

2020

**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.**



Pascal Thiebeau, Sylvie Recous
INRAE URCA, UMR A 614 FARE
23/10/2020

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). La filière de production de luzerne déshydratée, 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. 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. Le travail est réalisé avec le groupe Luzeal dont les usines étaient le support du travail précédent.

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.

Commenté [YM1]: Tout à fait, et c'est d'autant plus étonnant que vous m'apprenez qu'il n'est pas pris en compte dans l'outil Agribalyse. Il faut absolument faire en sorte que cela évolue, que vous nous expliquiez quels sont les leviers pour nous montrer force de propositions.

Commenté [YM2]: Cette formulation atténuée quelque peu les efforts entrepris par la filière depuis 20 ans maintenant et le rapport d'audit de la cour des comptes européenne.

Commenté [YM3]: Est-il possible de mentionner ici qu'un échantillon plus étendu est à l'étude afin de prendre en compte plus en avant la diversité des situations, puisque ce nouvel échantillon ne couvrira pas moins de 60% de la production nationale de luzerne déshydratée ?

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.

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) s'est détachée du groupe Luzeal pour intégrer 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 : 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 est estimé en se basant sur les travaux de Justes et al. (2001), comme cela avait été fait lors des études précédentes (Thiébeau et al., 2001 et 2011).

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 19,4% de protéines, correspondant au marché de vaches laitières à haut potentiel que souhaite occuper pleinement la filière en lieu et place

Commenté [YM4]: Il paraît utile ici de préciser que ces données revêtent un caractère officiel par les reportages auxquelles elles contribuent et qui sont vérifiés par les instances nationales et internationales.

Commenté [YM5]: Je ne sais pas si l'on peut utiliser ce terme de 'détachée' ; à vérifier avec Thierry Hamerel si vous ne l'avez pas déjà fait, car je ne dispose pas d'autant d'historique dans la profession pour arbitrer.

Commenté [YM6]: Je reformule ici la remarque faite à l'oral : le fait que cette composante ne soit pas prise en compte à ce jour dans Agribalyse est un souci si nous la chargeons. Peut-on trouver un compromis en proposant un export excluant cette composante et en partageant avec les gestionnaires de l'outil les éléments de connaissance dont nous disposons sur ladite composante pour nos procédés de production ?

du soja d'importation]. Cette qualité de luzerne est la même référence que les travaux précédents (cf Thiébeau et al., 2001 et 2011).

Commenté [YM7]: Je ne suis pas spécialiste marchés, mais ne vaut-il pas évoquer un segment sur lequel elle entre en concurrence avec le soja d'importation plutôt que de lui prendre des parts de marché ?

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. Néanmoins, en l'absence d'information, ou de classification en « coproduit agricole », une valeur moyenne de 2600 PCI a été retenue, correspondant à 10,9 GJ/t de matière première.

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 rotations, 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 « black pellet (HPCI série C) », utilisé par deux UP, car aucune donnée n'a été trouvée dans la littérature.

Les valeurs retenues pour les différentes sources de biomasse sont donc les suivantes : bois (plaquettes, sciures, écorces) = 49% C ; miscanthus = 47% C ; black pellets = 55% C ; agro-pellets = 45% 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.

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

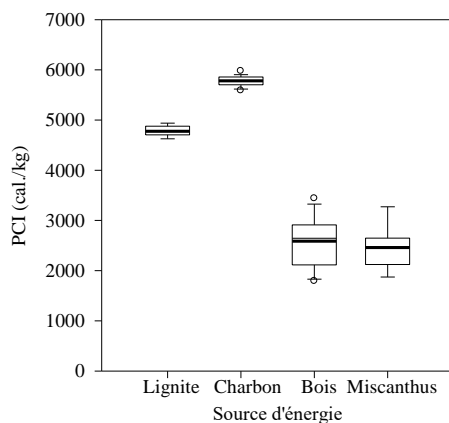
Commenté [YM8]: L'information est intéressante, mais je pense que d'un point de vue réglementaire, notamment concernant le système d'échange européen de gaz à effet de serre dit ETS, ils sont contraints d'y procéder. Nous pouvons nous en assurer au besoin, quelqu'un comme Thierry Hamerel dispose de cette information.

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. Compte tenu de l'utilisation de moins en moins importante du lignite, voire son abandon, par les UP, la modification des valeurs françaises retenue pour le charbon serait bénéfique à la filière de déshydratation.

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 dynamique 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 fournie pour l'alimentation d'un troupeau laitier à haut potentiel est de 6,4 GJ/t PF.

