

**MISE A JOUR DE L'EMPREINTE CARBONE ET ENERGIE DE LA
PRODUCTION DE LUZERNE DESHYDRATEE, DE L'IMPLANTATION
DE LA CULTURE A LA SORTIE USINE.**



MISE A JOUR DE L'EMPREINTE CARBONE ET ENERGIE DE LA PRODUCTION DE LUZERNE DESHYDRATEE, DE L'IMPLANTATION DE LA CULTURE A LA SORTIE USINE.

Synthèse des résultats préliminaires

Rédaction : P. Thiébeau, S. Recous.

Contrat de recherche C3697, INRAE/Coop de France Déshydratation, du 26/05/2020.

- **Responsables scientifiques :**

- INRAE S. Recous / P. Thiébeau
- Partenaire(s): E. Guillemot / Y. Martinet (Luzerne de France)

- **Résumé :**

L'objet de la convention est de mettre à jour l'empreinte carbone et énergie de la production de luzerne déshydratée publiée en 2011, afin de quantifier les évolutions obtenues au sein du processus de production.

- **Durée du Projet : 4 mois**

- **Contexte, Objectifs, Question(s) de recherche :**

Le réchauffement climatique que nous connaissons depuis quelques années conduit à considérer le stockage de carbone réalisé par les cultures comme un élément à prendre en compte pour quantifier les impacts de l'activité agricole sur l'environnement et un levier possible de l'atténuation de ses impacts sur le climat (Arrouays *et al.*, 2002 ; Durand *et al.*, 2010 ; Picon-Cochard *et al.*, 2013). En zone de grandes cultures, par exemple, ces leviers résident dans la recherche d'une couverture permanente des sols par différentes cultures : cultures intermédiaires (Justes *et al.*, 2012), cultures pérennes telle que la luzerne en région Grand-Est, etc.

Un autre moyen d'action pour limiter le réchauffement climatique réside aussi dans la limitation du recours aux énergies non renouvelables. Ainsi, la filière de production de luzerne déshydratée, anciennement grande consommatrice d'énergie non renouvelable comme moyen de conservation du fourrage récolté, a engagé depuis plusieurs années des efforts pour réduire ses impacts sur l'environnement. Ainsi, le bilan environnemental réalisé en 2011 montrait que le système de production approchait le point d'équilibre entre la fixation de carbone atmosphérique par la culture et les émissions de carbone vers l'atmosphère induits au cours du processus de production, de l'implantation de la luzerne au granulé de fourrage « sortie usine ».

A la demande de la profession « Luzerne de France », le présent partenariat est mis en place afin de mettre à jour ce bilan. Il permettra de caractériser, sur les mêmes éléments du bilan, l'évolution des progrès techniques engagés par la filière.

Les données sont mises à disposition par la profession qui accepte de participer financièrement à la réalisation de ce travail. Dans ces résultats préliminaires, le travail est réalisé avec 4 unités de production du groupe Luzeal, qui était le partenaire du travail précédent. Néanmoins, un échantillon

élargit à d'autres unités de production est en cours afin d'avoir une photographie plus large des situations existantes.

Ce travail sera intégré à la base de données Agribalyse (ADEME/INRAE). P. Thiébeau se formera à l'utilisation de l'outil d'analyse multicritères MEANS (INRAE, UMR SAS de Rennes ; <https://www6.inrae.fr/means/Outils-d-analyse-multicritere/Logiciels-MEANS>) pour mettre à jour l'**inventaire de cycle de vie (ICV)** lié à cette production.

MATERIEL ET METHODE

Collecte des données

Les données correspondantes à la mise en place et à l'entretien de la culture durant les années d'exploitation ont été collectées auprès du CDER de Châlons-en-Champagne.

Les données industrielles utilisées dans cette étude proviennent du groupe Luzeal, collaborateur du travail réalisé en 2011 (Thiébeau *et al.*, 2011a). Ces données font l'objet de déclarations et vérifications par différentes instances nationales (ADEME, CITEPA,..) et européennes.

La période de travail retenue est de 4 années (2016-2019) pour observer la dynamique d'évolution dans le temps et pouvoir la comparer à l'étude précédente (années support : 2006-2009).

Le contexte industriel a évolué dans cet intervalle de temps : 3 des 4 unités de production (UP) présentes en 2006-2009 font à nouveau partie du panel support de cette mise à jour. Il s'agit des UP de Recy (51), Saint-Rémy-sur-Bussy (51) et Pontfaverger (51). L'usine de Bazancourt (51) n'est plus une composante du groupe Luzeal. Elle a intégré le groupe Cristal Union dont l'activité principale est le traitement de la betterave sucrière. Afin de conserver une base de travail suffisamment représentative de la production nationale, l'unité de production de Pauvres (08), composante du groupe Luzeal, a été intégrée dans l'échantillon 2016-2019.

Les données mensuelles collectées permettent de bien distinguer la part d'activité industrielle liée à la luzerne déshydratée (LD) de celle consacrée à d'autres productions : maïs et/ou pulpes de betteraves par exemple. Ainsi, n'ont été conservées dans cette analyse que les données mensuelles où l'activité LD est supérieure ou égale à 95% de produits finis.

