



HAL
open science

Conduite des légumineuses pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la culture et de l'exploitation agricole

P. Thiébeau, Elise Lô-Pelzer, Katja Klumpp, Michael S. Corson, Catherine Hénault, Juliette Bloor, Emmanuel Le Sellier de Chezelles, Jean-François Soussana, Jean-Marie Lett, Marie-Hélène Jeuffroy

► To cite this version:

P. Thiébeau, Elise Lô-Pelzer, Katja Klumpp, Michael S. Corson, Catherine Hénault, et al.. Conduite des légumineuses pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la culture et de l'exploitation agricole. *Innovations Agronomiques*, 2010, 11, pp.45-58. 10.17180/tys8-e073 . hal-01173244

HAL Id: hal-01173244

<https://hal.science/hal-01173244v1>

Submitted on 30 May 2020

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

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



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

Conduite des légumineuses pour améliorer l'efficacité énergétique et réduire les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la culture et de l'exploitation agricole

Thiébeau P.¹, Lô-Pelzer E.², Klumpp K.³, Corson M.⁴, Hénault C.⁵, Bloor J.³, de Chezelles E.², Soussana J.F.³, Lett J.M.⁶, Jeuffroy M.H.²

¹ INRA UMR-FARE614, 2 esplanade R. Garros, F-51686 Reims Cedex 2

² INRA UMR Agronomie INRA-AgroParistech, BP 01, F-78850 Thiverval-Grignon

³ INRA UR874, 234 avenue de Brézé, F-63100 Clermont-Ferrand

⁴ INRA UMR SAS, 65 rue de Saint Briec, F-35042 Rennes Cedex

⁵ INRA UR Sols, 2163 avenue de la Pomme de Pin, F-45075 Orléans Cedex 2

⁶ CDER de la Marne, route de Suippes, F-51000 Châlons en Champagne

Correspondance : thiebeau@reims.inra.fr

Résumé

Cet article présente des résultats récents de mesures de protoxyde d'azote réalisées sur deux légumineuses : le pois protéagineux d'hiver et le trèfle blanc en association de graminées prairiales. Le pois, en comparaison avec d'autres grandes cultures dans des conditions pédo-climatiques identiques, est à l'origine de très faibles émissions de N₂O, aussi bien pendant son cycle cultural que pendant les mois qui suivent sa récolte. Les émissions mesurées sur prairies comportant du trèfle blanc sont similaires, quel que soit le taux de présence du trèfle dans la prairie, de 35% ou 19%, soit 6,6 et 3,2% de la matière sèche récoltée. Les émissions semblent davantage liées aux apports d'azote réalisés, bien que provenant majoritairement du pool d'azote du sol. En GC, à l'échelle d'exploitations « type », l'introduction des légumineuses a un effet bénéfique sur les bilans d'énergie non renouvelable (ENR) et de changement climatique (CC) ; qu'elles soient cultivées en culture pure ou en association avec une céréale. En système prairial, les bilans se montrent légèrement positifs entre systèmes intensifs (35% de maïs) et systèmes extensif (peu de maïs et plus d'herbe avec légumineuses) vis-à-vis de l'impact sur le CC. Un gain appréciable (27%) est obtenu vis-à-vis du bilan d'ENR, au profit des systèmes extensifs.

Mots-clés : légumineuses, grande culture, prairie, gaz à effet de serre, N₂O, Analyse du Cycle de Vie (ACV), bilan, énergie non renouvelable.

Abstract: Legume management to improve energy efficiency and reduce greenhouse gas emissions at crop and farm scales

This paper shows results on N₂O emissions by two legume crops: winter pea and white clover mixed with perennial grasses. Peas, which can be introduced into arable crop rotations, have low levels of N₂O emissions during the crop cycle and from crop residues during the following crop. White clover, with either 35% or 19% canopy cover (6.6 or 3.2% of harvested dry matter, respectively), shows similar N₂O emissions, linked to N fertilisation and soil mineral N. In typical arable-crop farms, introduction of legumes (as monocultures or mixed with cereals) has a positive impact, decreasing non-renewable energy use and global warming potential. In livestock systems, the results concerning the global warming potential are similar between intensive systems (35% of forage area in maize) and extensive systems (less maize and more grass-legume mixtures). Non-renewable energy use is significantly reduced (27%) with the extensive systems.