Les bilans moyens 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 processus 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., 2011).

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 :

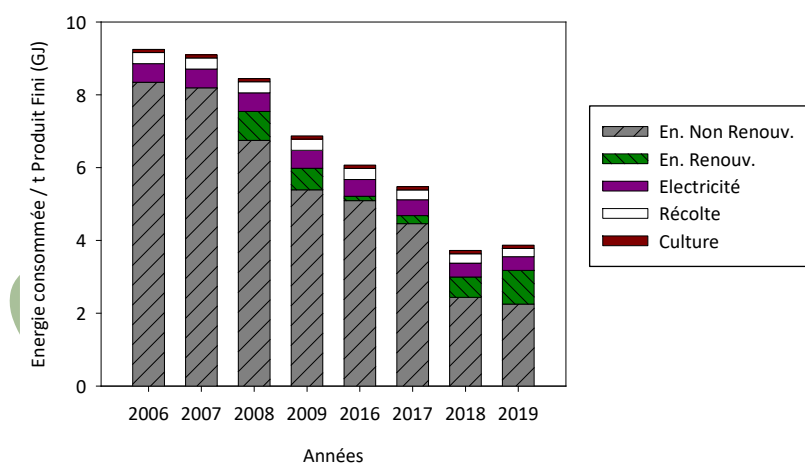
i) Au champ, d'une part, en abandonnant les ensileuses à sellette au profit d'ensileuses simple, suivies dans le champ par un tracteur et sa remorque. C'est ce dernier ensemble qui achemine le fourrage à l'UP. Cette modification technique du chantier de récolte a permis de réduire de 30% les consommations de carburant de ce poste.

ii) A l'usine d'autre part, en équipant les fours de brûleurs adaptés à l'incorporation massive de biomasse, plus riche en eau que le lignite et le charbon ; et en investissant sur les lignes de production 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 GJ/t produit fini (PF), devient significativement excédentaire depuis 2018-2019, +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 +3 GJ/t PF, et s'approche des +4 GJ/t PF pour les 3 UP présentes de 2006 à 2019 (Annexes 1a et 1b).

Commenté [YM9]: C'est un résultat renversant, très significatif, qu'il faudra bien prendre le temps d'expliquer notamment en conférence de presse, car cela appelle des notions avec lesquelles la presse notamment agricole n'est pas toujours familière. On constate en tous cas bien par ces chiffres un vrai changement de paradigme.

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

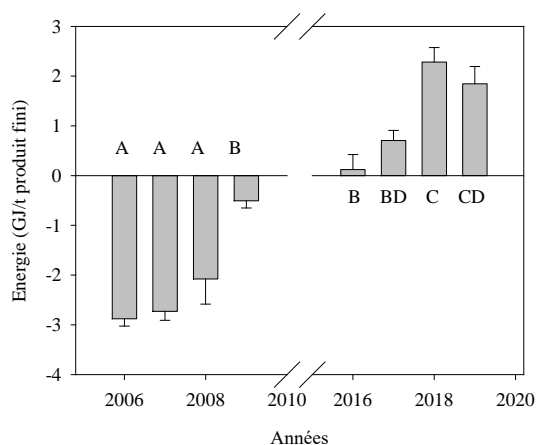


En. Non Renouv. = énergie non renouvelable (lignite + charbon)

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

Figure 3 : Moyennes des 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 ($P \leq 0,05$)



Commenté [YM10]: Cette figure est très illustrative des éléments mis en avant dans ma remarque précédente, c'est très visuel.

Bilan « Carbone »

La dynamique 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 désintéret 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 (± 8 kg) selon les rendements mesurés chaque année.

Commenté [YM11]: Il s'agit de l'autre éléments clé en termes de langage, et vous le formulez vraiment très bien ici.

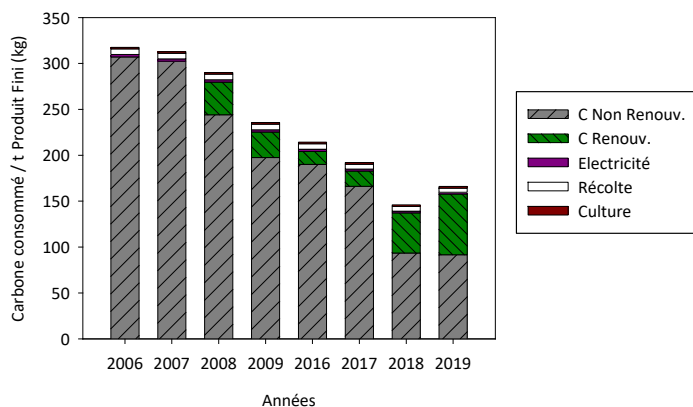
Les bilans moyens annuels « carbone » sont présentés **Figure 5**. Comme indiqué précédemment, les années 2006 et 2007 sont des campagnes de déshydratation dites de « référence ». Pour ces années, elles présentaient un bilan excédentaire d'un peu plus de 200 kg de carbone par tonne de produit fini. La 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 +380 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 460 kg C/t PF (**Annexe 2b**).