L'inventaire est construit comme un bilan, avec :

Pour le bilan « Carbone » : un passif constitué de toutes les sources d'énergies nécessaires pour mettre en place la culture, l'entretenir, la récolter, la transporter jusqu'à l'UP qui organise sa récolte, et la déshydrater ; un actif constitué par la fixation de carbone atmosphérique par la culture, stocké dans la biomasse racinaire, les collets et le fourrage récolté et déshydraté.

L'exploitation des données de production de matière sèche (MS) par hectare et par an correspond aux moyennes mesurées sur chaque UP (produit sec entrant/surface récoltée), ce qui exclut les pertes au champ et/ou lors du transport champ-usine mais inclut les aléas annuels de production (variations du climat). Une teneur en carbone de 450 g par kg de MS (45 %) est retenue pour estimer la fixation de carbone par la culture. Le carbone présent dans les collets et les biomasses racinaires au terme de deux années de production, sur 1 m de profondeur, est estimé à partir des travaux de Justes *et al.*

(2001) et de Thiébeau *et al.* (2011b), comme cela avait été fait lors des études précédentes (Thiébeau *et al.*, 2001 et 2011a).

Pour le bilan « Energie », le passif est constitué de l'énergie des combustibles utilisés (Pouvoir Calorifique Inférieur – PCI, mesurés par chaque UP), de celles des carburants nécessaires tout au long du processus de production (du travail du sol pour mettre en place la culture, l'entretenir et acheminer les récoltes à l'usine), et de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement de l'UP. **L'actif** est constitué par l'énergie contenue dans 1 tonne de LD contenant $18,2 \pm 1,4\%$ de protéines sur produit sec. Cette valeur correspond à la teneur moyenne des LD livrées au groupe de commercialisation Désialis sur la période de l'étude. En retenant une valorisation par un cheptel de bovins laitiers comme cela avait été fait lors des études précédentes, et tenant compte des dernières tables d'alimentation animales INRAE 2018 (https://feedtables.com/fr/content/table-feed-profile?feed_pr_id=12448), l'énergie contenue dans 1 kg de LD est de 0,75 Unité Fourragère Lait (UFL). Cette qualité est différente des travaux précédents (19,4% de protéines et 0,82 UFL), mais représente bien la qualité du fourrage qui a été récolté.

Pour chacune des 4 UP et année d'étude, les informations collectées sont donc les suivantes :

- Quantité de produits finis de LD ;
- Surface de luzerne collectée ;
- Quantité de charbon, lignite, biomasse (nature de chacune d'elle) utilisées ;
- PCI respectifs de ces sources d'énergie, mesurés sur les livraisons ;
- Consommation électrique de chaque usine (relevé des compteurs mensuels).

Les consommations de carburants du processus de récolte (fauche, andainage, ensileuse, transport) ont été étudiées spécifiquement pour 2 UP où l'activité n'a pas été transférée à un prestataire de service. Ces données ont ensuite été extrapolées aux deux autres UP.

In fine, le bilan compare les données portées au passif à celles mentionnées à l'actif.

Valeurs énergétiques et teneurs en carbone des ressources utilisées

Pouvoir calorifique (PCI) des ressources

Chaque UP procédant à une analyse du PCI (calorie/kg de combustible) de ses combustibles non – renouvelables (lignite et charbon) et renouvelables (biomasses), l'étude a été conduite avec les données propres à chaque UP.

Teneur en carbone des ressources

Les données utilisées proviennent de la base carbone de l'ADEME. Elles montrent les valeurs suivantes (https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?solides3.htm) :

Lignite = 55 à 75% de C et Charbon (anthracite) = 90 à 95% de C. Pour ne pas sous évaluer/surévaluer les résultats de l'étude, les valeurs moyennes de ces plages ont été retenues, soit 65% de C pour le lignite et 92,5% de C pour le charbon.

Pour le C des biomasses agricoles utilisées, les valeurs retenues proviennent de la base de données INRAE de Reims, obtenue à partir d'une analyse bibliographique exhaustive des valeurs des cultures observées en Europe (Projet Européen ResidueGas, 2017-2021). Elle sera prochainement déposée et accessible en ligne. Pour les valeurs du bois, elles proviennent de travaux sur des taillis à courtes

rotation, réalisés sur différentes espèces d'arbres, par l'INRAE de Reims (Thiébeau et Bertrand, 2020). Des analyses spécifiques ont dû être réalisées pour le combustible « HPCI black pellet (série C) », utilisé par deux UP, car aucune donnée n'a été trouvée dans la littérature. Ce combustible est issu de biomasse végétale à laquelle il est appliqué un procédé industriel de vapocraquage. Celui-ci lui confère sa couleur foncée (**Photo 1**), ainsi qu'un plus fort potentiel énergétique, plus proche du charbon que du bois brut, et une grande résistance à l'eau.

Photo 1 : Granulés de « Black-pellets »



Les valeurs retenues pour les différentes sources de biomasse sont donc les suivantes : bois (plaquettes, sciures, écorces) = 49% C ; miscanthus = 47% C ; HPCI black pellets = 55% C ; granulés d'agromis (mix 40% bois + 60% miscanthus) = 48% C ; granulés de paille (céréales) = 43% C. Pour les biomasses non renseignées, la valeur de 50 % C a été retenue.

