

## Empreinte carbone de la production de luzerne déshydratée : progrès récents liés au changement des techniques de récolte et à l'incorporation de plaquettes de bois comme source d'énergie de séchage. Impact sur la qualité du fourrage produit

THIEBEAU P. (1), HAMEREL T. (2), CORSON M. (3), GABRIELLE B. (4)

(1) INRA, UMR614 INRA-URCA Fractionnement des Agro-Ressources et Environnement, F-51686 Reims Cedex 2

(2) LUZEAL, voie Chantereine, F-51520 Recy

(3) INRA UMR SAS, 65 rue de Saint-Brieuc, F-35042 Rennes Cedex

(4) INRA, AgroParisTech, UMR1091 EGC, BP01, F-78850 Thiverval-Grignon

**RESUME** - La région Champagne-Ardenne est la première région de France de culture de luzerne pure, dont l'exploitation et la valorisation sont permises par la présence d'une industrie de déshydratation. Cette industrie prend en charge la récolte de la luzerne, sa déshydratation à haute température et sa commercialisation. Les fours utilisés dans ce processus utilisent beaucoup d'énergie non-renouvelable (ENR), essentiellement d'origine fossile (charbon), riche en carbone (C), pour évaporer l'eau du fourrage. À la récolte, le préfanage à plat de la luzerne permet de gagner plus de 7 points de teneur en matière sèche pour le fourrage acheminé à l'unité de production. Ceci se traduit par une réduction de 25 % de la quantité des émissions de C liées à la déshydratation, sans incidence sur la qualité protéique par rapport à la technique du préfanage en andain. Par ailleurs, la substitution de 10 à 15 % de l'ENR par des plaquettes de bois forestières permet une réduction supplémentaire de 10 % des émissions de C non renouvelable. Le gain global est donc de 35 %. Le bilan environnemental de la production de luzerne déshydratée (LD) montre qu'elle a un bilan C excédentaire (la culture fixe plus de C atmosphérique que la production de LD n'émet de C d'origine fossile), tandis que le bilan énergétique arrive à un état proche de l'équilibre. Si de gros efforts ont été consentis ces dernières années pour réduire cette empreinte, il reste des marges de progressions à exploiter. Les efforts en ce sens doivent être poursuivis.

## Carbon footprint of dehydrated lucerne production : recent progress due to changing harvest techniques and including wood chips as an energy source for drying. Impact on harvested forage quality

THIEBEAU P. (1), HAMEREL T. (2), CORSON M. (3), GABRIELLE B. (4)

(1) INRA, UMR614 INRA-URCA Fractionnement des Agro-Ressources et Environnement, F-51686 Reims Cedex 2

**SUMMARY** - The Champagne-Ardenne region produces more lucerne than any other region of France, encouraged in large part by the presence of dehydration plants, which oversee the drying at high temperature and sale of dried lucerne pellets. The ovens used in the process use large amounts of non-renewable energy (NRE), mainly fossil fuels (coal) rich in carbon (C), to evaporate water from the forage. At harvest, pre-wilting by wide-spreading instead of swathing increases dry-matter content of the forage transported to the plant by 7 percentage points. This translates into a 25 % decrease in the amount of CO<sub>2</sub> emitted for dehydration, without any change in protein content. In addition, replacing 10-15 % of NRE with wood chips decreases CO<sub>2</sub> emissions an additional 10 %. The total decrease is therefore 35 %. The C balance of the production of dehydrated lucerne shows that this crop has a positive C impact on the environment (more atmospheric CO<sub>2</sub> fixed than fossil CO<sub>2</sub> emitted), while the energy balance is near equilibrium. Although large efforts have been made over the past 10 years to decrease this footprint, room for improvement remains. Therefore, efforts in this direction must be continued.

## INTRODUCTION

La luzerne est une plante légumineuse introduite dans les rations alimentaires des animaux pour équilibrer les apports azotés journaliers. En région d'élevage ou de polyculture-élevage, elle est cultivée en associations prairiales avec une ou plusieurs autres espèces, notamment graminées. Sa récolte s'effectue par l'animal lors d'un pâturage, ou par l'agriculteur, mécaniquement, pour une conservation sous forme d'ensilage ou de foin.

