par conséquent la valeur énergétique d'une plante fourragère dépendent avant tout de la quantité de parois cellulaires et de leur digestibilité, que son ingestibilité dépend également de la quantité de parois cellulaires et de la vitesse à laquelle elles se dégradent dans le rumen. La valeur azotée dépend de la quantité de matière fermentescible disponible pour les microbes du rumen, de la dégradabilité des protéines alimentaires dans le rumen et de leur digestibilité dans l'intestin (BAUMONT *et al.*, 2009). Nous nous intéresserons aussi aux conséquences de la conservation sur les matières grasses et leurs constituants, sur certains micronutriments et les principaux minéraux.

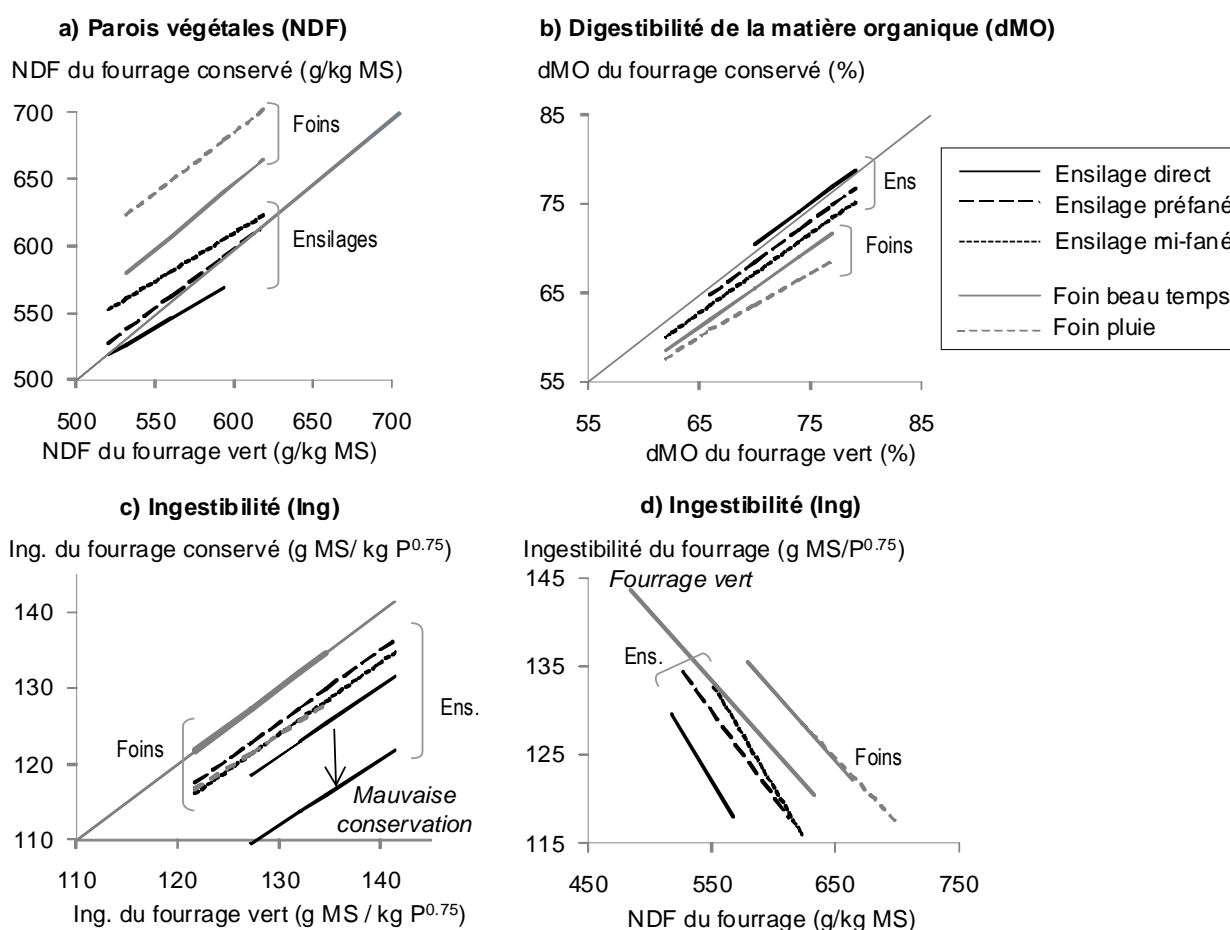
2.1. Les substrats énergétiques et leur digestibilité

Pour les **fourrages séchés**, c'est principalement **la respiration**, en consommant les sucres intracellulaires qui **modifie la composition de la plante en substrats glucidiques**. La diminution de la teneur de la plante en sucres intracellulaires entraîne automatiquement une augmentation de celle en parois cellulaires (Figure 2a). A cela s'ajoute d'autres pertes en constituants cellulaires digestibles (sucres, matières azotées, matières grasses) par la perte de feuilles dues aux actions mécaniques lors du séchage et par le lessivage si le fourrage reçoit de la pluie. **La diminution de digestibilité provoquée par le fanage de la plante est donc très variable** et dépend de la durée et des conditions de fanage (DEMARQUILLY *et al.*, 1998). Notons qu'ARRIGO (2007) n'observe pas de diminution de la

digestibilité de l'herbe fanée dans de très bonnes conditions par rapport à celle de l'herbe congelée. Les fourrages fanés peuvent subir une nouvelle diminution de la digestibilité s'ils sont pressés à une teneur en matière sèche insuffisante (< 82%) et subissent un **échauffement** qui entraîne la formation de complexes indigestibles qui se retrouvent dans les résidus ligno-cellulosiques du fourrage.

Les processus de **fermentation dans le silo** ne modifient que très peu la digestibilité du fourrage. En effet, les constituants volatils qui remplacent les glucides solubles sont également entièrement digestibles et les teneurs en parois cellulaires sont peu modifiées. La teneur en parois végétales totales peut même être légèrement diminuée du fait de l'hydrolyse partielle des hémicelluloses lors de la fermentation (Figure 2a). La digestibilité des ensilages de graminées et de légumineuses réalisés en coupe directe est donc en général très proche de celle du fourrage vert correspondant et ne dépend pas de l'emploi d'un conservateur ; il en est de même pour l'ensilage de maïs plante entière. Elle peut malgré tout être diminuée dans le cas des fourrages ensilés à des teneurs en matière sèche très faibles en raison des pertes sous forme de jus (0,5 point de digestibilité par point de MS inférieur à 20%), et en cas de très mauvaise conservation (cas des ensilages plus ou moins putréfiés). La diminution de digestibilité des fourrages ensilés résulte donc avant tout du fanage plus ou moins poussé de la plante avant sa mise en silo.

FIGURE 2 – Conséquences des différentes techniques de conservation sur les teneurs en parois végétales (a), la digestibilité de la matière organique (b), l'ingestibilité (c) et sa relation avec la teneur en parois végétales (d) (données issues de BAUMONT *et al.*, 2007a pour le ray-grass anglais récolté au 1^{er} cycle).