Note : ces différentes sources d'énergie sont souvent regroupées sous une même rubrique au sein des documents officiels, alors que leur ventilation permettrait d'établir un bilan carbone plus près de la réalité.

Consommations électriques

La valeur équivalente de CO₂ de la consommation d'1 kWh « rendu usine » retenue est de 66 g CO₂ (<https://www.equilibredesenergies.org/12-10-2018-le-contenu-en-co2-du-kwh/>; mis à jour le 30/11/2019). En 2011, cette valeur était de 6 g CO₂ ; En 2001, aucune valeur n'était attribuée au premier kWh consommé par les UP. Les éléments pris en compte dans les inventaires de cycle de vie ont donc évolués, et continuent d'évoluer chaque année.

Aussi, pour comparer les progrès réalisés au cours des deux périodes comparées (2006-2009 vs. 2016-2019), toutes les valeurs de l'inventaire ne résultant pas de mesure ont été comparées sur la même base, correspondant aux valeurs connues à ce jour.

Traitement statistique

Les données sont acquises et traitées UP par UP, ce qui permet d'associer une erreur d'estimation aux moyennes présentées. Une analyse de variance est réalisée à l'aide du logiciel SigmaPlot 12.0 (Systat Software Inc., Chicago, Illinois, Etat-Unis) pour comparer la significativité des résultats obtenus. Lorsqu'un effet est significatif, la procédure de comparaison de moyennes multiples, prises par pair, est réalisée selon la méthode Holm-Sidak ($P < 0,05$), suivi d'un classement en groupes homogènes.

RESULTATS ET DISCUSSION

Représentativité de l'échantillon analysé

L'échantillon de production annuel analysé sur la période 2016-2019 (230 047 t LD \pm 4,4%) est supérieur à celui de l'étude précédente 2006-2009 (157 440 t LD \pm 7,9%). Il représente également une part plus importante de la production nationale : $29,3 \pm 0,5\%$ versus $16,8 \pm 1,7\%$ précédemment.

Pouvoir calorifique (PCI)

L'usage courant du lignite, du charbon, du bois (plaquettes, écorces, sciures) et du miscanthus par les UP permet de réaliser une analyse de variance sur les valeurs obtenues (**Figure 1**). Les résultats montrent une différence significative ($P < 0,001$) du PCI du lignite (4776 ± 27) et du charbon (5782 ± 16), eux même significativement différents de ceux du bois (2587 ± 88) et du miscanthus (2460 ± 127) qui eux, ne sont pas différents entre eux ($P = 0,271$). Les conversions en GJ/t de matière première sont respectivement de 20,0, 24,2, 10,8 et 10,3 pour le lignite, le charbon, le bois et le miscanthus.

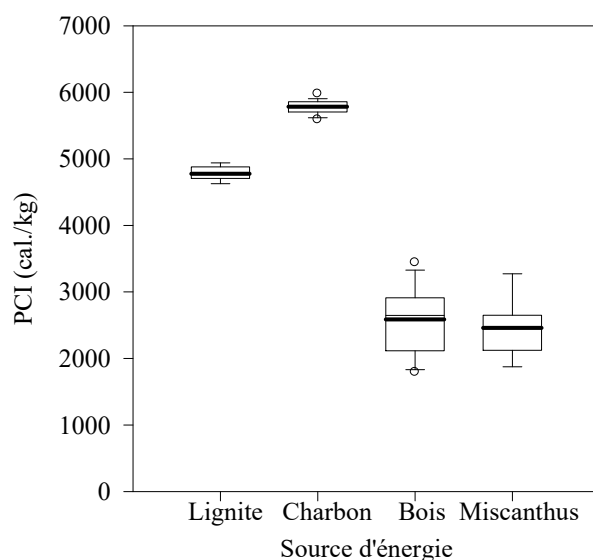
En l'absence d'obligation réglementaire, la faible variabilité des résultats de PCI mesurés sur le lignite et le charbon suggère que la profession pourrait se passer de réaliser ces analyses pour ces sources d'énergies. En revanche, il s'avère indispensable de les réaliser pour les sources issues de biomasses dont la variabilité est significativement différente (**Figure 1**).

Note : Les valeurs observées de 20,0 et 24,2 GJ/t pour le lignite et le charbon sont différentes de celles mentionnées dans la base carbone de l'ADEME (https://www.bilans-ges.ademe.fr/documentation/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?solides3.htm) : les valeurs respectives sont de 17,0 et 26,7 GJ/t pour la France et de 11,9 et 26,7 GJ/t pour les valeurs Europe.

Figure 1 : Valeurs PCI des quatre sources d'énergies les plus utilisées de 2016 à 2019 par les 4 unités de production de luzerne déshydratée support de l'étude.

PCI (cal./kg) : Pouvoir Calorifique Inférieur (calories/kilogramme de matière première)

Données représentées : points (5^{ème}-95^{ème} percentile), barres d'erreurs (10^{ème}-90^{ème} percentile), boîte (25^{ème}-75^{ème} percentile), moyenne (trait gras) et médiane (trait fin) = non visible si leurs valeurs sont très proches.