En Champagne-Ardenne, la luzerne est cultivée seule sur près de 57 000 ha (Agreste, 2010). Bien qu'il s'agisse d'une région de grandes cultures, sa production est destinée intégralement à l'alimentation animale, où elle contribue à l'autonomie protéique des élevages. Elle y est présente pour deux raisons principales : d'une part, le contexte pédo-climatique convient très bien à la croissance de cette plante (notamment le pH basique des sols), d'autre part, la présence d'une industrie régionale de déshydratation de la luzerne a besoin du maintien de cette culture pour exister (Thiébeau *et al.*, 2003). Néanmoins, le fonctionnement des fours de déshydratation, à haute

température (environ 700 °C) nécessite beaucoup d'énergie fossile (charbon, lignite), riche en C. Dans un contexte d'incitation à limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) dont le C (CO<sub>2</sub>) est le gaz de référence, et de fluctuations incessantes du prix de ces énergies, les acteurs de cette filière cherchent des solutions leur permettant de maîtriser ces émissions, voire de recourir à d'autres sources d'énergie que les énergies fossiles. En ce sens, le groupe Luzeal a testé la technique de récolte avec préfanage à plat, ainsi que la substitution d'une partie d'énergie non-renouvelable (ENR) par de la plaquette de bois forestière. Le travail présenté étudie l'impact de ces modifications, appliquées à quatre Unités de Production (UP), sur le bilan C, au sens propre (sans considérer les autres GES), et la quantité d'énergie utilisée pour produire 1 t de Luzerne Déshydratée (LD). Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que ce bilan est strictement limité à la filière de déshydratation, du semis de la luzerne à la sortie usine. Ce n'est en aucun cas une analyse du cycle de vie (ACV) de la LD. Néanmoins, ces résultats peuvent être introduits dans les bases de données permettant de

réaliser des ACV de produits de fermes d'élevage consommant de la LD.

## 1. MATERIEL ET METHODE

L'industrie testant en permanence de nouvelles voies d'amélioration, travaille sans collaboration avec le monde de la recherche : les dispositifs n'ont pas de « témoin ». Pour pallier à cette absence, nous nous appuyons sur les pratiques réalisées par 4 UP, sur plusieurs années, afin de lisser un éventuel « effet UP » et « effet campagne culturale ». Les résultats sont comparés avant et après la généralisation d'une nouvelle technique/méthode.

### 1.1. ECHANTILLON SUPPORT DE L'ETUDE

Les 4 UP du groupe Luzeal sont : Recy (UP1), St Rémy sur Bussy (UP2), Pontfaverger (UP3) et Lavannes-Bazancourt (UP4). En 2010, la surface de récolte cumulée pour chaque UP était comprise entre 11 et 15 000 ha, en 4 récoltes. Depuis 2009, leur production cumulée annuelle (180 000 t) représente plus de 20 % de la production nationale de LD, ce qui constitue un échantillon d'étude représentatif.

### 1.2. INNOVATIONS TECHNIQUES RECENTES

Ce travail s'appuie sur les campagnes de récolte de 2006-2007 (Période 1, notée P1) et 2009-2010 (Période 2, P2) : P1 correspond aux campagnes qui ont précédé les innovations. La luzerne est fauchée et mise directement en andain par la faucheuse, avant d'être ramassée par une ensileuse munie d'un pick-up (Beaudoin et Thiébeau, 2007). P1 constitue la période de référence, avant innovation.

P2 correspond aux campagnes de récolte qui permettent de mesurer l'impact des innovations : 1) Le préfanage à plat, qui consiste à faucher la luzerne en la laissant à plat sur le champ quelques heures. Elle sera reprise ensuite par un pick-up pour être placée en andain avant le passage de l'ensileuse. Cette technique a pour objectif de favoriser sa dessiccation au champ, afin de limiter le poids d'eau à évaporer en fours. 2) L'introduction de plaquettes de bois forestières dans le processus de déshydratation (30x30x10 mm) a pour objectif de substituer une partie de l'ENR fossile par une énergie « renouvelable ». Ces plaquettes sont mélangées au charbon sur le carreau de stockage des UP, avant d'être introduites dans les trémies d'alimentation des fours. P2 constitue la période appliquant ces innovations.