Keywords: legume crops, arable crop rotation, perennial grasses, greenhouse gas, N₂O, life cycle assessment, nutrient balance, non-renewable energy.

Introduction

L'agriculture contribue pour une large part aux émissions de gaz à effet de serre (GES) : 19% en 1990 et 17% en 2004 (Gaborit et Vincent, 2006). Ces émissions concernent notamment le dioxyde de carbone (CO₂), le protoxyde d'azote (N₂O), et, pour les exploitations d'élevage (fermentation entérique), le méthane (CH₄). Certains de ces gaz ont un pouvoir de réchauffement plus important que d'autres et/ou une durée de vie plus longue car ils sont stables chimiquement, et persistent dans l'atmosphère à l'échelle de la décennie, du siècle, voire plus longtemps encore ; ils ont une influence à long terme sur le climat. La contribution à l'effet de serre de chaque gaz se mesure grâce au pouvoir de réchauffement global (PRG), défini comme le forçage radiatif (c'est-à-dire la puissance radiative que le GES renvoie vers le sol). Cette valeur, calculée pour une durée de 100 ans, est attribuée en référence au CO₂ : PRG de 1 à l'échelle de 100 ans. Dans cet ordre, le méthane a un PRG de 25, et le N₂O a un PRG de 298 (IPCC, 2007). En France, avec 76% des émissions nationales, l'agriculture est la source majoritaire d'émission de N₂O (Gaborit et Vincent, 2006). Or, le protoxyde d'azote est le GES pour lequel on trouve également peu de références ; c'est pourquoi nous concentrons notre exposé sur cet élément.

La production de N₂O fait intervenir deux processus microbiens majeurs : la nitrification aérobie et la dénitrification anaérobie (Davidson, 1991 ; Wrage *et al.*, 2001). L'intensité des flux entre le sol et l'atmosphère dépend largement d'un certain nombre de paramètres physiques du sol, parmi lesquels la température et le taux de saturation en eau de la porosité du sol qui apparaissent comme des facteurs majeurs (Smith *et al.*, 2003 ; Oenema *et al.*, 2005). De fortes teneurs en NO₃⁻ et en NH₄⁺ (Skiba *et al.*, 1998 ; Jones *et al.*, 2007) vont favoriser l'émission de N₂O. L'effet du pH sur cette production semble plus complexe, puisque si Yamulki *et al.* (1997) notent une tendance à l'augmentation des émissions de N₂O avec celui-ci, ils envisagent aussi des adaptations possibles des communautés microbiennes, en sols très acides (pH de l'ordre de 4), amenant une production substantielle de N₂O. La température du sol est un autre grand facteur de régulation des émissions de N₂O : son augmentation va entraîner une augmentation exponentielle des émissions de N₂O (Smith *et al.*, 2003). En conditions naturelles, à taux de saturation en eau de la porosité du sol constant, les émissions de N₂O suivent les variations journalières de la température du sol (Smith *et al.*, 1998). Enfin, le levier sur lequel l'agriculteur peut agir concerne la fertilisation azotée. En effet, la quantité et la forme d'azote apporté vont influencer l'amplitude et la durée des pics d'émission, en modifiant certains paramètres physico-chimiques du sol (Clayton *et al.*, 1997 ; Oenema *et al.*, 2005 ; Jones *et al.*, 2007).