L'ensemble des comparaisons faites entre les différents types d'ensilages et de foins avec le fourrage vert correspondant a permis de proposer **des relations statistiques permettant de prévoir la composition chimique et la digestibilité du fourrage conservé à partir de celles du fourrage vert** correspondant. Ces relations, complétées pour les ensilages mi-fanés (BAUMONT *et al.*, 2005), structurent les tables des fourrages conservés (ANDRIEU *et al.*, 1988 ; BAUMONT *et al.*, 2007a). Ainsi, la digestibilité des graminées ensilées en coupe directe n'est pas modifiée par rapport à celle du fourrage vert, puis diminue de 2 à 3% lorsque le fourrage est préfané, de 4 à 5% lorsqu'il est mi-fané, de 6 à 7% lorsqu'il est récolté sous forme de foin ventilé ou séché au sol dans de bonnes conditions

et de 8 à 11% lorsque le foin a reçu de la pluie (Figure 2b). Cette diminution de la digestibilité suit l'augmentation de la teneur en parois cellulaires totales, qui est de l'ordre de 3 à 6% pour les fourrages mi-fanés, de 7 à 9% pour les foins ventilés ou séchés au sol dans de bonnes conditions et de 13 à 17% pour les foins ayant reçus de la pluie (Figure 2a). Elle correspond à une augmentation de la quantité de parois cellulaires indigestibles dans le fourrage qui est seulement de 10 à 20 g/kg MS pour les ensilages préfanés et qui peut atteindre 100 g/kg de MS pour les foins réalisés dans de mauvaises conditions. La diminution de digestibilité est plus importante pour les fourrages récoltés à un stade précoce, ce qui est logique puisque ceux-ci sont plus riches en feuilles et en constituants intracellulaires. C'est ce qui explique aussi que la diminution de la digestibilité avec le degré de fanage soit plus importante pour les légumineuses que pour les graminées. Ainsi, pour la luzerne, la diminution de digestibilité par rapport au fourrage vert atteint 3 à 4% pour l'ensilage préfané, 5 à 8% pour les ensilages mi-fanés et les foins ventilés, 6 à 10% pour les foins fanés au sol par beau temps et 13 à 17% pour les foins ayant reçus de la pluie. La digestibilité des foins de luzerne réalisés dans de très bonnes conditions est proche de celle des luzernes déshydratées lorsque la composition chimique (parois cellulaires et azote) est similaire.

2.2. L'ingestibilité et le comportement alimentaire

Les techniques de conservation modulent le comportement alimentaire et l'ingestibilité des fourrages dans la mesure où elles peuvent d'une part modifier leur effet d'encombrement et d'autre part affecter la motivation à les consommer par la présence de composés formés au cours de la conservation. Comme pour la digestibilité, l'ensemble des mesures comparées d'ingestibilité selon le type de conservation chez les ovins et les bovins a permis de proposer des relations permettant de prévoir l'ingestibilité des fourrages conservés (ANDRIEU *et al.*, 1988). Ces relations ont été complétées pour les fourrages mi-fanés (BAUMONT *et al.*, 2007a). A l'exception des foins ventilés ou des foins de graminées séchés au sol dans de très bonnes conditions, **l'ingestibilité des fourrages conservés est généralement plus faible que celle des fourrages verts correspondants** (Figure 2c). Pour les vaches laitières la diminution d'ingestibilité par rapport au fourrage vert est de l'ordre de 4 à 5% pour les ensilages préfanés, mi-fanés et pour les foins séchés au sol dans des conditions pouvant inclure de la pluie ; elle est plus importante pour les ensilages réalisés en coupe directe et atteint 7% lorsqu'ils sont réalisés avec un conservateur, et 15% dans le cas des ensilages réalisés en coupe directe sans conservateur.

Par rapport au fourrage vert, l'excellente ingestibilité des foins malgré l'augmentation de leur teneur en parois végétales (Figure 2c et d) peut vraisemblablement s'expliquer par le rôle de la teneur en matière sèche du fourrage sur l'ingestion. A composition chimique similaire, l'ingestibilité d'une herbe déshydratée (VÉRITÉ et JOURNET, 1970) ou bien partiellement séchée (CABRERA *et al.*, 2004) est supérieure à celle du fourrage vert correspondant. Dans les relations statistiques calculées sur la base de données des fourrages verts des tables INRA, la teneur en MS du fourrage influence presque autant l'ingestibilité que la digestibilité (entre 0,6 et 0,7 g/kg $P^{0,75}$ par point de MS entre 15 et 25% de MS). **Pour les foins bien conservés, l'effet positif du fourrage sec sur l'ingestibilité compenserait en partie, voire en totalité, l'effet négatif sur l'ingestibilité de l'augmentation de la teneur en parois végétales et de la diminution de la digestibilité.**

Au contraire des foins, **l'ingestibilité des fourrages ensilés est toujours inférieure à celle du fourrage vert correspondant**, bien que leur teneur en parois végétales ne soit pas ou peu augmentée (Figures 2c et 2d). C'est principalement la **présence des produits de fermentation** dans les fourrages ensilés en coupe directe qui explique la diminution de leur ingestibilité par rapport au fourrage vert ou au foin correspondant. Ainsi, il a pu être montré (aussi bien chez des ovins que chez des bovins) que lorsque la quantité de produits de fermentation, et d'acides gras volatils en particulier, est réduite par l'action d'un conservateur comme l'acide formique, l'ingestibilité de l'ensilage est significativement augmentée. Avec des ensilages qui contiennent plus de 60 g/kg MS d'AGV, le rôle rassasiant de ces produits limite l'ingestion en réduisant la durée des repas principaux de 20 à 40% par rapport à celle mesurée avec des ensilages moins riches en produits de fermentation et avec des foins (CHIOFALO *et al.*, 1992 ; VAN OS *et al.*, 1995a et b). Le rôle des produits de dégradation des protéines dans l'ensilage, en particulier des amines, a également été suggéré pour limiter l'ingestion des ensilages (VAN OS *et al.*, 1995b). L'ingestibilité plus élevée des ensilages préfanés et mi-fanés par rapport à celle des ensilages correspondants réalisés en coupe directe s'explique par les effets conjugués d'une quantité moindre de produits de fermentation et de

l'augmentation de la teneur en matière sèche qui compensent largement l'effet négatif de l'augmentation de leur teneur en parois végétales.