### 1.3. CLIMAT ET CAMPAGNES DE RECOLTE

Le stock d'eau du sol présent en sortie d'hiver, au redémarrage de la croissance de la luzerne, n'est pas un facteur limitant sa croissance au cours du premier cycle de repousse. Ceci peut ne pas être le cas pour les repousses suivantes, même si les sols de craie ont de fortes capacités de remontées d'eau par capillarité (Ballif *et al.*, 1995). Selon les modèles de croissance linéaire de cette culture (Gosse *et al.*, 1982; Coulmier 1990), la température de l'air et le rayonnement global sont les variables qui influent la croissance de la plante. Les bassins de productions des 4 UP se répartissent entre Chalons et Reims, distants de 45 km. Aucune UP n'étant dotée de station météorologique, nous avons utilisé les données de la station INRA de Chalons.

Pendant les périodes P1 et P2, le climat s'est caractérisé par une température moyenne journalière, un rayonnement global et une évapotranspiration potentielle cumulés proches. Le fait marquant concerne la pluviométrie. Pour une même durée de croissance végétative (15/03-15/10), elle a baissé entre P1 (459 mm tombés en 115 j) et P2 (354 mm tombés en 74j), impactant la production de matière sèche (MS) moyenne qui est passée de 13,7 t/ha en P1 à 11,6 t/ha en P2. Les campagnes d'exploitation de

la luzerne (qui comprennent 4 récoltes) ont débuté, quelle que soit la période considérée, lors de la dernière semaine du mois d'avril, pour une durée moyenne de 185 ±4 jours. L'intervalle entre 2 coupes a été de 47 ±1 jours.

### 1.4. ELEMENTS DES BILANS

Les termes considèrent des éléments à l'actif et au passif. L'actif du bilan carbone comprend la fixation de C atmosphérique par photosynthèse, du semis de la luzerne au terme de 2 années d'exploitation, dans la biomasse récoltée et dans celle des collets et des racines. Afin de ne pas surestimer les résultats, le stockage de C par les collets et racines a été estimé après 18 mois de dégradation dans le sol (Justes *et al.*, 2001 ; Thiébeau *et al.*, 2001). En effet, une fraction de la biomasse incorporée au sol lors de la destruction de la culture ne l'est que transitoirement : à l'issue du processus de minéralisation, une fraction oscillant entre 40 et 50% va repartir vers l'atmosphère sous forme de CO<sub>2</sub>, lié à l'activité des micro-organismes décomposant la matière organique. Dans nos estimations, nous retenons une valeur moyenne de 45%, pour évaluer la fixation nette de C par les collets et les racines.

Le passif est composé du C émis provenant de l'énergie utilisée pour le fonctionnement des fours de déshydratation (lignite, charbon, bois), ainsi que des consommations intermédiaires (CI) : carburants pour les travaux d'implantation et d'entretien pendant 2 années de culture, travaux de récolte (fauche, andainage, récolte et transport du champ à l'usine), ainsi que l'énergie électrique liée au fonctionnement des UP.

Le bilan énergétique conserve l'option d'une valorisation par un troupeau laitier retenue par Thiébeau *et al.* (2001). L'actif est composé de l'énergie contenue dans 1 t de LD ayant une teneur en protéines de 19,4 % sur produit sec (Thiébeau *et al.*, 2001), soit 0,82 Unité Fourragère Lait (UFL) par kilo de produit sec. Sachant qu'une UFL correspond à 7766 kilojoules (kJ), la valeur énergétique d'1 t de LD valorisée par ce cheptel est de 6,37 GJ.

Les éléments portés au passif sont les mêmes que ceux du bilan C, convertis en termes énergétiques (kJ/t LD).