L'effet des légumineuses sur les émissions de N₂O au champ reste un sujet de débat (Carrouée *et al.*, 2006). Dans le passé, on a considéré (hypothèse retenue par l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) en 1997) que les émissions de N₂O issues de l'azote fixé symbiotiquement étaient équivalentes à celles issues d'un apport d'engrais azoté. Or, en comparant les émissions de N₂O de la luzerne et du soja à celles d'une fléole des prés (*Phleum pratense* L.) non fertilisée, Rochette *et al.* (2004) montrent que les émissions des cultures de légumineuses ne sont pas systématiquement supérieures à celles de la culture de graminée, et en tout état de cause, sont inférieures à celles prédites par les coefficients de l'IPCC (2001). De même, à partir d'une base de données issue de la littérature, Rochette et Janzen (2005) montrent, en moyenne, que l'émission de N₂O serait plus importante pour les légumineuses fourragères pures, intermédiaire pour les légumineuses annuelles, et plus faibles pour les légumineuses associées à des graminées ; mais dans tous les cas, surestimées par les coefficients de l'IPCC. Ces nouveaux éléments ont permis de modifier les recommandations de l'IPCC en 2006, qui propose maintenant de ne pas prendre en compte la fixation symbiotique de l'azote pour le calcul des émissions de N₂O. Cependant, les données permettant de valider cette hypothèse sont rares et nécessitent d'être complétées.

Par ailleurs, les résidus, en général laissés au champ, d'une culture de légumineuses à graines ou fourragère, sont riches en azote (Muller *et al.*, 1993). Or, leur décomposition pourrait induire une dénitrification importante, qui pourrait être à l'origine d'émissions de N₂O plus importantes que lors de la décomposition de résidus de céréales. De même, la rhizodéposition, c'est-à-dire le retour au sol (via les

racines de la plante vivante) d'une partie de l'azote absorbé lors de la fixation ou de l'assimilation, est importante chez les légumineuses. Des travaux réalisés au Danemark avec la méthode des split-root (Jensen, 1996 ; Germon, 1998) indiquaient des quantités d'azote rhizodéposé d'une dizaine de kg/ha/an. Plus récemment, avec une méthode différente, également en laboratoire, Mayer *et al.* (2006) ont trouvé que l'azote rhizodéposé pouvait représenter 13 à 16% de l'azote total de la plante, soit environ 30 kg.ha⁻¹. L'estimation des quantités d'azote mises en jeu par ce processus est difficile à appréhender, et contribue aux hypothèses qui sont formulées sur les émissions de N₂O au champ chez les légumineuses.

En système prairial, de nombreuses études ont montré que le mode de gestion de la prairie influence beaucoup les flux de N₂O. En effet, l'animal à la pâture va influencer le cycle prairial de l'azote par le piétinement, les dépôts d'urines et de fèces, qui vont favoriser la création de hots spots locaux d'émission du N₂O (Yamulki *et al.*, 1998 ; Menneer *et al.*, 2005 ; Ambus *et al.*, 2007). Des travaux récents à partir de mélanges d'espèces végétales indiquent que la diversité spécifique et la présence de légumineuses peuvent modifier les émissions de N₂O des sols de prairie (Niklaus *et al.*, 2006). Ces auteurs suggèrent que le trèfle, de par ses activités fixatrices et la production de composés azotés, stimule la production de N₂O en prairie. Mais Carter et Ambus (2006) indiquent que sur le long terme, la minéralisation des tissus morts de légumineuses revêt probablement plus d'importance pour la production de N₂O que l'azote récemment fixé par celle-ci. L'impact de la structure de la communauté végétale est donc peu documenté.

L'introduction des légumineuses dans les rotations permet de diminuer l'apport d'engrais azoté, à la fois sur la légumineuse elle-même, mais aussi sur la culture suivante (Muller *et al.*, 1993 ; Justes *et al.*, 2001). La diminution des apports d'engrais minéraux, responsables en grande partie de la consommation énergétique liée à la conduite des cultures, doit permettre également d'améliorer les bilans énergétiques des systèmes de culture.

Dans cet article, nous présentons de récents résultats de mesures de N₂O, réalisées sur culture de pois protéagineux, en région de grandes cultures (bassin parisien), et sur prairie comportant du trèfle blanc, en zone d'élevage (massif central). Ces résultats, ainsi que des résultats concernant l'efficacité énergétique de la culture du pois (associé ou non à une céréale) comparée à un blé pur, sont ensuite introduits au sein de modèles de calculs d'analyses de cycles de vie (ACV), afin d'étudier l'impact de l'introduction de légumineuses au sein d'assolements agricoles sur les bilans énergétiques et de GES.