Bilan « Energie »

La contribution des différents compartiments portés au passif du bilan est présentée **Figure 2**. Si la part consacrée aux énergies nécessaires au fonctionnement des fours de déshydratation conserve un poids majoritaire de ce secteur d'activité, les données montrent l'effort accompli en l'espace d'une dizaine d'année pour réduire très significativement les besoins de la profession : la consommation d'énergie est passée de 9,2 GJ/t PF en 2006/2007 à 3,8 GJ/t PF en 2018/2019. Seul élément de l'actif : l'énergie du fourrage récolté, destiné à l'alimentation d'un troupeau laitier, est de 5,5 GJ/t PF.

Les bilans annuels « énergie » sont présentés **Figure 3**. Les années 2006 et 2007 sont des campagnes de déshydratation dites de « référence » car elles ne prennent en compte aucune des innovations mises en œuvre depuis 2008 et appliquées à ce jour au sein du process de production.

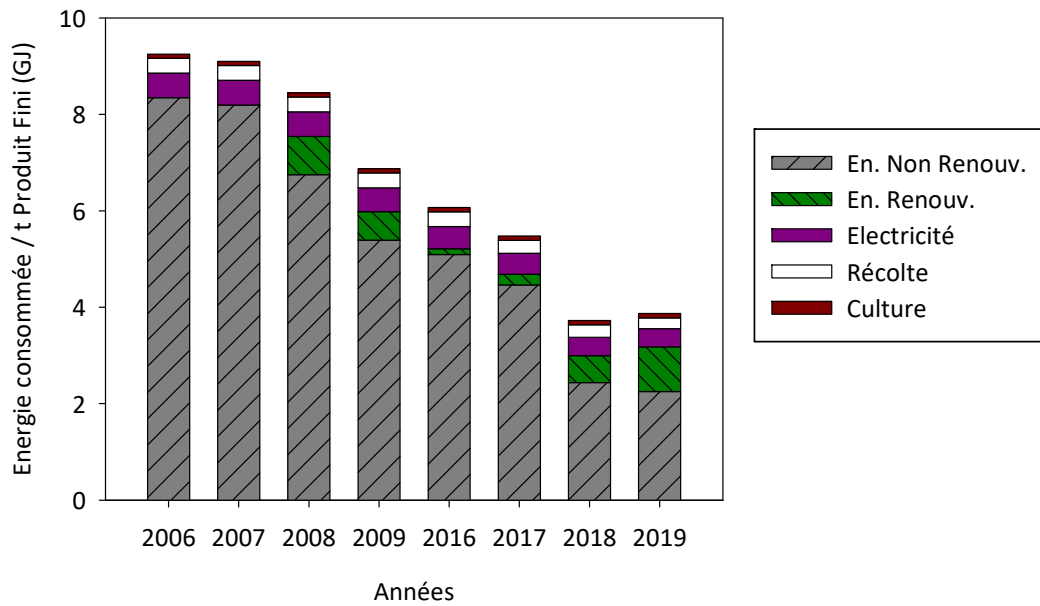
A partir des campagnes de récolte 2008 et 2009, le système de récolte est modifié. L'objectif est d'amener à l'usine un fourrage beaucoup moins riche en eau que par le passé. L'introduction du « fauchage à plat » au champ, 24 à 48 heures avant le passage d'une andaineuse, puis de l'ensileuse, ont ainsi permis de gagner plusieurs pourcentages de matière sèche par un pré-séchage naturel : gain de 7,8% de matière sèche en moyenne selon l'étude réalisée sur les campagnes 2008 et 2009 (Thiébeau *et al.*, 2011a).

En usine, à partir de 2008, il s'agit également des premières années où des essais d'incorporation de biomasse (plaquettes de bois essentiellement) ont été réalisés, en mélange au charbon alimentant les fours. Ce n'est que récemment que ces modalités ont de nouveau évoluées :

- i) Au champ, d'une part, en abandonnant les ensileuses à sellette au profit d'ensileuses simple, suivies dans le champ par un tracteur agricole ou routier et sa remorque. C'est ce dernier ensemble qui achemine le fourrage à l'UP. Cette modification technique du chantier de récolte a permis de réduire de 30% les consommations de carburant de ce poste.
- ii) A l'usine d'autre part, en équipant les fours de bruleurs adaptés à l'incorporation massive de biomasse, moins calorifique que le lignite et le charbon ; et en adaptant les lignes de séchage à un fonctionnement à basse température (250°C vs 700°C), donc moins énergivore.

L'ensemble de ces évolutions techniques, associé à la structuration d'une filière d'approvisionnement de biomasses, en volumes et en régularité, permet la substitution de volumes de plus en plus importants d'énergies non renouvelables par des énergies « vertes ». Ainsi, le bilan « énergie » très déficitaire en 2006-2007, de près de -3,6 GJ/t produit fini (PF), devient significativement excédentaire depuis 2018-2019, +1,2 GJ/t PF en moyenne (**Figure 3**). En ne comptabilisant pas l'énergie issue de la biomasse végétale (énergie renouvelable (ER)), le bilan moyen 2018-2019 excède les +2 GJ/t PF, et s'approche des +3 GJ/t PF pour les 3 UP présentes de 2006 à 2019 (**Annexes 1a et 1b**).