### 1.5. QUALITE DU FOURRAGE RECOLTE

La mise en place du préfanage à plat a suscité des inquiétudes liées à l'implication d'une manipulation mécanique supplémentaire au champ, pouvant conduire à la perte de folioles de luzerne, éléments riches en protéines. C'est pourquoi nous avons comparé les résultats des analyses protéiques des luzernes récoltées par les UP sur la période d'étude.

Ce travail ayant été conduit sans traitement « témoin », nous faisons le choix de comparer les valeurs recueillies à celles estimées à partir du modèle de Coulmier (1990). Ce modèle de production de LD comporte un module d'estimation de la teneur en protéines, calculé à partir de la biomasse récoltée. Disposant des rendements en MS « usine » et des teneurs en protéines « usine », nous comparons les teneurs obtenues à celles prévues par le modèle. Ceci permet d'estimer l'impact de la nouvelle technique de récolte par rapport à celle précédemment utilisée.

### 1.6. TRAITEMENT STATISTIQUE

Les données sont acquises et exploitées UP par UP, ce qui permet d'associer une erreur standard aux moyennes présentées. Une analyse de variance est réalisée à l'aide du logiciel SigmaPlot 11.2 (Systat Software Inc., Chicago, Illinois, Etats-Unis) afin de comparer les résultats entre périodes/années. Lorsqu'un effet est globalement significatif, une comparaison de moyennes 2 à 2 est réalisée à l'aide du test t de Student ( $P < 0,05$ ), suivi d'un test de Newman-Keuls quand elles sont différentes pour

les regrouper en classe homogène (= histogrammes présentant des lettres identiques dans les figures 2 et 3).

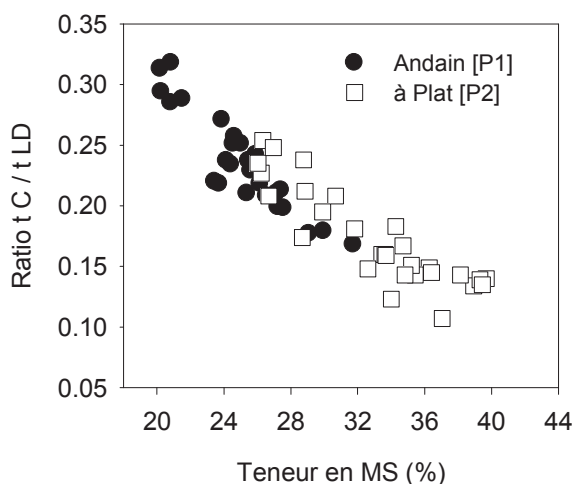
## 2. RESULTATS

### 2.1. BILAN CARBONE

A l'actif, la fixation de carbone atmosphérique atteint 533 kg/t LD en P1, et 548 kg/t LD en P2 (C immobilisé dans les granulés de LD et les résidus restitués au sol, cf 1.4.). L'analyse de variance ne montre pas de différence entre les UP ( $P=0,54$ ), tandis qu'elle montre une différence significative ( $P=0,001$ ) entre P1 et P2. Il y a absence d'interaction entre périodes d'étude et UP ( $P=0,93$ ).

Au passif, le préfanage à plat introduit une manipulation supplémentaire du fourrage au champ, qui est l'andainage. Ce passage augmente d'environ 15 % le poste « récolte » des CI nécessaires au processus de production. Néanmoins, l'ensemble des CI intervient pour moins de 4 % dans le passif du bilan C en P2 (moins de 3 % en P1). La Figure 1 montre que cette technique permet de récolter un fourrage dont la teneur en MS est significativement ( $P<0,001$ ) plus élevée en P2 ( $33,0\pm 0,8\%$ ) qu'en P1 ( $25,2\pm 0,5\%$ ). Cela impacte directement la quantité de C total nécessaire pour sécher et produire 1 t de LD. Celle-ci passe ainsi de  $235\pm 8$  kg en P1 à  $173\pm 7$  kg en P2. La réduction de C consommé est proche de 25 %.