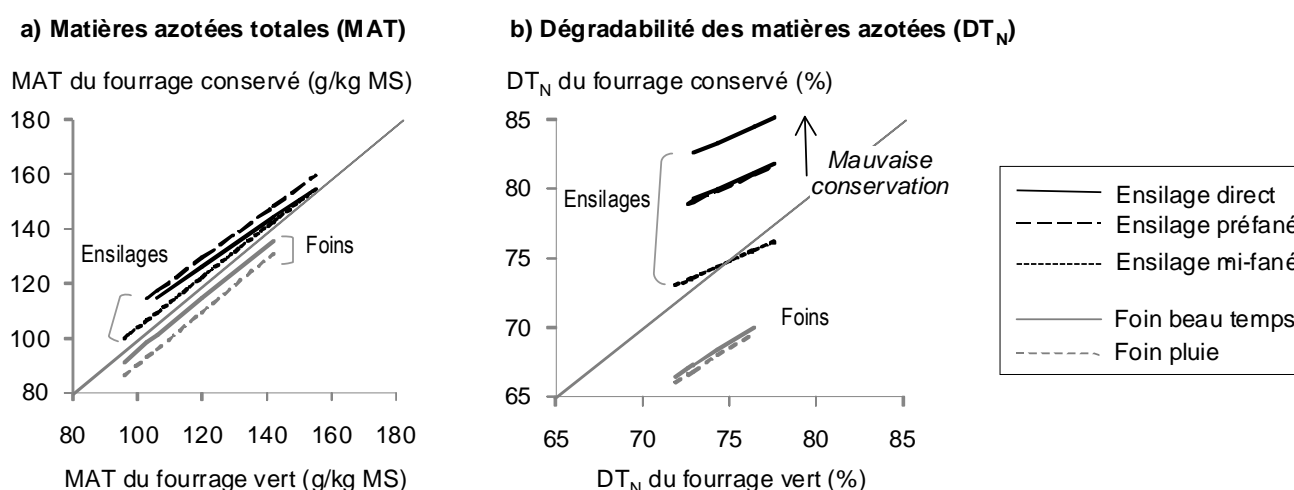
L'ingestibilité de l'ensilage de maïs est en général élevée et comparable à celle du maïs en vert. Comme pour les autres ensilages, l'ingestibilité augmente avec la teneur en matière sèche de l'ensilage jusqu'à une teneur d'environ 35-39% qui correspond au stade vitreux du grain (revue de ANDRIEU et BAUMONT, 2000). Cette augmentation résulte sans doute d'une augmentation de la teneur en grain au détriment de celle en parois, mais aussi d'une diminution de la quantité de produits de fermentation. Récolté à 30-35% MS, l'ensilage de maïs contient très peu d'acides gras volatils. La finesse de hachage influence aussi l'ingestibilité de l'ensilage de maïs, une finesse de hachage de 5 mm permettant d'obtenir l'ingestion maximum (DE BRABENDER *et al.*, 1990). Toutefois, un hachage trop fin augmente les risques d'acidose. En effet, on estime que le risque d'acidose augmente lorsque la proportion de particules inférieures à 2 mm dans la ration dépasse 45-50% (SAUVANT et PEYRAUD, 2010).

2.3. Les constituants azotés et leur utilisation digestive

Le fanage réduit la teneur en matières azotées totales ($MAT = N \times 6,25$) du fourrage et ce d'autant plus que la perte de feuilles et le lessivage sont importants. La diminution de la teneur en MAT, faible pour les foins séchés en grange, est donc plus prononcée pour les foins ayant reçus de la pluie et pour les légumineuses (Figure 3a).

La conservation en ensilage ne modifie pas ou très peu la teneur en MAT du fourrage, mais modifie considérablement la nature des constituants azotés (DEMARQUILLY *et al.*, 1998), avec la formation des produits de dégradation des protéines. Il en résulte la formation d'ammoniac (NH_3) et une augmentation importante de la proportion d'azote soluble qui est rarement inférieure à 50% de l'N total et qui peut atteindre 80% dans les ensilages mal conservés. Le préfanage ne réduit pas la protéolyse car celle-ci commence lors de la phase de séchage au champ sous l'action des enzymes de la plante. En revanche, les quantités d'azote soluble sont réduites dans les ensilages mi-fanés (BAUMONT *et al.*, 2007b).

FIGURE 3 – Conséquences des différentes techniques de conservation sur les teneurs en matières azotées totales (a) et sur la dégradabilité des matières azotées dans le rumen (b) (données issues de BAUMONT *et al.*, 2007a pour le ray-grass anglais récolté au 1^{er} cycle).



Aucun procédé de conservation ne peut éviter les pertes en acides aminés (AA), les techniques qui traitent directement l'herbe étant celles qui limitent ces pertes au maximum (ARRIGO, 2006). Le séchage en grange, qui respecte au mieux le fourrage, s'avère le moins pénalisant. Les pertes en acides aminés sont plus élevées pour les fourrages jeunes du fait de teneurs plus élevées en AA exprimées par unité de MS (AA_{MS}) et varient d'un type de conservation à l'autre et d'un acide aminé à l'autre. Les pertes les plus marquées se retrouvent dans les fourrages séchés au champ (-14% d' AA_{MS} par rapport à l'herbe d'origine au stade précoce) et les ensilages préfanés à 30% de matière sèche (-11% d' AA_{MS} par rapport à l'herbe) ; ces réductions des teneurs en acides aminés

s'expliquent par la perte des feuilles lors du fanage et par la protéolyse intervenant durant la phase de préfanage et dans le silo. Parmi les conserves humides, l'ensilage à 30% MS entraîne davantage de dégradation des AA_{MS} que l'ensilage à 50% de MS (-11% vs -6%) et ceci autant dans les fourrages précoces que tardifs (30 jours plus âgés, valeurs entre parenthèses), notamment pour l'arginine -54% (-47%), la cystine -38% (-11%), l'acide glutaminique -33% (-33%), la tyrosine -24% (-36%) et la lysine 22% (-8%). Dans le fourrage jeune, la lysine est l'acide aminé le plus sensible, les processus par séchage la dégradant de 30% et les ensilages d'environ 20%. La méthionine, la phénylalanine, la leucine sont les acides aminés les moins influencés par le mode de conservation.

L'influence des techniques de conservation sur la **dégradabilité de l'azote dans le rumen (DT_N)** a pu être étudiée en adaptant la technique de mesure par la méthode des sachets de nylon de façon à pouvoir y introduire le fourrage frais ou conservé sans le sécher et par conséquent sans modifier la nature de l'azote (DULPHY *et al.*, 1999). Les écarts de DT_N ainsi quantifiés par rapport au fourrage vert correspondant (NOZIÈRES *et al.*, 2007) montrent que **l'ensilage en coupe directe sans conservateur augmente la DT_N de 8 points en moyenne**, que la DT_N des ensilages réalisés en coupe directe avec conservateur et des ensilages préfanés est augmentée de 5 points en moyenne, que **la DT_N des ensilages mi-fanés est en moyenne proche de celle du fourrage vert**, et que **la DT_N des foin est diminuée** de 6 à 8 points pour les graminées et de 8 à 10 points pour les légumineuses (Figure 3b).

La valeur azotée des ensilages réalisés en coupe directe est fortement diminuée par rapport à celle du fourrage vert (DEMARQUILLY *et al.*, 1998). L'augmentation de la DT_N a pour conséquence de diminuer la teneur en protéines digestibles dans l'intestin d'origine alimentaire (PDIA), diminution qui s'ajoute à celle des protéines digestibles dans l'intestin d'origine microbienne permises par l'énergie fermentescible (PDIME) du fait que les produits de fermentation des ensilages ne fournissent quasiment pas d'énergie aux microbes du rumen (1/4 de l'énergie des sucres pour l'acide lactique et rien pour les AGV et les alcools). L'utilisation d'un conservateur pour les ensilages réalisés en coupe directe, le préfanage et encore plus le mi-fanage permettent donc de limiter la diminution de la valeur PDIE des fourrages ensilés, en limitant l'augmentation de la DT_N et en réduisant la quantité de produits de fermentation. Le fanage modifie la valeur azotée du fourrage en proportion de la modification de sa teneur en MAT, sauf dans le cas des foin ayant subi un échauffement pour lesquels la digestibilité des matières azotées peut être fortement réduite du fait de la formation de complexes indigestibles associant les protéines aux parois végétales. En l'absence d'échauffement, le fanage augmente légèrement la valeur PDIA du fait de la diminution de la DT_N, mais cette augmentation est compensée par une diminution des protéines digestibles dans l'intestin d'origine microbienne permises par l'azote dégradable (PDIMN). Le fanage respecte l'équilibre entre les valeurs PDIN et PDIE du fourrage vert de départ (BAUMONT *et al.*, 2007a).