Mesures d'émission de N₂O sur légumineuses de grande culture et prairiale

Incidence de l'introduction d'une culture de pois protéagineux dans une rotation composée de colza et de blé

Dans le cadre du projet financé par le Compte d'Affectation Spécial pour le Développement Agricole et Rural (CASDAR) 7-175 « Amélioration des performances économiques et environnementales de systèmes de culture avec pois, colza et blé », des mesures directes d'émissions de N₂O ont été réalisées, au champ, en comparant le pois avec d'autres espèces (blé et colza, fertilisés ou non), cultivées dans les mêmes conditions pédo-climatiques. Par ailleurs, dans les mêmes conditions expérimentales au champ, des mesures réalisées à l'automne, derrière ces différentes cultures, ont permis de comparer les émissions liées aux résidus de ces différentes cultures.

Matériel et méthode

L'essai a été conduit en sol limono-argileux du domaine expérimental INRA de Grignon, de 2007 à 2010. Cet essai comporte différentes successions de cultures d'hiver impliquant pois (*Pisum sativum*

L.), colza (*Brassica napus* L.) et blé (*Triticum aestivum* L.), permettant de comparer les émissions non seulement à l'échelle de la culture, mais également à l'échelle de la succession.

Les mesures d'émissions ont été réalisées grâce à des chambres, mises en place au début du cycle cultural, à raison de 2 chambres sur chacun des 3 blocs pour chaque modalité expérimentale analysée. Les mesures ont été réalisées 4 fois dans les deux semaines qui ont suivi un apport d'azote, une fois par semaine au cours des deux semaines suivantes, puis une fois par mois pendant le reste du cycle cultural. Ce protocole a permis de réaliser environ 30 jours de mesures par an. Les quantités de N_2O émises dans chaque chambre ont été calculées à partir du suivi de la concentration en N_2O réalisé par prélèvement du gaz dans la chambre, lors de sa fermeture, puis toutes les 45 minutes, de manière à disposer de 4 prélèvements par chambre.

Résultats et discussion

Sur l'ensemble des mesures réalisées, il apparaît que les pics d'émission sont assez faibles du fait des conditions pédo-climatiques de l'essai (résultat confirmé par des suivis réalisés sur une expérimentation réalisée dans une parcelle voisine). Les pics n'ont jamais dépassé $10 \text{ g N-N}_2\text{O}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{j}^{-1}$ en moyenne sur l'ensemble des modalités expérimentales.

De plus, l'analyse globale des pics d'émission montre que ceux-ci ont lieu principalement lorsque la disponibilité d'N à la surface du sol est importante (consécutif à un apport d'engrais azoté par exemple, Figure 1), et la température de l'air et l'humidité du sol sont élevées.

Les émissions observées sous blé fertilisé et non fertilisé montrent que la fertilisation azotée joue un rôle important dans les émissions. En l'absence de fertilisation, on assiste à une quasi absence d'émission (Figure 1). Par ailleurs, les émissions sur blé et colza fertilisés sont comparables.