**Figure 1** : Impact de la technique de préfanage sur la teneur en Matière Sèche (MS) du fourrage entrée usine et la quantité de C nécessaire pour déshydrater 1 t de Luzerne (LD)



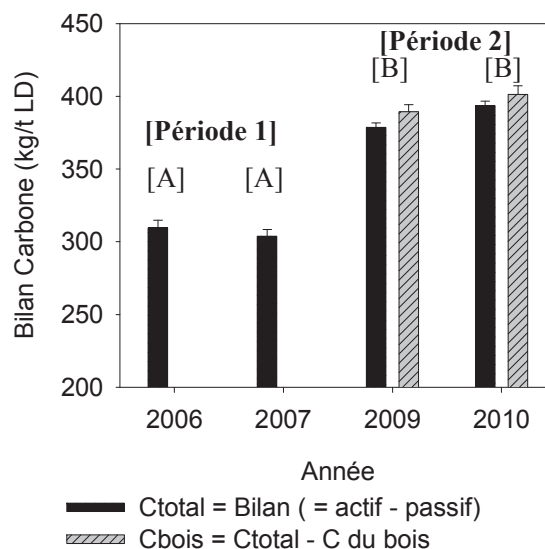
Les plaquettes de bois forestières introduites dans le processus de déshydratation représentent, en C, 10 à 15 % ( $\pm 1,5\%$ ) du C total consommé par les UP. Ceci permet de réduire significativement ( $P<0,05$ ) la quantité de C fossile nécessaire pour déshydrater 1 t de LD : en P2, cette quantité passe de  $173\pm 7$  kg à  $152\pm 7$  kg/t LD.

Quelles que soient les périodes, le bilan C global (= actif - passif) montre un excédent de C fixé par la culture par rapport au C émis au cours du processus de production de LD : il croît en moyenne de  $307\pm 3$  kg/t LD en P1 à  $386\pm 3$  kg/t LD en P2 (Figure 2). L'introduction des plaquettes de bois permet d'améliorer le bilan dont l'excédent moyen est de  $395\pm 4$  kg/t LD en P2.

L'analyse de variance montre que cette différence entre les pratiques de P1 et celles de P2 est significative ( $P<0,001$ ), sans effet UP ( $P=0,40$ ) ni interaction entre périodes d'étude et UP ( $P=0,76$ ). A l'échelle de la production du groupe Luzeal (4 UP), le gain de 88 kg de C/t de LD entre P1 et P2 représente près de 30 % de

réduction des émissions de C d'origine fossile, soit 15 800 t de C ou 50 300 t de  $\text{CO}_2$ .

**Figure 2** : Evolution du bilan Carbone pour 1 t de Luzerne Déshydratée (LD)



### 2.2. BILAN ENERGETIQUE

L'actif, issu de la valorisation laitière offre 6,37 GJ/t de LD. Les plaquettes forestières ajoutent entre 0,13 et 0,48 GJ/t de LD selon les taux d'incorporation pratiqués par chaque UP.

L'impact de la technique de fauche diminue la quantité d'eau à évaporer en four et réduit, de fait, la quantité totale d'énergie nécessaire pour déshydrater le fourrage. En P1, il fallait  $8,27 \pm 0,13$  GJ pour déshydrater 1 t de luzerne ; en P2, il en faut  $5,84 \pm 0,11$  GJ, soit une réduction de près de 30% d'énergie consommée.

Les plaquettes de bois fournissent de l'énergie renouvelable. En déduisant leur contribution de l'énergie totale utilisée, l'ENR non renouvelable nécessaire pour le séchage d'1 t de LD est de  $5,50 \pm 0,13$  GJ/t LD en P2, soit une réduction d'utilisation d'énergie fossile d'environ  $0,34 \pm 0,07$  GJ/t LD.