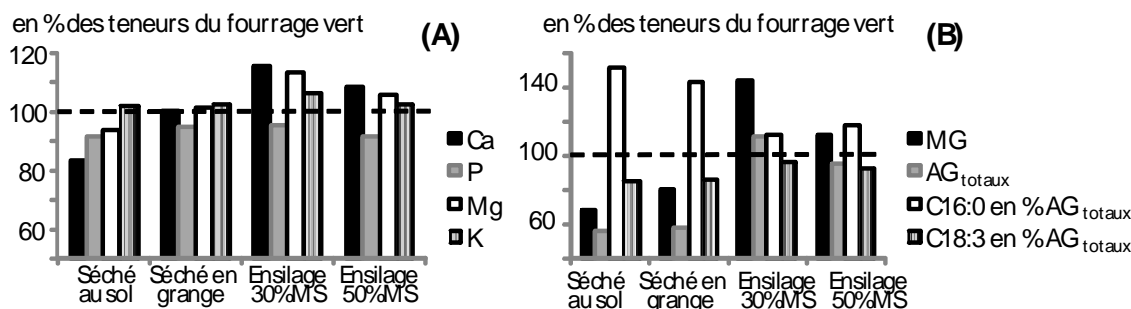
2.4. Les minéraux

Le mode de conservation joue un rôle moins important que celui du cycle ou de la composition botanique sur la teneur en minéraux, du moins **tant que les fourrages sont récoltés dans de bonnes conditions**. Des machines mal réglées risquent d'apporter de la terre, ce qui n'est pas souhaitable dans le fourrage conservé. MESCHY *et al.*, 2005 ont analysé l'effet du mode de conservation des fourrages sur leur composition en éléments minéraux majeurs et ont proposé des équations de passage par élément et par mode de conservation. A l'exception du sodium qui ne varie pas significativement, les teneurs sont inférieures en moyenne de 15 à 20% dans les foin séchés au sol par rapport au fourrage vert correspondant : cette diminution est plus marquée pour le calcium (Ca) que pour le phosphore (P). Pour les ensilages, le mode de fermentation (ensilage avec ou sans conservateur ou enrubannage) est sans effet significatif sur l'évolution de la composition minérale. La fermentation des fourrages entraîne une diminution de l'ordre de 15% pour P ; la teneur en Ca des graminées est peu affectée ; elle peut même augmenter légèrement, mais celle des légumineuses diminue de 15 à 20% lors du processus d'ensilage.

Ces résultats convergent avec ceux obtenus en Suisse par ARRIGO (2007). Tous cycles et tous stades confondus, le mode de conservation n'affecte pas significativement les teneurs en P, en magnésium (Mg) ou en potasse (K) ; seule la teneur en Ca est significativement réduite par le séchage au sol par rapport aux autres modes de conservation moins mécanisés comme le séchage en grange et l'ensilage préfané à 30% MS (4,6 vs. 6,7 à 6,9 g/kg MS, Figure 4a). C'est la teneur en Ca qui varie le plus par rapport au fourrage vert de départ, de -17% pour le séchage au sol à +17%

pour l'ensilage préfané à 30% de MS. Pour Mg, les pertes oscillent entre -6 et -9%, alors que la teneur en K varie comme celle en Ca, mais avec une amplitude moins prononcée, -8% pour le séchage au sol et +11% pour l'ensilage à 30% MS. Les pertes plus importantes pour les foins séchés au sol et pour les légumineuses peuvent s'expliquer par les effets conjugués de la perte de feuilles lors des travaux de fanage, les concentrations en minéraux étant plus élevées dans les feuilles que dans les tiges (MESCHY et GUÉGEN, 1995), et des pertes par lessivage des minéraux hydrosolubles.

FIGURE 4 – Effets de différentes techniques de conservation sur les teneurs en principaux minéraux (A) et sur les constituants lipidiques (B) du fourrage (données issues de ARRIGO, 2007 et 2010).



2.5. Les matières grasses

La teneur en matières grasses totales (extrait étheré, MG) du fourrage varie fortement avec la composition botanique et le stade de développement des plantes. **La conservation réduit la teneur en matières grasses de l'herbe d'origine** (MOREL *et al.*, 2006 ; ARRIGO, 2010), à l'exception de l'ensilage préfané (Figure 4b). L'augmentation de la teneur en MG dans l'ensilage préfané à 30% MS par rapport à celle de l'herbe d'origine peut s'expliquer par la perte de nutriments hydrosolubles dans les jus de silo ou les produits fermentaires, concentrant ainsi la matière grasse dans l'ensilage. C'est le fourrage séché au sol qui accuse les plus grandes pertes en matières grasses par rapport à l'herbe d'origine, celles-ci pouvant atteindre 30% dans les fourrages jeunes.

Le mode de conservation joue également sur la **teneur et sur la composition en acides gras totaux (AG)** des fourrages (MORAND-FEHR et TRAN, 2001 ; DOREAU *et al.*, 2005). Ainsi, **le fanage diminue fortement la teneur en acides gras** (ARRIGO, 2010 ; GLASSER *et al.*, non publié), jusqu'à 40% pour le séchage au sol, **alors que celle-ci est maintenue dans les fourrages ensilés** (Figure 4b). L'analyse de données de la littérature (GLASSER *et al.*, non publié) et les essais de ARRIGO (2010) et de PORTELLI *et al.* à l'INRA de Theix (non publié) montrent que, toutes espèces confondues, le séchage se traduit, par rapport au frais, par une baisse relative du C18:3 et par une augmentation importante des proportions en C16:0, C18:0, C18:1 dans les AG totaux (Figure 4b). Ces variations résulteraient des effets combinés de la perte de feuilles au cours du séchage et de phénomènes d'oxydation des AG polyinsaturés (MOLLOY *et al.*, 1974). Afin de sauvegarder les teneurs en lipides et en acides gras insaturés (C18:3) de l'herbe, le fanage doit être réalisé rapidement tout en ménageant le fourrage pour conserver les nutriments contenus dans les feuilles.