Commenté [YM12]: Et donc, non comptabilisé dans Agribalyse, autre point d'intérêt que nous devons avoir en tête et qui justifie pleinement l'engagement des travaux dont nous nous réjouissons que vous-même allez entreprendre sur le sujet.

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

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

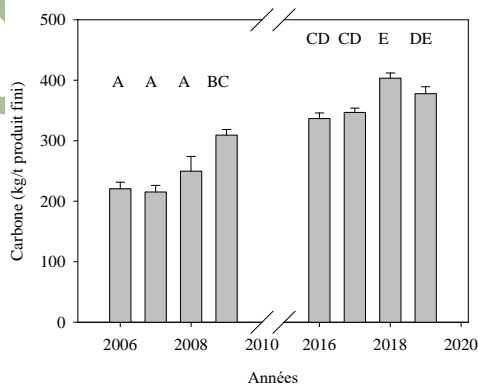
C Renouv. = carbone renouvelable, issue des biomasses végétales utilisées



Commenté [YM13]: On voit bien ressortir ici la baisse de 70% du carbone renouvelable consommé entre 2006 et 2019. Encore une fois, cette figure est très illustrative.

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<0,05)



Commenté [YM14]: J'imagine que cette représentation, comme celle du bilan énergie, est conventionnelle. Mais il est vrai qu'au premier abord, tel que me l'évoquait Thierry Hamerel, on s'attend à voir l'inverse d'un point de vue graphique : à savoir que quand on bascule en puits de carbone, on passe sous l'axe et inversément (tel que sont présentés usuellement les bilans internationaux). Là, il faut vraiment faire un exercice d'explication pour que personne ne se méprenne en conférence de presse, car sans lire l'article, ce n'est pas évident.

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. Alors qu'un effort très important a été engagé depuis 2018 pour recourir massivement aux sources d'énergies et de carbone renouvelables (**Figure 7**), le progrès important qui apparaît dès 2009 entre ces deux bilans reflète bien la réduction du recours à l'« énergie combustible » pour déshydrater le fourrage, consécutif au pré-séchage du fourrage au champ. Cette différence avec le bilan carbone s'accroît encore en 2018 et est maintenue en 2019, conséquence du nouveau changement de pratiques de récolte, qui réduit les consommations de carburant associées à la mise en œuvre de fours « biomasse » et de fours fonctionnant 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.

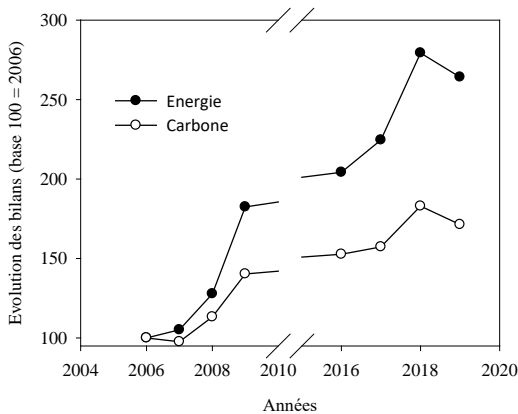
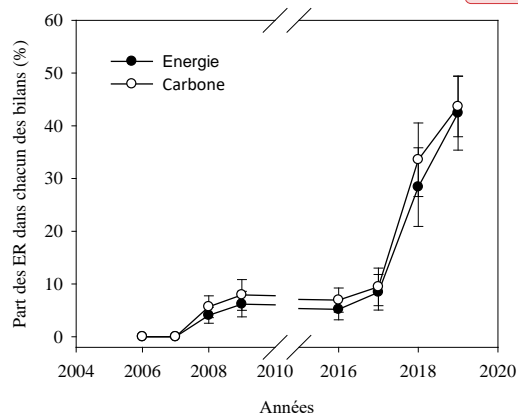


Figure 7 : Evolution de la part des énergies renouvelables (ER) dans chacun des bilans « énergie » et « carbone » pour les unités de production support de l'étude, de 2006 à 2019.