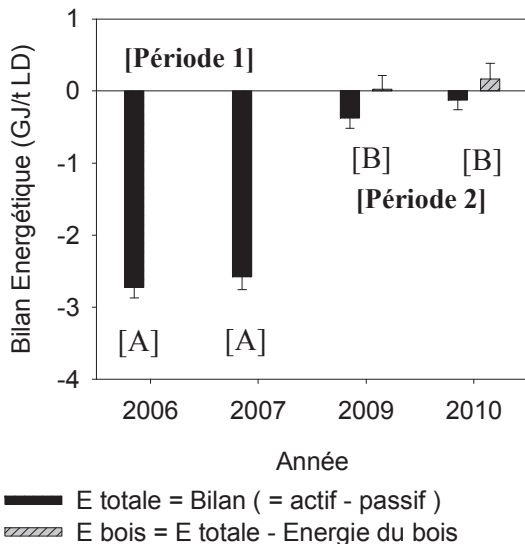
Les CI, qui pèsent peu dans ce bilan, ont progressés légèrement de  $0,75 \pm 0,02$  GJ/t LD en P1 à  $0,78 \pm 0,02$  GJ/t LD en P2.

Le bilan global (= actif - passif) montre un déficit moyen de  $2,65 \pm 0,11$  GJ/t LD en P1 (Figure 3). En P2, les résultats se rapprochent de l'équilibre : le déficit moyen est de  $0,25 \pm 0,10$  GJ/t LD. Il devient légèrement positif lorsque l'on considère seulement l'énergie d'origine fossile :  $+0,10 \pm 0,13$  GJ/t LD (Figure 3).

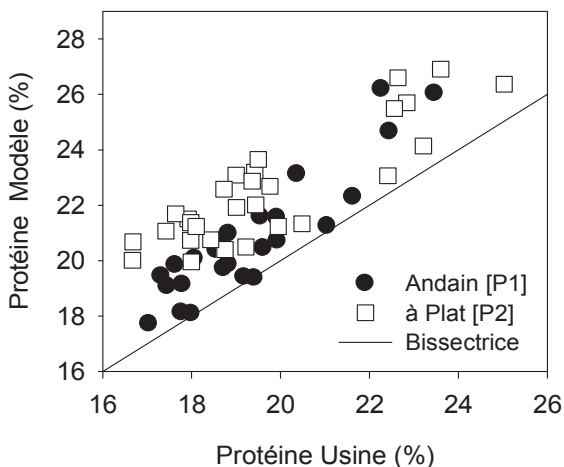
### 2.3. QUALITE DU FOURRAGE RECOLTE

L'analyse des teneurs en protéines obtenues en usines avant et après la mise en œuvre du fauchage à plat montre que pour P1, la teneur moyenne en protéine observée est de  $19,3 \pm 0,3\%$  ( $n=26$ ) tandis que pour P2, elle est de  $19,7 \pm 0,4\%$  ( $n=29$ ). Cette différence se révèle non significative ( $P>0,45$ ). Par ailleurs, la comparaison des teneurs de chacune de ces périodes aux valeurs théoriques calculées par le modèle de prévision de Coulmier (1990), montre la même dynamique des nuages de points : ils semblent se confondre (Figure 4).

**Figure 3 :** Evolution du bilan Energétique pour 1 t de Luzerne Déshydratée (LD)



**Figure 4 :** Impact de la technique de préfanage sur la teneur en protéines du fourrage récolté



### 3. DISCUSSION

Cette étude est basée sur un échantillon d'UP appartenant à une même entité industrielle. Les innovations sont donc déployées et usitées uniformément. Or, pour réaliser une comparaison sur l'effet de chacune des améliorations du processus de production, il aurait fallu pouvoir disposer d'UP « témoin » ne mettant pas en pratique ces innovations au cours des mêmes années d'études, tout en disposant du même outil de déshydratation. Ce travail présente cependant des résultats qui peuvent être utilisés dans les bases de données mobilisées pour réaliser les ACV des produits sortant des exploitations d'élevages, qui consomment ces produits issus de la déshydratation. Les résultats présentés montrent que des réductions importantes ont été obtenues entre P1 et P2, tant sur les émissions de C fossile que sur les consommations d'énergie pour produire 1 t de LD. Des marges de progression existent encore : des taux d'incorporation de plaquettes de bois plus élevés ont été testés, et montrent que l'on peut envisager des taux de l'ordre de 30 % du C nécessaire au fonctionnement des fours, avec le matériel actuel (27 % réalisé en coupe 3 de l'UP2 en 2009). Les