Figure 2 : Contribution des différents éléments portés au passif du bilan « énergie »

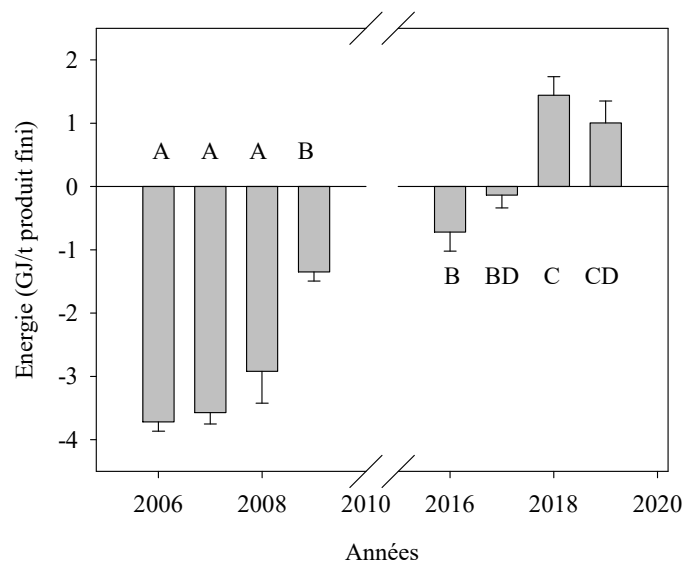


En. Non Renouv. = énergie non renouvelable (lignite + charbon)

En. Renouv. = énergie renouvelable, issue des biomasses végétales utilisées

Figure 3 : Bilans annuels « Energie » (actif – passif) pour la production d’une tonne de luzerne déshydratée des 4 unités de production support de l’étude.

Les moyennes sont accompagnées de leur estimation d’erreur. A, B, C, D: Classement en groupes homogènes selon la méthode d’Holm-Sidak ($P \leq 0,05$)



Bilan « Carbone »

La contribution des postes mentionnés au passif du bilan « carbone » est présentée **Figure 4**. A l'image du bilan « énergie », elle montre l'effort réalisé pour limiter l'empreinte de la profession dans le processus de production, ainsi que le désintérêt de plus en plus marqué pour l'utilisation d'une ressource non renouvelable. Ainsi, la consommation de carbone pour produire 1 t de PF est passée de 315 kg/t en moyenne 2006/2007 à 155 kg/t en moyenne 2018/2019. L'actif est constitué de la fixation de carbone par la culture, dans ses différents organes aérien et souterrain. Il est en moyenne de l'ordre de 542 kg/t de PF (± 3 kg) selon les rendements mesurés chaque année.

Les bilans annuels « carbone » sont présentés **Figure 5**. Comme indiqué précédemment, les années 2006 et 2007 sont des campagnes de déshydratation dites de « référence ». Pour ces années, elles présentaient un bilan excédentaire d'un peu plus de 200 kg de carbone par tonne de produit fini. La mise en place des évolutions techniques et de process montraient une différence significative du bilan dès 2009, en dépassant un solde positif de 300 kg C/t PF. Ce solde positif s'est de nouveau accru de manière significative en 2018 et 2019 pour atteindre +391 kg C/t PF en moyenne. En ne comptabilisant pas le carbone issu des ER, l'excédent des bilans dépasse les 440 kg C/t PF en moyenne 2018-2019 (**Annexe 2a**). En se concentrant sur les 3 UP présente de 2006 à 2019, ce bilan montre un excédent de 461 kg C/t PF (**Annexe 2b**).

Figure 4 : Contribution des différents éléments portés au passif du bilan « carbone ».

C Non Renouv. = carbone non renouvelable (lignite + charbon)