2.6. Les micronutriments

Les teneurs en différentes vitamines des fourrages verts et conservés sont très variables selon la nature des plantes et le mode de conservation (BALLET *et al.*, 2000). Si les teneurs en vitamines du fourrage vert sont généralement conservées dans les fourrages déshydratés, une réduction plus ou moins importante peut être observée avec les autres modes de conservation. Les teneurs en α -tocophérol (vitamine E) et en β -carotène (pro-vitamine A), des micronutriments qui ont un rôle bénéfique sur la santé humaine, sont généralement plus faibles dans le foin que dans l'ensilage. En effet, alors que la chaleur et les radiations ultra-violettes détruisent ces micronutriments par oxydation, une conservation bien menée par la voie humide semble les préserver (MÜLLER *et al.*, 2007). Cependant, les rayonnements ultra-violettes peuvent être favorables puisqu'ils permettent la conversion des stérols en vitamine D. La thiamine (vitamine B1) semble presque totalement disparaître lors du processus d'ensilage (BALLET *et al.*, 2000).

3. Les clés pour minimiser les pertes et maintenir une valeur alimentaire élevée des fourrages conservés pour les animaux

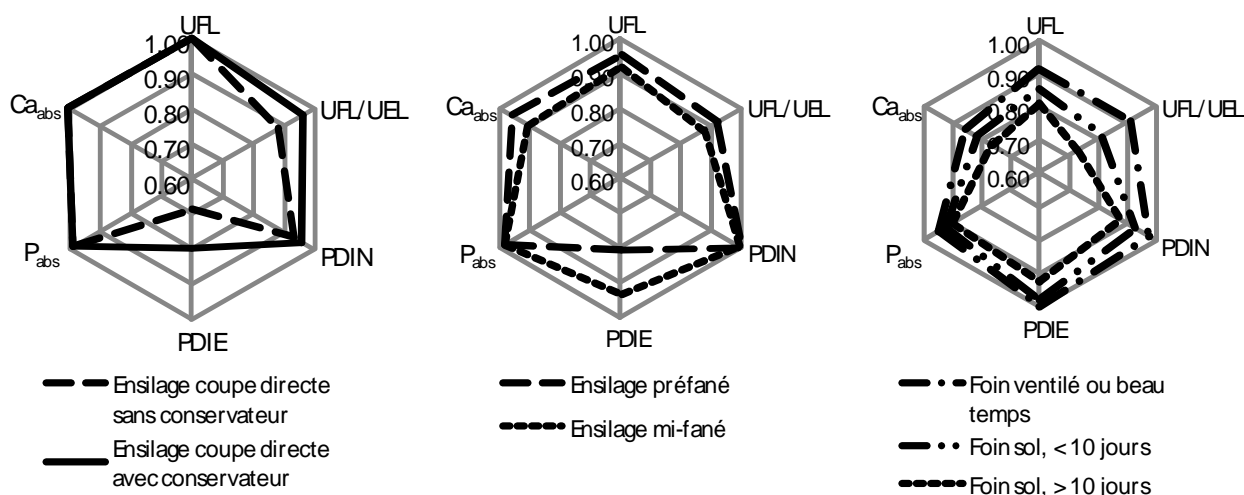
3.1. Sécher rapidement et maintenir l'intégrité des plantes au cours du fanage

Maintenir la valeur alimentaire la plus proche possible de celle du fourrage vert de départ au cours du fanage suppose que deux conditions principales soient remplies : la durée du séchage doit être la plus courte possible et les opérations mécaniques doivent endommager le moins possible la partie feuillue du fourrage. Ces conditions s'appliquent à la phase de préfanage des fourrages ensilés et a *fortiori* pour les foins. En effet, plus le séchage sera long et plus les pertes par respiration et, s'il pleut, par lessivage seront importantes ; plus les pertes de feuilles seront importantes, plus la valeur du fourrage en sera diminuée.

Pour la conservation en foin, c'est le **séchage par ventilation d'un fourrage ayant atteint rapidement 50-55% de MS** qui **permet d'obtenir les meilleurs résultats** (VIGNAU-LOUSTAU et HUYGHE, 2008). En réduisant considérablement la durée de la respiration entre la fauche et la mort de la plante, cette technique permet de limiter les pertes de valeur énergétique et de densité énergétique du fourrage à 10%, de maintenir la valeur azotée très proche de celle du fourrage vert initial, et de minimiser également les pertes en minéraux et en AG (Figure 5). Le séchage en grange connaît un regain d'intérêt en particulier du fait de l'interdiction des fourrages fermentés dans certains cahiers des charges d'AOP fromagères et de l'apparition de nouveaux équipements permettant d'utiliser l'énergie solaire et la technique de déshumidification. En diminuant la dépendance au climat, le séchage en grange permet en outre d'avancer les dates de récolte par rapport aux foins séchés au sol ce qui contribue également à la réalisation de fourrages de bonne valeur alimentaire. Les conditions techniques de sa réussite ont fait l'objet d'études récentes et sont maintenant bien documentées (VIGNAU-LOUSTAU et HUYGHE, 2008 ; PÔLE AOC MASSIF CENTRAL, 2008 ; SEGRAFO *et al.*, 2008). De plus le séchage par ventilation permet de limiter les pertes totales de la MS récoltée à 10-20%, alors que celles-ci peuvent excéder 30% dans le cas de séchage au sol par mauvais temps.

Pour les **foins séchés au sol**, il est impératif que le fourrage ait atteint **une teneur en MS supérieure à 80% avant d'être pressé** pour éviter les échauffements excessifs. Lorsque les conditions climatiques sont défavorables, la technique de **l'enrubannage permet de limiter les pertes en récoltant à 60-70% de MS** un fourrage qui aurait subi des pertes supplémentaires avant d'atteindre la teneur en MS du foin, voire qui aurait été pressé à une teneur en MS insuffisante. Si l'enrubannage n'est pas possible, l'utilisation de **conservateurs pour foin**, l'acide propionique ou le propionate d'ammonium en particulier dont l'efficacité a été discutée (ZWAENEOEL *et al.*, 1987), connaît un regain d'intérêt (BAUMONT *et al.*, 2011).

FIGURE 5 – Effets combinés des techniques de conservation sur les principales composantes de la valeur alimentaire du fourrage conservé par rapport à celle du fourrage vert de départ (données issues de BAUMONT *et al.*, 2007b, pour le ray-grass anglais récolté au stade épiaison).



3.2. Minimiser les produits de fermentation et la solubilisation de l'azote dans les fourrages ensilés

Si les techniques d'ensilage permettent de maintenir la valeur énergétique du fourrage vert initial, leur principal problème réside dans la diminution importante de l'ingestion lorsque les produits des fermentations secondaires (AGV, amines) sont présents en grande quantité, et dans la diminution importante de la valeur azotée du fait également des produits de fermentation et de la DT_N trop élevée (Figure 5). Une bonne qualité de conservation des fourrages suppose que la quantité d'azote ammoniacal soit inférieure à 5% de l'azote total, la quantité de N soluble inférieure à 50% de N total, la quantité d'acide acétique à 25 g par kg de MS, et que les acides propionique et butyrique ne soient présents qu'à l'état de traces (DEMARQUILLY *et al.*, 1998). Les caractéristiques fermentaires moyennes permettant une conservation correcte pour les principaux types d'ensilages ont été récapitulées (BAUMONT *et al.*, 2007b).