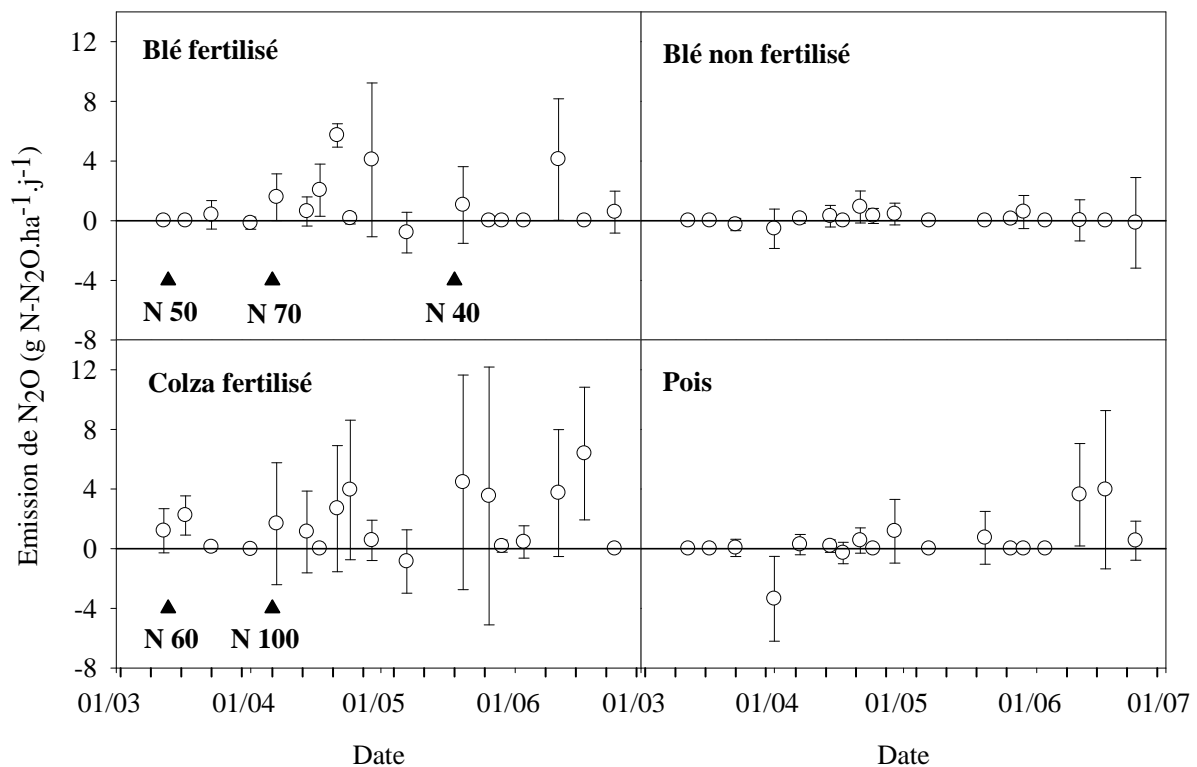


Figure 1 : Emissions de N_2O mesurées sur cultures de colza, de blé et de pois au printemps 2009.

La comparaison des émissions pendant la culture de pois et pendant la culture de blé (ou du colza), fertilisé ou non montre, sur les trois années de mesure, que le comportement du pois est proche de celui d'un blé ou d'un colza non fertilisés, conduisant à des émissions quasiment absentes pendant tout le cycle de la culture (Figure 1).

Enfin, les mesures réalisées à l'automne, pendant les différentes campagnes culturales, indiquent que les émissions de N_2O après le précédent cultural pois ne sont pas significativement différentes de celles mesurées derrière les autres cultures de blé (Figure 2) ou de colza (non présenté).