C Renouv. = carbone renouvelable, issu des biomasses végétales utilisées

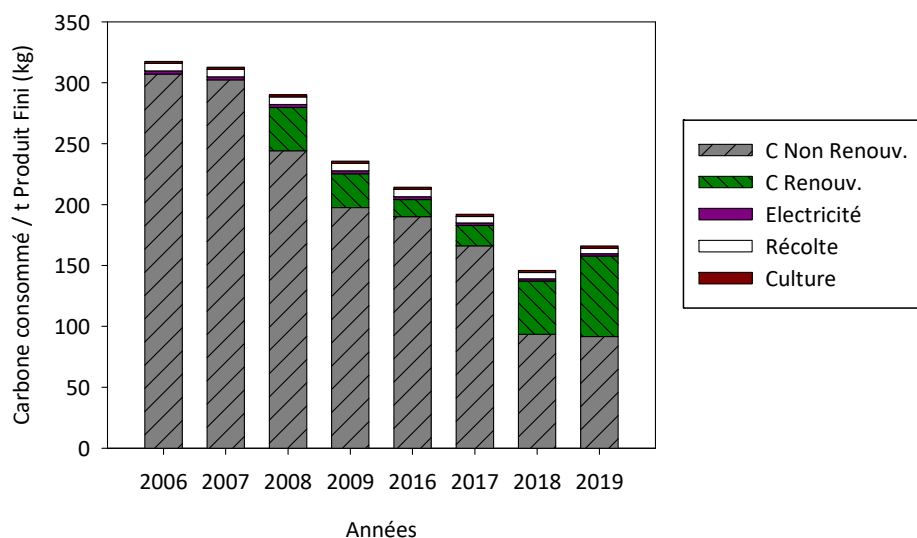
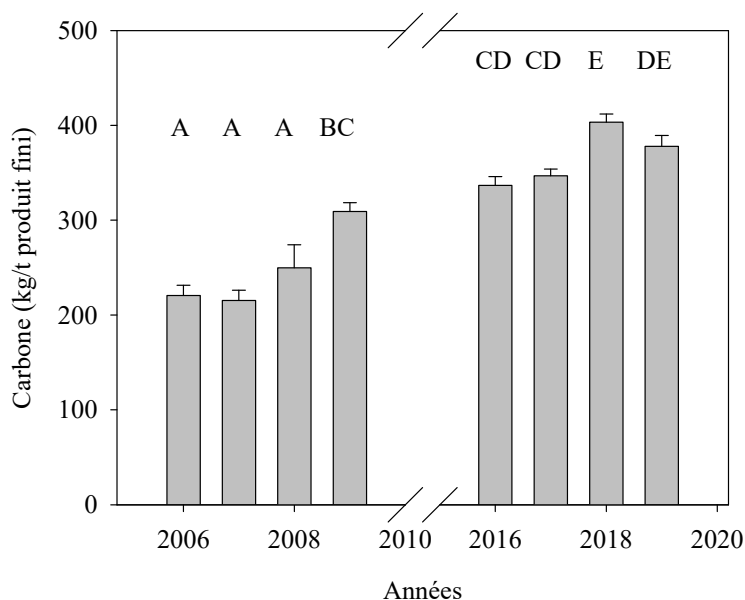


Figure 5 : Bilans annuels « Carbone » (actif – passif) pour la production d’une tonne de luzerne déshydratée des 4 unités de production support de l’étude.

Les moyennes sont accompagnées de leur estimation d’erreur. , A, B, C, D: Classement en groupes homogènes selon la méthode d’Holm-Sidak ($P \leq 0,05$)



Evolutions des bilans « énergie » et « carbone »

Les évolutions conjointes des deux bilans, énergie et carbone, sont présentés **Figure 6**. Ils sont exprimés en indice (base 100 = 2006) de façon à comparer leur évolution. Les constats évoqués précédemment sont bien visibles. L’effort engagé dès 2008 pour recourir aux énergies renouvelables s’est accru significativement depuis 2018 (**Figure 7**).

Le progrès important qui apparaît dès 2009 (**Figure 6**) entre les deux bilans (énergie vs carbone) reflète bien la réduction du recours à l’« énergie combustible » pour déshydrater le fourrage, mais également grâce au pré-séchage du fourrage au champ. La différence avec le bilan carbone s’accroît de nouveau en 2018, et est maintenue en 2019. Elle est la conséquence essentiellement de la mise en œuvre de fours acceptant de la « biomasse » comme source d’énergie, et de l’adaptation des lignes de séchage pour un fonctionnement à basses températures.

Figure 6 : Evolution indiciaire (base 100 = 2006) des bilans « énergie » et « carbone » pour la production d'une tonne de luzerne déshydratée des unités de production support de l'étude, de 2006 à 2019.

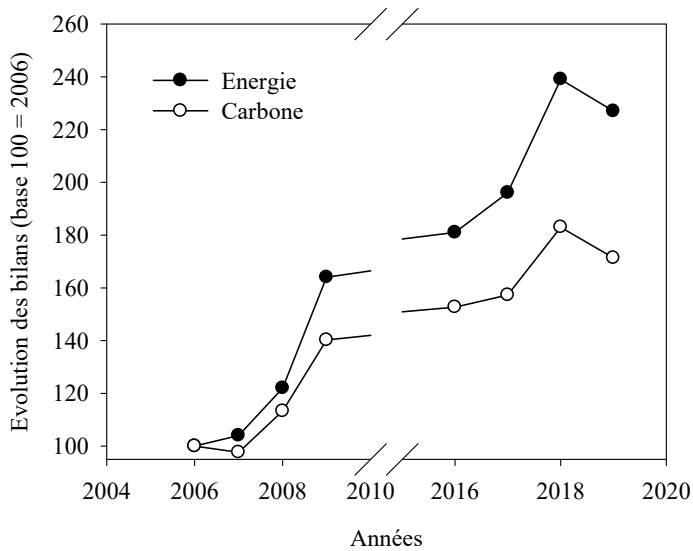
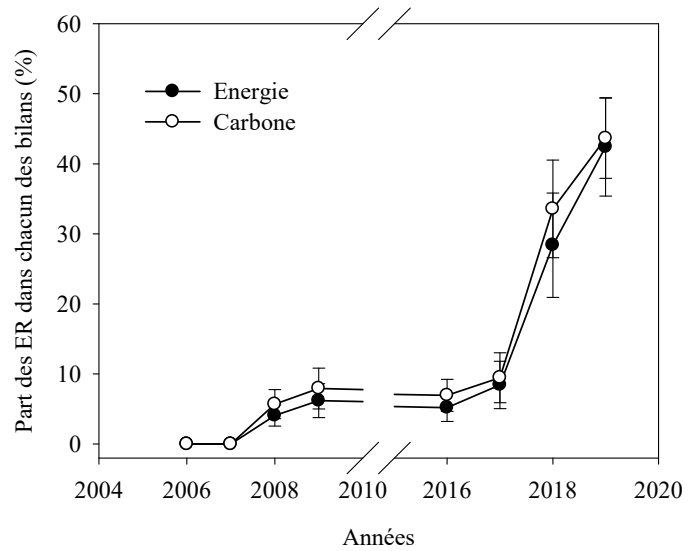