Pour les **ensilages réalisés en coupe directe**, obtenir une bonne qualité de conservation **nécessite une acidification rapide et suffisante** du milieu. Une acidification rapide permet aussi de réduire la solubilisation des protéines et leur dégradabilité dans le rumen. Elle s'obtient généralement facilement avec l'ensilage de maïs. L'acidification est plus lente avec les ensilages d'herbe comme le ray-grass et se révèle souvent insuffisante avec des espèces fourragères dont la teneur en glucides solubles est inférieure à 10% de la matière sèche. La recherche d'agents chimiques et biologiques pour pallier l'insuffisance de la fermentation lactique naturelle a fait l'objet de nombreux travaux et **l'addition d'un conservateur acide** (acide formique, par exemple) reste la solution la plus efficace qui constitue la référence (ANDRIEU et DEMARQUILLY, 1998 ; VIGNAU-LOUSTAU et HUYGHE, 2008). L'accélération de la fermentation lactique naturelle peut aussi être obtenue par l'addition de **ferments lactiques**. Les développements les plus récents permettent de disposer de souches de bactéries hétérofermentaires sélectionnées (e.g. *Lactobacillus buchneri*) assurant à la fois la production d'acide lactique et de composés organiques qui inhibent le développement des levures et des moisissures lors de la rupture de l'anaérobiose au désilage, améliorant ainsi la stabilité aérobie des ensilages (DRIEHUIS *et al.*, 1999). L'efficacité des conservateurs biologiques a été montrée sous réserve qu'ils apportent au moins 5.10^5 bactéries lactiques par g de fourrage vert et que le fourrage contienne au moins 11% de glucides solubles (ANDRIEU et DEMARQUILLY, 1998).

Augmenter la teneur de la masse ensilée **en glucides solubles** constitue également un moyen d'améliorer la qualité de conservation. Le développement de variétés de ray-grass anglais sélectionnées sur la base de leur teneur élevée en glucides solubles (HUMPHREYS, 1989) permet de disposer de fourrage maximisant la conversion en acide lactique et de conserver une quantité résiduelle appréciable de glucides solubles dans les ensilages (DAVIES *et al.*, 2002). En plus d'optimiser la qualité des ensilages d'herbe, cette énergie rapidement fermentescible permettrait d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote dans le rumen des animaux (MERRY *et al.*, 2006). Signalons que, parmi les légumineuses, des teneurs en glucides solubles élevées ont été mesurées dans le sainfoin (15% vs 7% et 11% dans la luzerne et le trèfle violet, NIDERKORN *et al.*, 2011). L'addition de mélasse ou de céréales constitue aussi un moyen de fournir plus de glucides solubles à la flore de l'ensilage (VIGNAU-LOUSTAU et HUYGHE, 2008).

Une autre façon d'obtenir des ensilages bien conservés, et qui évite l'utilisation de conservateurs, est **d'élever la teneur en MS du fourrage** avant sa mise en silo. Un ressuyage du fourrage à 25% de MS et un préfanage à 30% de MS permettent de réduire les phénomènes fermentaires dans l'ensilage puisque celui-ci sera stabilisé à un pH plus élevé. Ainsi, le préfanage permet généralement d'éviter d'utiliser un conservateur. Ces pratiques, de plus en plus répandues, permettent d'obtenir un ensilage de bonne ingestibilité. Toutefois, pour réduire significativement la dégradabilité de l'azote, le **fanage jusqu'à 40-50% de MS** est nécessaire. Les bénéfices du préfanage sur l'ingestibilité et la valeur azotée sont largement supérieurs aux légères pertes de valeur énergétique qu'il entraîne. Le préfanage permet de plus de réduire les pertes totales de MS en réduisant les pertes gazeuses et en supprimant les pertes sous forme de jus. Sa réalisation nécessite cependant un suivi précis de la teneur en MS qui peut évoluer rapidement au champ en quelques heures. Pour cela, une technique de mesure rapide de la teneur en MS par micro-onde est disponible (ITEB, 1991). Enfin, rappelons que le tassage des ensilages récoltés à des teneurs en MS élevées (herbe préfanée et maïs) nécessite plus de soin pour chasser au maximum l'air présent dans le fourrage que pour les ensilages récoltés à des teneurs en matière sèche plus faibles.

Conclusion

Les processus mis en jeu et les conséquences des différentes techniques de conservation sur la valeur alimentaire des fourrages sont désormais bien connus pour les principaux paramètres de la valeur alimentaire et pour les fourrages classiques. Ils ont pu faire l'objet de relations quantifiées et utilisées pour prévoir leur valeur. En résumé, on peut retenir que, pour les fourrages fanés, la rapidité du séchage et la conservation des parties feuillues sont les clés pour maintenir la valeur alimentaire la plus proche possible de celle du fourrage vert. Pour les fourrages fermentés, la clé réside dans l'acidification suffisante et rapide du milieu afin de minimiser la formation des produits de fermentation, en particulier les acides gras volatils, et de limiter la solubilisation de l'azote. Le préfanage, en amenant l'herbe à une teneur en MS de 30% minimum, constitue le moyen le plus sûr d'obtenir un ensilage bien conservé et de bonne valeur alimentaire sans utiliser de conservateur. Les conséquences des différentes techniques de conservation sur les composés d'intérêt pour la qualité des produits et la santé (acides gras, micronutriments, acides aminés) restent à mieux préciser.

Au niveau du matériel végétal, des pistes sont à explorer pour améliorer la qualité des fourrages conservés et **mieux prendre en compte l'aptitude à la conservation dans l'élaboration des prairies multispécifiques et des mélanges fourragers**. Pour les fourrages ensilés, les pistes de progrès résident dans l'utilisation de plantes riches en glucides solubles et de plantes contenant des composés du métabolisme secondaire pouvant réduire la solubilisation de l'azote, comme les tanins présents dans certaines légumineuses (sainfoin par exemple) et la polyphénol-oxydase du trèfle violet. En effet, la conservation en ensilage de certaines plantes comme la luzerne demeure difficile et constitue sans doute un frein à son développement. Ces pistes rejoignent également qui portent sur l'intérêt de ces composés secondaires pour la digestion et l'ingestion chez les ruminants (BAUMONT *et al.*, 2008). Pour les fourrages fanés, peu de travaux ont été réalisés pour améliorer l'aptitude à la dessiccation des plantes fourragères. Par ailleurs, les références disponibles sur la valeur des ensilages de sorgho, de céréales immatures et des associations de céréales et de légumineuses ou de protéagineux sont encore insuffisantes pour évaluer et prévoir correctement leur valeur. La prévision de la valeur des ensilages réalisés à partir de plantes contenant de l'amidon en grande quantité (maïs principalement) reste encore peu précise, et l'effet de l'ensilage sur le devenir des fractions amylacées et pariétales dans le rumen reste mal connu.

Contrairement à ce que la Révolution fourragère avait pu faire penser, les techniques de conservation par séchage ne sont pas dépassées. **Pour les systèmes d'élevage dont les animaux sont modérément exigeants**, comme les systèmes allaitants, **le foin séché au sol** reste largement pratiqué et l'apparition des **fourrages mi-fanés et enrubannés** constitue une technique très intéressante permettant de récolter des fourrages de densité énergétique suffisante et ne présentant pas le déficit de valeur azotée des ensilages en coupe directe. De plus, la souplesse de réalisation de cette technique explique son développement rapide et massif dans ces systèmes. **Pour les systèmes laitiers, le séchage par ventilation ou la déshumidification** constituent des techniques **permettant d'obtenir des fourrages de valeur alimentaire très intéressante**, en particulier pour les systèmes d'AOP fromagères dans lesquels la maximisation de la performance individuelle n'est pas le premier objectif et l'interdiction des fourrages fermentés a tendance à se généraliser. Néanmoins, son développement reste freiné par le coût d'investissement des installations de séchage, et la problématique des conservateurs pour foin pourrait connaître un nouvel intérêt.