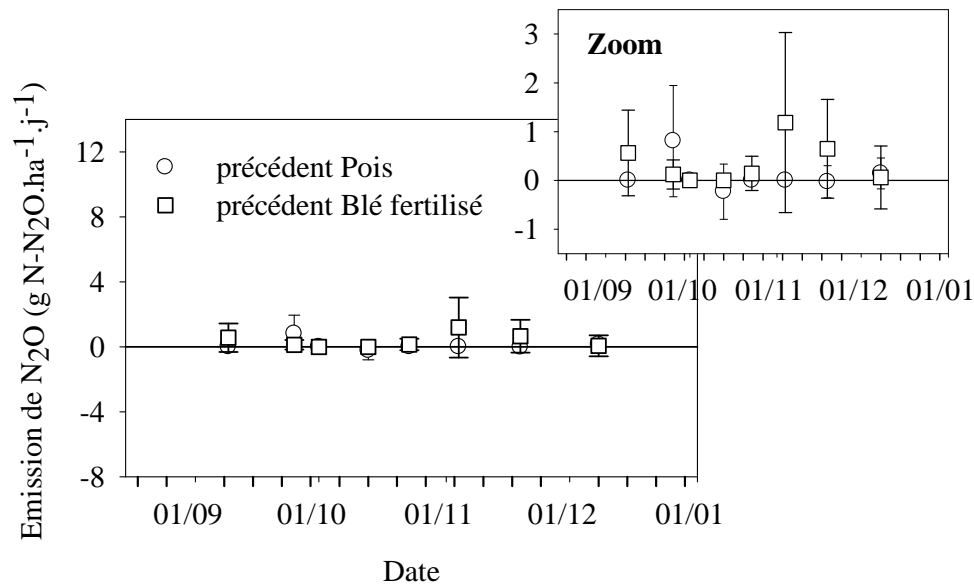


Figure 2 : Comparaison de l'émission de N_2O sous culture de colza, ayant comme précédent un blé ou un pois, au cours de l'automne 2008.

L'ensemble des résultats acquis montre que les successions comportant un pois ou une culture non fertilisée émettent, en cumulé pendant tout le cycle, moins de N_2O que les successions comportant uniquement des cultures fertilisées. L'introduction du pois dans les rotations est donc un moyen efficace de réduire les émissions de GES par l'agriculture, ce qui confirme des résultats présentés par d'autres auteurs (e.g., Nemecek *et al.*, 2008).

Incidence d'une présence différenciée de trèfle blanc dans une prairie pâturée sur les émissions de N_2O

L'effet de patch de légumineuses sur les émissions de N_2O en prairie pâturée a été étudié sur le site INRA de Laqueuille (Auvergne), avec une approche par marquage isotopique (Klump *et al.*, 2010). Seuls les résultats liés aux émissions de N_2O sont présentés ci-dessous.

Matériel et méthode

L'essai a été conduit en sol limono-sablo-argileux du domaine expérimental INRA de Laqueuille, en 2008. Cet essai comprenait deux modalités de présence de trèfle blanc (*Trifolium repens* L.) : une haute (Trèfle +) et une basse (Trèfle -) correspondant respectivement à un taux de présence de trèfle dans la prairie de $35 \pm 4\%$ et $19 \pm 4\%$, soit 6,6 et 3,2% de la MS récoltée, ce qui est assez faible. Le trèfle était cultivé en association à du pâturin des prés (*Poa pratensis* L.), du dactyle aggloméré (*Dactylis*

glomerata L.), de l'avoine jaunâtre (*Trisetum flavescens* L.) et de l'agrostide commune (*Agrostis capillaris* L.).

Les mesures d'émissions de N_2O ont été réalisées à l'aide de huit chambres automatiques (quatre par modalité), couplées à un analyseur infrarouge. Chaque chambre se ferme automatiquement pendant 30 minutes, au cours desquelles un échantillon d'air est prélevé et analysé automatiquement toutes les 30 secondes. Les chambres se ferment par séquence, de telle sorte qu'une même chambre est de nouveau fermée à quatre heures d'intervalle.

Pendant l'étude, qui s'est déroulée du 12 mai à la fin octobre 2008, la prairie a reçu deux apports d'azote, respectivement de 57 et 100 $kg\ N\cdot ha^{-1}\cdot j^{-1}$. Les animaux n'ont pu accéder aux enceintes. Le pâturage a été simulé par coupes, sans recevoir de déjections animales au cours de la période d'étude.

Résultats et discussion

Au cours de l'étude, l'amplitude des émissions de N_2O a été comprise entre 0,01 et 54,4 $g\ N_2O\cdot ha^{-1}\cdot j^{-1}$ (Figure 3). Elle montre un effet significatif de la variabilité de leurs émissions au cours de la saison (coefficients de variation de 250% et 194% respectivement pour les densités de trèfle haute et basse). Les émissions les plus fortes ont été observées dans les 50 premiers jours de l'étude, de mai à juin, et sont devenues significativement plus faibles à partir du mois d'août. Les pics d'émissions les plus importants sont observés sur les 2 modalités de trèfle, comme une réponse directe à l'apport d'azote initial ; les réponses au second apport d'azote ayant été plus limitées, en relation avec les conditions plus sèches du sol (Figure 3).