Commenté [YM15]: Attention, ici la formulation me semble écriquer la réalité. Les efforts ont été engagés progressivement pour rendre possible la massification de la substitution engagée de 2008 à 2012 ; et donc bien en amont de 2018, en adaptant et équipant un maximum de lignes avec des technologies adéquates. La seule inertie qu'il y a eu et cela, c'est entre nous, est liée à l'application unilatérale et totalement injustifiée de l'ETS à nos installations. En pénalisant l'économique, cette réglementation a retardé les évolutions ; jusqu'à ce que la puissance publique ne prenne les choses en main au niveau français avec en particulier la montée en puissance du fonds chaleur de l'ADEME qu'il faut saluer comme véritable levier.

Commenté [YM16]: Même remarque graphique que précédemment, et même mise en garde pour une communication orale à des non-sachants ou néo-intervenants sur le sujet ;)

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

Commenté [YM17]: Cela ne s'écrit peut-être pas dans un tel article, mais il faut reconnaître et saluer que cette adaptation de l'outil de production a été bien soutenue par la puissance publique sans laquelle il n'aurait pas été aussi significatif.

Commenté [YM18]: Il manque peut-être ici une notion de qualité de la biomasse qui est indispensable aux procédés de la filière (bois de scierie exclusivement, part grandissante de bois dit PEFC, etc.).

Les auteurs remercient Messieurs Thierry Hamerel, Directeur Général du groupe de luzerne déshydratée Luzéal, 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.

a supprimé: marne

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
- 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.* (2011). 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 & 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	-2,878 ±0,148	5,1	100	0	/	-2,878 ±0,148	5,1	100
2007	-2,730 ±0,179	6,6	105	0	/	-2,730 ±0,179	6,6	105
2008	-2,078 ±0,505	24,3	128	4,1 ±1,5	37,3	-1,780 ±0,548	30,8	138
2009	-0,506 ±0,145	28,7	182	6,2 ±2,4	39,1	-0,138 ±0,215	155,9	195
2016	0,121 ±0,301	248,8	204	5,2 ±2,0	38,2	0,407 ±0,245	60,2	214
2017	0,706 ±0,203	28,8	225	8,4 ±3,4	40,1	1,106 ±0,326	29,5	238
2018	2,282 ±0,293	12,8	279	28,4 ±7,5	26,3	3,193 ±0,491	15,4	311
2019	1,846 ±0,347	18,8	264	42,4 ±7,0	16,6	3,410 ±0,527	15,5	318

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	-2,737 ±0,064	2,3	100	0	/	-2,737 ±0,064	2,3	100
2007	-2,727 ±0,254	9,3	100	0	/	-2,727 ±0,254	9,3	100
2008	-1,700 ±0,473	27,9	138	5,4 ±1,0	17,7	-1,304 ±0,382	29,3	152
2009	-0,416 ±0,161	38,6	185	8,2 ±1,8	21,7	0,075 ±0,040	53,3	203
2016	0,346 ±0,284	82,0	213	3,3 ±1,0	29,4	0,517 ±0,309	59,8	219
2017	0,865 ±0,178	20,6	232	9,8 ±4,4	44,9	1,323 ±0,344	26,0	248
2018	2,562 ±0,124	4,8	294	35,2 ±4,3	12,3	3,672 ±0,160	4,4	334
2019	2,190 ±0,063	2,9	280	48,9 ±3,9	8,0	3,924 ±0,165	4,2	343

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

Moy. ±SE (kg C/t PF) : Moyenne ± 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. ±SE (kg C/t PF)	CV(%)	Indice	Moy. ±SE	CV(%)	Moy. ±SE (kg C/t PF)	CV(%)	Indice
2006	229,9 ±7,8	3,4	100	0	/	229,9 ±7,8	3,4	100
2007	217,9 ±15,0	6,9	95	0	/	217,9 ±15,0	6,9	95
2008	267,7 ±23,3	8,7	116	7,6 ±1,2	15,7	286,5 ±18,8	6,6	125
2009	313,5 ±11,6	3,7	136	10,6 ±1,7	16,6	336,8 ±6,2	1,8	147
2016	342,1 ±10,6	3,1	149	4,8 ±1,4	28,0	351,2 ±12,0	3,4	153
2017	351,4 ±7,6	2,2	153	10,8 ±4,7	43,5	370,0 ±13,1	3,5	161
2018	411,5 ±3,6	0,9	179	39,6 ±4,8	12,1	461,7 ±8,0	1,7	201
2019	388,8 ±4,5	1,2	169	49,1 ±2,5	5,1	460,7 ±0,7	0,2	200