Remerciements – Les auteurs tiennent à remercier Frédéric Glasser et Josiane Portelli pour les données communiquées sur les teneurs en acides gras des fourrages, et Jocelyne Aufrère pour la fourniture de certains documents bibliographiques.

Références bibliographiques

- ABREU A., CARULLA J.E., LASCANO C.E., DIAZ T.E., KREUZER M., HESS H.D. (2004) : "Effects of Sapindus saponaria fruits on ruminal fermentation and duodenal nitrogen flow of sheep fed a tropical grass diet with and without legume", *Journal of animal science*, 82, 1392.
- AFPF (1973) : "L'ensilage d'herbe, Revue Fourrages, numéro 56.
- ANDRIEU J., BAUMONT R. (2000) : "Digestibilité et Ingestibilité du Maïs Fourrage : Facteurs de Variation et Prévision", *Fourrages*, 163, 239-252.
- ANDRIEU J.P., DEMARQUILLY C. (1998) : "Efficacité des conservateurs biologiques d'ensilage : résultats d'essais d'homologation", *Fourrages*, 155, 377-382.
- ANDRIEU J., DEMARQUILLY C., SAUVANT D. (1988) : "Tables de la valeur nutritive des aliments", *Alimentation des Bovins, Ovins et Caprins*, R. Jarrige éd., INRA Editions, Paris, pp. 356-464.
- ARRIGO Y. (2006) : "Influence du cycle, du stade et du mode de conservation sur la teneur en acides aminés des fourrages", *Revue suisse Agric.*, 38(5), 247-252
- ARRIGO Y. (2007) : "Influence du mode de conservation, du cycle et du stade sur la digestibilité et les teneurs en minéraux de l'herbe", *Revue suisse Agric.*, 39(4), 193-198.
- ARRIGO Y. (2010) : "Matière grasse et composition en acides gras des fourrages conservés", *Recherche agronomique Suisse*, 1 (10), 366-371
- BALLET, N., ROBERT, J.C., WILLIAMS, P.E.V. (2000) : ""Vitamins in forages", *Forage Evaluation in Ruminant Nutrition*, D.I. Givens, E. Owen, R.F.E. Axford et H.M. Omed eds, CABI publishing, pp. 399-431.
- BAUMONT R., DULPHY J.P., DOREAU M., PEYRAUD J.L., NOZIÈRES M.O., ANDUEZA D. MESCHY F. (2005) : "La valeur des fourrages pour les ruminants : comment synthétiser et diffuser les nouvelles connaissances, comment répondre aux nouvelles questions ?", *Rencontres Recherches Ruminants*, 12, 85-92
- BAUMONT R., DULPHY J.P., SAUVANT D., MESCHY F., AUFRÈRE J., PEYRAUD J.L. (2007a) : "Chapitre 8. Valeur alimentaire des fourrages et des matières premières : tables et prévision", *Alimentation des bovins, ovins et caprins, Tables INRA 2007*, Editions Quae, pp. 149-179.
- BAUMONT R., DULPHY J.P., SAUVANT D., TRAN G., MESCHY F., AUFRÈRE J., PEYRAUD J.L., CHAMPICIAUX P. (2007b) : "Chapitre 9. Les tables de la valeur des aliments", *Alimentation des bovins, ovins et caprins, Tables INRA 2007*, Editions Quae, pp. 181-275.
- BAUMONT, R., AUFRÈRE, J., NIDERKORN, V., ANDUEZA, D., SURAULT, F., PECCATTE, J.R., DELABY, L., PELLETIER, P. (2008) : "La diversité spécifique dans le fourrage : conséquences sur la valeur alimentaire", *Fourrages*, 194, 189-206.
- BAUMONT R., AUFRÈRE J. ET MESCHY F. (2009) : "La valeur alimentaire des fourrages : rôle des pratiques de culture, de récolte et de conservation", *Fourrages*, 198, 153-173.
- BAUMONT B., COUHERT J.P., JALLAT J. (2011) : "Réalisation de foin précoce traité à l'acide propionique", *Journées AFPF Récolte et valorisation des fourrages conservés*, cet ouvrage.
- BÉRANGER. C. (1998) : "Récolter et conserver l'herbe. Un bref historique", *Fourrages*, 155, 275-286.
- BRADY C.J. (1960) : "Redistribution of nitrogen in grass and leguminous fodder plants during wilting and ensilage", *J. Sci Food Agric.*, 11, May, 276-284.
- CABRERA ESTRADA I., DELAGARDE R., FAVERDIN P., PEYRAUD J.L. (2004) : "Dry matter intake and eating rate of grass by dairy cows is restricted by internal, but not external water", *Animal Feed Science and Technology*, 114, 59-74.
- CHIOFALO V., DULPHY J.P., BAUMONT R. (1992) : "Influence of the method of forage conservation on feeding behaviour, intake and characteristics of reticulo-rumen content, in sheep fed ad libitum", *Reproduction Nutrition Développement*, 32, 377-392.
- DAVIES, D.R., LEEMANS D.K., MERRY R.J. (2002) : "Improving silage quality by ensiling perennial ryegrasses high in water soluble carbohydrate content, either with or without different additives", *13th Int. Silage Conf.*, L.M. Gechie et C. Thomas ed., SAC, Auchincruive, UK., p. 386.
- DE BRABENDER D.L., DE BOEVER J.L., BUYSSE F.X. (1990) : "The quality and utilization of maize silage for dairy cattle", *Conference British maize growers association*, Maidenhead, U.K., 8 March 1990.
- DEMARQUILLY C. (1987) : "La fenaison: evolution de la plante au champ entre la fauche et la récolte. Perte d'eau, métabolisme, modifications de la composition morphologique et chimique", *Les fourrages secs : récolte, traitement, utilisation*, C. Demarquilly éd., INRA Editions, Paris, pp. 23-46.
- 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.
- DOREAU M., LEE M.R.F., UEDA K., SCOLLAN N.D. (2005) : "Métabolisme ruminal et digestibilité des acides gras des fourrages", *Rencontres Recherches Ruminants*, 12, 101-104.