volumes de plaquettes semblent exister sur la région (Agreste, 2010), mais cela nécessite aussi d'organiser une filière d'approvisionnement des UP en conséquence. Par ailleurs, et selon les zones géographiques d'implantation des UP, des opportunités locales peuvent permettre d'autres adaptations : utilisation de biogaz issu de la fermentation de déchets ménagers (exemple de la CODEMA de Changé en Mayenne, qui lui a valu le trophée de l'agriculture durable décerné par le Ministère de l'Agriculture en 2009), utilisation de cultures à vocation énergétique comme le miscanthus en zones peu boisées (60 % de réduction des émissions de C réalisé par la COOPEDOM de Domagné en Ile-et-Vilaine), etc.

L'impact du préfanage à plat, par rapport au préfanage en andain pratiqué précédemment, n'a pas montré d'incidence significative sur la qualité du fourrage récolté pour l'échantillon d'étude nous concernant. Il faut cependant noter que les conditions climatiques au cours de cette période ont été plutôt favorables à ce résultat tout comme elles ont été favorables aux performances énergétiques réalisées en P2 : chantiers peu ralentis par les épisodes pluvieux, limitant d'autant la perte de protéines solubles du fourrage, et favorisant la dessiccation au champ. D'autre part, la teneur en protéines suivant une loi de dilution décroissante dans la plante avec l'accroissement de sa biomasse, les teneurs en protéines les plus faibles (<19 %) sont obtenues pour les productions de biomasse les plus fortes (Lemaire *et al.*, 1985 ; Lemaire et Gastal, 1997). Or, on s'aperçoit (figure 4) que pour les teneurs en protéines les plus faibles, les points correspondant au préfanage à plat ont tendance à se situer dans le haut du nuage. Ceci suggère donc une possible conséquence négative de cette technique : les teneurs attendues étant plus élevées que celles observées. En effet, la végétation couvrant complètement le sol, les feuilles situées au contact du sol ne reçoivent plus de lumière et deviennent plus sensibles à la sénescence et, par conséquent, plus sensibles aussi aux manipulations mécaniques. Cela peut accentuer les pertes de folioles lors de la récolte.

### CONCLUSION

L'impact de l'activité de déshydratation de la luzerne est positif pour le bilan carbone : la culture en fixe plus qu'il n'en faut pour la produire. Le bilan énergétique présenté, par la méthode d'estimation mobilisée, fait apparaître des résultats proches de l'équilibre en P2, favorisés par une météorologie propice à la mise en œuvre de ces innovations. Ces résultats encouragent la poursuite des efforts consentis ces dernières années. Efforts qui doivent être poursuivis, notamment en continuant de moderniser l'outil de production afin qu'il intègre davantage d'énergie dite « renouvelable ».

- Agreste Champagne-Ardenne, 2010. Hors-Série, 36-37  
 Ballif, J.L., Guerin, H., Muller, J.C., 1995. INRA Ed., 101 p  
 Beaudoin, N., Thiébeau, P., 2007. Fourrages, 190, 237-250  
 Justes, E., Thiébeau, P., Cattin, G., Larbre, D., Nicolardot, B., 2001. Pers. Agric., 264, 22-26  
 Gosse, G., Chartier, M., Varlet-Grancher, C., Bonhomme, R., 1982. Agronomie 2, 583-588  
 Coulmier, D., 1990. Th. Doct. INA, Paris, 8 sept. 103 p.  
 Lemaire, G., Cruz, P., Gosse, G., Chartier, M., 1985. Agronomie 5 (8), 685-692  
 Lemaire, G., Gastal, F., 1997. Springer-Verlag Ed. 3-43  
 Thiébeau, P., Justes, E., Vanloot, P., 2001. Pers. Agric., 266, 32-36  
 Thiébeau, P., Parnaudeau, V., Guy, P., 2003. Cour. Env. INRA, 49, 29-46