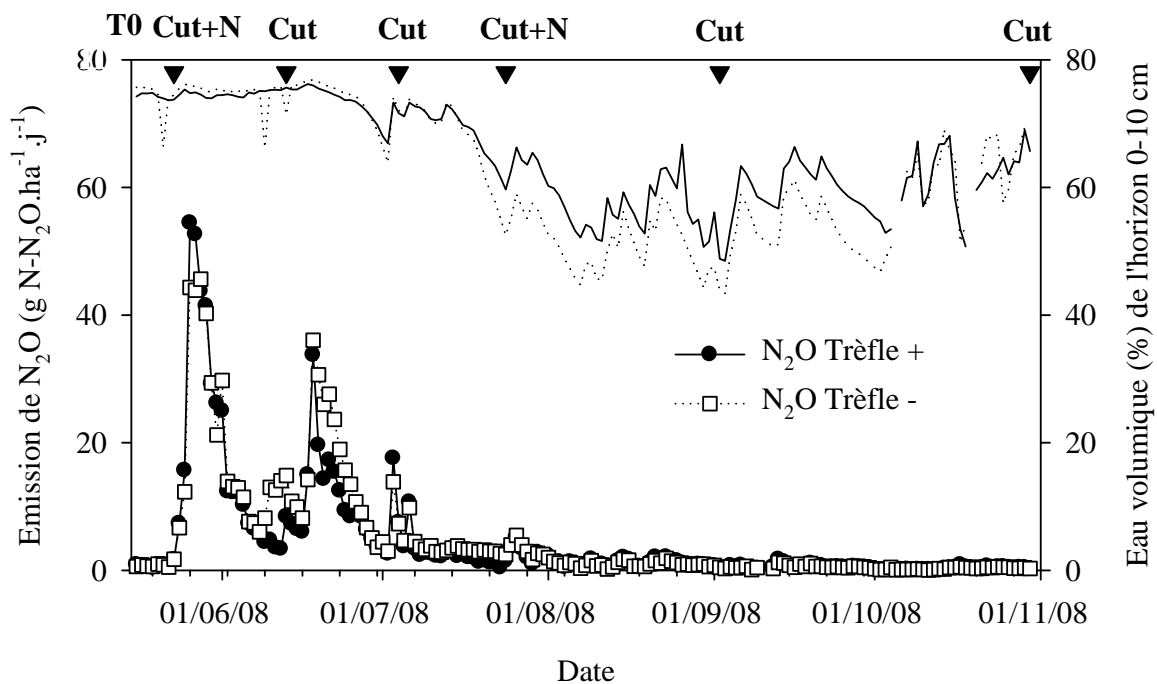


Figure 3 : Emissions de N_2O mesurées sur prairie avec forte (Trèfle +) et faible (Trèfle -) proportion de trèfle blanc. Les dates de coupe (Cut) et d'apport d'engrais azoté (+N) sont indiquées en haut de la figure.

Les émissions cumulées de N_2O entre chaque coupe montrent un effet significatif de la date de coupe ($P < 0,001$), mais pas d'effet de la densité de trèfle ($P > 0,1$). En moyenne, l'émission de N_2O correspond à 0,6% de l'azote apporté par fertilisant au bout de 6 mois de suivi, ce qui est dans la partie basse de la proportion relevée dans la littérature, comprise entre 0,4 et 5,2 % (Clayton *et al.*, 1997 ; Rudaz *et al.*,

1999 ; Abdalla *et al.*, 2009). Le résultat assez faible obtenu est sans doute lié aux faibles températures de ce site d'étude.

Des mesures actuellement en cours sur cultures de luzerne pure, sur le site INRA d'Estrées-Mons, semblent indiquer les mêmes tendances qu'avec le trèfle : très peu d'émission en cours de culture, quelques petits pics notés après chaque coupe (B. Mary, com. pers.), confirmant les travaux de Rochette *et al.* (2004) sur culture de luzerne : émissions moyenne de $N_2O = 0,48 \pm 0,33\%$ de l'azote fixé ($n=5$). Ceci laisse penser également que la faible proportion de trèfle blanc dans la MS récoltée n'est pas le facteur qui minimise l'émission de N_2O dans les travaux de Klumpp *et al.* (2010).