- DRIEHUIS F., ELFERINK S., SPOELSTRA S.F. (1999) : "Anaerobic lactic acid degradation during ensilage of whole crop maize inoculated with *Lactobacillus buchneri* inhibits yeast growth and improves aerobic stability", *Journal of applied microbiology*, 87, 583-594.
- DULPHY J.P., DEMARQUILLY C., BAUMONT R., JAILLER M., L'HOTELIER L., DRAGOMIR C. (1999) : "Study of modes of preparation of fresh and conserved forages for measurement of their dry matter and nitrogen degradations in the rumen", *Annales de Zootechnie*, 48, 275-288.
- GREENHILL W.L. (1959) : "The respiration drift of harvested pasture plants during drying", *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 10, 495-501.
- HOPKINS W.G. (2003) : "Respiration cellulaire: récupération de l'énergie des photoassimilats", *Physiologie végétale*, De Boeck Université, pp. 235-253.
- HUMPHREYS M.O. (1989) : "Water-soluble carbohydrates in perennial ryegrass breeding. II. Cultivar and hybrid progeny performance in cut plots", *Grass and Forage Science*, 44, 237-244.
- ITEB (1991) : *Détermination du taux de matière sèche des fourrages avec un four à micro-ondes*, Publication occasionnelle de l'Institut Technique de l'Élevage Bovin (maintenant Institut de l'Élevage), Paris, 4p.
- JARRIGE R., GRENET E., DEMARQUILLY C., BESLE J.M. (1995) : "Les constituants de l'appareil végétatif des plantes fourragères", *Nutrition des ruminants domestiques, ingestion et digestion*, R. Jarrige, Y. Ruckebusch, C. Demarquilly, M.H. Farce, M. Journet éd., INRA Edition, Paris, 25-71.
- JONES L., PRICKET J. (1981) : "The effect of stage of growth on the rate of drying of cut grass at 20°C", *Grass and Forage Science*, 36, 17-23.
- KUNG J.R.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", *Journal of Dairy Science*, 93, 1770-1773
- LECONTE D., SIMON J.C., STILMANT D. (2008) : "Diversité botanique et aptitude au séchage en conditions contrôlées", *Journées AFPP, Intérêt des prairies multispécifiques*, 26-27 mars 2008, Paris, pp198-199.
- LEE M.R.F., SCOTT M.B., TWEED J.K.S., MINCHIN F.R., DAVIES D.R. (2008) : "Effects of polyphenol oxidase on lipolysis and proteolysis of red clover silage with and without a silage inoculant (*Lactobacillus plantarum* L54)", *Animal Feed Science and Technology*, 144, 125-136.
- MCDONALD P. (1981) : "Clostridia", *The Biochemistry of Silage*, P. McDonald ed., John Wiley & Sons, 77-90.
- MC PHERSON H. T. (1952) : "Changes in nitrogen distribution in crop conservation. Protein breakdown during wilting", *J. Sci Food Agric.*, 3, August, 365-367.
- MERRY R.J., LEE M.R.F., DAVIES D.R., DEWHURST R.J., MOORBY J.M., SCOLLAN N.D., THEODOROU M.K. (2006) : "Effects of high-sugar ryegrass silage and mixtures with red clover silage on ruminant digestion. 1. In vitro and in vivo studies of nitrogen utilization", *Journal of animal science*, 84, 3049-3060.
- MESCHY F., GUÉGUEN L. (1995) : "Ingestion et absorption des éléments minéraux majeurs", *Nutrition des ruminants domestiques*, INRA, Paris, 722-758.
- MESCHY F., BAUMONT R., DULPHY J.P., NOZIÈRES M.O. (2005) : "Effet du mode de conservation sur la composition en éléments minéraux majeurs des fourrages", *Rencontres Recherches Ruminants*, 12, 116
- MOLLOY L.F., GILTRAP D.J., WYNNE COLLIE T., METSON A.J. (1974) : "Degradation of higher fatty acids in perennial ryegrass and white clover following drying and storage", *Journal of Science of Food and Agriculture*, 25, 595-606.
- MORAND-FEHR P., TRAN G. (2001) : "La fraction lipidique des aliments et les corps gras utilisés en alimentation animale", *INRA Productions Animales*, 14, 285-302.
- MOREL I., WYSS U., COLLOMB M., BÜTIKOFER U. (2006) : "Influence de la composition botanique de l'herbe ou du foin sur la composition du lait", *Revue suisse Agric.*, 38 (1), 9-15.
- MÜLLER C.E., MÖLLER J., JENSEN S.K., UDÉN P. (2007) : "Tocopherol and carotenoid levels in baled silage and haylage in relation to horse requirements", *Animal Feed Science and Technology*, 137, 182-197.
- NIDERKORN V., BAUMONT R. (2009) : "Associative effects between forages on feed intake and digestion in ruminants", *Animal*, 3, 951-960.
- NIDERKORN V., BOUDRA H., MORGAVI D.P. (2007) : "Les fusariotoxines: comment limiter leur présence dans les ensilages et leur impact chez les ruminants ? ", *Fourrages*, 111-123.
- NIDERKORN V., BAUMONT R., LE MORVAN A., MACHEBOEUF D. (2011) : "Occurrence of associative effects between grasses and legumes in binary mixtures on in vitro rumen fermentation characteristics", *Journal of Animal Science*, in press.
- NOZIÈRES M.O., DULPHY J.P., PEYRAUD J.L., PONCET C., BAUMONT R. (2007) : "La valeur azotée des fourrages. Nouvelles estimations de la dégradabilité des protéines dans le rumen et de la digestibilité réelle des protéines alimentaires dans l'intestin grêle : conséquences sur les valeurs PDI", *Productions Animales*, 20, 109-118.
- PÔLE AOC MASSIF CENTRAL (2008) : *Le séchage en grange du foin conditionné en grosses bottes*, 97p.

- SAUVANT D., PEYRAUD J.L. (2010) : "Calculs de ration et évaluation du risque d'acidose", *INRA Productions Animales*, 23, 333-342.
- SEGRAFO, RÉSEAUX D'ÉLEVAGE, CHAMBRE RÉGIONALE D'AGRICULTURE DE NORMANDIE, INSTITUT DE L'ÉLEVAGE (2008) : *Sécher du foin en grange pour récolter le meilleur de l'herbe*, octobre 2008, 8 pages
- THEODORIDOU K., AUFRÈRE J., ANDUEZA D., LE MORVAN A., PICARD F., POURRAT P., BAUMONT R. (2011) : "Effects of condensed tannins in wrapped silage bales of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) on *in vivo* and *in situ* digestion in sheep", *Animal*, in revision.
- VAN OS M., DULPHY J.P., BAUMONT R. (1995a) : "The effect of protein degradation products in grass silages on feed intake and intake behaviour in sheep", *British Journal of Nutrition*, 73, 51-64.
- VAN OS M., DULPHY J.P., BAUMONT R. (1995b) : "The influence of ammonia and amines on grass silage intake and chewing behaviour in dairy cows", *Annales de Zootechnie*, 44, 73-85.
- VÉRITÉ R., JOURNET M. (1970) : "Influence de la teneur en eau et de la déshydratation de l'herbe sur sa valeur alimentaire pour les vaches laitières", *Annales de Zootechnie*, (19, 255-268.
- VIGNAU-LOUSTAU L., HUYGHE C. (2008) : *Stratégies fourragères. Pâturage, Ensilage, Foin*, France Agricole Editions, Paris, 336 p.
- ZWAENEPOEL P., DULPHY J.P., PELHATE J., BRETON A. (1987) : "La conservation des foins humides", *Les fourrages secs : récolte, traitement, utilisation*, C. Demarquilly éd., INRA Editions, Paris, pp. 83-102.