Figure 7 : Evolution de la part des énergies renouvelables (ER) dans chacun des bilans « énergie » et « carbone » pour les unités de production support de l'étude, de 2006 à 2019.



CONCLUSION

A ce jour, il faut constater que de gros efforts ont été entrepris pour substituer des énergies non renouvelables (lignite et charbon) par des énergies renouvelables (biomasses végétales). L'effort de substitution est significatif et n'aurait pu être réalisé sans une adaptation indispensable de l'outil de production. Les conditions climatiques favorables soulignées en 2011 se sont répétées à plusieurs reprises depuis, et ne peuvent plus être considérées comme des exceptions ; les techniques de récoltes se sont améliorées, et l'équipement industriel s'oriente vers des process moins énergivores. Dans le même temps, une filière d'approvisionnement de biomasse s'est mise en place pour garantir des approvisionnements en volume et en régularité. Des marges de progressions existent encore pour introduire davantage d'énergie dite « renouvelable » et améliorer *de facto* les empreintes « carbone » et « énergie », positives/excédentaires, de la filière.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Messieurs Thierry Hamerel, Directeur Général du groupe de luzerne déshydratée Luzéal, Didier Coulmier, Directeur Recherche et Développement de la société de commercialisation de luzerne déshydratée Désialis, et Jean-Marie Lett, Directeur Métier Conseil du CDER de la marne, pour les informations qu'ils ont acceptés de nous communiquer pour la bonne réalisation de ce travail.

REFERENCES

- Arrouays *et al.* Eds (2002). Contribution à la lutte contre l'effet de serre : stocker du carbone dans les sols agricoles en France ? Synthèse de l'Expertise collective INRA pour le MEDD.
- Durand *et al.* (2010). Changement climatique et prairie : l'essentiel des impacts. ADEME Eds. 336p.
- Justes *et al.* (2001). Libération d'azote après retournement de luzerne : un effet sur deux campagnes. *Perspectives Agricoles*, 264 : 22-26
- Justes *et al.* (2012). Réduire les fuites de nitrates au moyen de cultures intermédiaires : conséquences sur les bilans d'eau et d'azote, autres services écosystémiques. Synthèse du rapport d'étude INRA, 60p.
- Picon-Cochard *et al.* (2013). Impacts du changement climatique sur les prairies permanentes. *Fourrages*, 214 : 127-134.
- Thiébeau *et al.* (2001). Filière luzerne en France : des atouts en faveur de l'environnement. *Perspectives Agricoles*, 266 : 32-36
- Thiébeau *et al.* (2011a). 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. *Renc. Rech. Ruminants*, 18 : 157-160
- Thiébeau *et al.* (2011b). Radiation use efficiency and shoot :root dry matter partitioning in seedling growths and regrowth crops of luzerne (*Medicago sativa* L.) after spring and autumn sowings. *European Journal of Agronomy*, 35 : 255-268 (DOI : 10.1016/j.eja.2011.07.002)
- Thiébeau & Bertrand (2020). Production de biomasse et immobilisation de carbone et d'azote sur des sols marginaux : cas de taillis à très courte rotation conduits sans fertilisation. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 24 (1) : 1-13 (DOI : 10.25518/1780-4507.18278)

Annexe 1a : Bilan « Energie » des quatre unités de production de l'étude

Année	Bilan toutes énergies prises en compte			Part des ER(%)		Bilan sans les énergies renouvelables		
	Moy. ±SE (GJ/t PF)	CV(%)	Indice	Moy. ±SE	CV(%)	Moy. ±SE (GJ/t PF)	CV(%)	Indice
2006	-3,719 ±0,148	4,0	100	0	/	-3,719 ±0,148	4,0	100
2007	-3,572 ±0,179	5,0	104	0	/	-3,572 ±0,179	5,0	104
2008	-2,919 ±0,505	17,3	122	4,1 ±1,5	37,3	-2,622 ±0,548	20,1	129
2009	-1,348 ±0,145	10,8	164	6,2 ±2,4	39,1	-0,980 ±0,215	22,0	174
2016	-0,720 ±0,301	41,8	181	5,2 ±2,0	38,2	-0,434 ±0,245	56,5	188
2017	-0,136 ±0,203	149,3	196	8,4 ±3,4	40,1	-0,136 ±0,326	239,7	196
2018	1,441 ±0,293	20,3	239	28,4 ±7,5	26,3	2,352 ±0,491	20,9	263
2019	1,004 ±0,347	34,6	227	42,4 ±7,0	16,6	2,569 ±0,527	20,5	269

Moy. ±SE (GJ/t PF) : Moyenne ± Erreur Standard (Giga Joules / tonne de Produit Fini)

CV(%) : Coefficient de Variation, exprimé en pourcentage

Part des ER(%) : Part des énergies renouvelables dans le « bilan toutes énergies prises en compte »

Annexe 1b : Bilan « Energie » des trois unités de production présentes de 2006 à 2019

Année	Bilan toutes énergies prises en compte			Part des ER(%)		Bilan sans les énergies renouvelables		
	Moy. ±SE (GJ/t PF)	CV(%)	Indice	Moy. ±SE	CV(%)	Moy. ±SE (GJ/t PF)	CV(%)	Indice
2006	-3,579 ±0,064	1,8	100	0	/	-3,579 ±0,064	1,8	100
2007	-3,568 ±0,254	7,1	100	0	/	-3,568 ±0,254	7,1	100
2008	-2,541 ±0,473	18,6	129	5,4 ±1,0	17,7	-2,145 ±0,382	17,8	140
2009	-1,257 ±0,161	12,8	165	8,2 ±1,8	21,7	-0,766 ±0,040	5,2	179
2016	-0,495 ±0,284	57,3	186	3,3 ±1,0	29,4	-0,324 ±0,309	95,5	191
2017	0,024 ±0,178	743,0	201	9,8 ±4,4	44,9	0,482 ±0,344	71,4	213
2018	1,720 ±0,124	7,2	248	35,2 ±4,3	12,3	2,830 ±0,160	5,7	279
2019	1,349 ±0,063	4,6	238	48,9 ±3,9	8,0	3,082 ±0,165	5,3	286

Annexe 2a : Bilan « Carbone » des quatre unités de production de l'étude

Année	Bilan toutes sources prises en compte			Part du CR(%)		Bilan sans le carbone renouvelable		
	Moy. \pm SE (kg C/t PF)	CV(%)	Indice	Moy. \pm SE	CV(%)	Moy. \pm SE (kg C/t PF)	CV(%)	Indice
2006	220,5 \pm 10,9	4,9	100	0	/	220,5 \pm 10,9	4,9	100
2007	215,3 \pm 10,9	5,1	98	0	/	215,3 \pm 10,9	5,1	98
2008	249,8 \pm 24,3	9,7	113	5,7 \pm 2,1	36,5	263,9 \pm 26,3	9,9	120
2009	309,3 \pm 9,2	3,0	140	7,9 \pm 2,9	36,8	326,8 \pm 10,9	3,3	148
2016	336,7 \pm 9,2	2,7	153	6,9 \pm 2,3	33,2	350,9 \pm 7,6	2,2	159
2017	346,9 \pm 7,0	2,0	157	9,5 \pm 3,6	37,7	363,6 \pm 5,5	1,5	165
2018	403,4 \pm 8,5	2,1	183	33,6 \pm 7,0	20,8	447,2 \pm 3,3	0,7	203
2019	377,9 \pm 11,4	3,0	171	43,6 \pm 5,7	13,1	444,1 \pm 4,2	0,9	201

Moy. \pm SE (kg C/t PF) : Moyenne \pm Erreur Standard (kilogramme de Carbone / tonne de Produit Fini)

CV(%) : Coefficient de Variation, exprimé en pourcentage

Part du CR(%) : Part du carbone renouvelable dans le « bilan toutes sources prises en compte »

Annexe 2b : Bilan « Carbone » des trois unités de production présentes de 2006 à 2019

Année	Bilan toutes sources prises en compte			Part du CR(%)		Bilan sans le carbone renouvelable		
	Moy. \pm SE (kg C/t PF)	CV(%)	Indice	Moy. \pm SE	CV(%)	Moy. \pm SE (kg C/t PF)	CV(%)	Indice
2006	229,9 \pm 7,8	3,4	100	0	/	229,9 \pm 7,8	3,4	100
2007	217,9 \pm 15,0	6,9	95	0	/	217,9 \pm 15,0	6,9	95
2008	267,7 \pm 23,3	8,7	116	7,6 \pm 1,2	15,7	286,5 \pm 18,8	6,6	125
2009	313,5 \pm 11,6	3,7	136	10,6 \pm 1,7	16,6	336,8 \pm 6,2	1,8	147
2016	342,1 \pm 10,6	3,1	149	4,8 \pm 1,4	28,0	351,2 \pm 12,0	3,4	153
2017	351,4 \pm 7,6	2,2	153	10,8 \pm 4,7	43,5	370,0 \pm 13,1	3,5	161
2018	411,5 \pm 3,6	0,9	179	39,6 \pm 4,8	12,1	461,7 \pm 8,0	1,7	201
2019	388,8 \pm 4,5	1,2	169	49,1 \pm 2,5	5,1	460,7 \pm 0,7	0,2	200