L'azote apporté sous forme de ^{15}N a montré que le pool d'azote du sol est une source importante d'émission de N_2O . Après une application d'azote au printemps, 60% du N_2O émis a pour origine l'azote du sol, ce qui corrobore d'autres travaux conduits sur prairie (Linzmeier *et al.*, 2001 ; Lampe *et al.*, 2006).

Enfin, des analyses de régression multiples montrent que l'abondance de trèfle modifie les relations entre les facteurs abiotiques (température du sol, humidité) et les émissions de N_2O . Cependant, la variabilité spatiale du trèfle ne semble pas avoir un fort impact sur le bilan annuel du N_2O à l'échelle de la parcelle pour des prairies soumises à une gestion intensive. En revanche, le trèfle pourrait avoir un effet stabilisateur sur les émissions de N_2O , diminuant la dépendance de ces émissions vis-à-vis des conditions climatiques.

Impact de l'introduction de légumineuses sur les bilans énergétique et de GES

Impact sur le bilan énergétique

Dans le cadre du projet Association du Développement Agricole et Rural (ADAR) 202 sur les associations céréales-légumineuses (Baranger *et al.*, 2008), des parcelles expérimentales réparties à travers la France ont été suivies pendant deux années consécutives afin d'évaluer les performances agronomiques (rendement, qualité, efficacité d'utilisation de l'azote minéral), environnementales (risque de lessivage de nitrate, recours aux pesticides) énergétiques et économiques des associations céréales-légumineuses pour des débouchés grains et fourrages. En fonction des sites, les modes de conduites étaient conventionnel, intégré ou biologique. Les résultats concernant les performances énergétiques pour la production de grains sont présentés ici.

Matériel et méthode

Le coût énergétique de production a été estimé pour cinq sites communs pour les deux années, ainsi que deux sites supplémentaires la première année et un site la deuxième année. Les modalités présentées sont : pois pur (P), blé pur avec fertilisation azotée (W), blé pur sans azote (W0), pois-blé avec fertilisation azotée (WP), pois-blé sans azote (WP0). Les associations pois-blé sont semées à demi-densité par rapport aux cultures pures. La fertilisation azotée est apportée selon la méthode du bilan, avec un objectif de rendement de la céréale divisé par deux pour les associations. Le travail du sol et les modes de traitements phytosanitaires varient en fonction des sites.

L'estimation du coût énergétique inclut le machinisme (travail du sol, semis, pulvérisation, épandage et récolte), la fertilisation azotée et les produits phytosanitaires, estimés selon la méthode INDIGO[®] (Bockstaller *et al.*, 2009) : quantité Azote x coefficient énergétique de l'azote, ou quantité de matière active x coefficient énergétique matière active. Le détail des opérations de travail du sol n'étant pas connu sur l'ensemble des sites, mais ne différant pas selon les modalités dans chaque site, il a été fixé à un labour et un passage de herse quels que soient les sites et les modalités. A l'aide de la mesure de rendement sur les différents sites et pour les différentes modalités, une efficacité énergétique a été

estimée grâce au ratio coût énergétique de production/rendement : plus ce ratio est faible, plus l'efficacité est importante.

Résultats et discussion

L'effet modalité est significatif sur la consommation et l'efficacité énergétique, quels que soient l'année et le site. Le coût énergétique de production, essentiellement lié à l'utilisation d'engrais azoté, est significativement plus faible pour les modalités sans azote (P, W0 et WP0) et pour l'association fertilisée (WP) que pour le blé fertilisé (W). Ramenée au rendement, la consommation énergétique pour produire un quintal est significativement plus élevée pour le blé que pour les autres modalités. La modalité association fertilisée présente par ailleurs une efficacité équivalente à celle du pois pur ou du blé non fertilisé. La modalité association sans azote présente la meilleure efficacité.

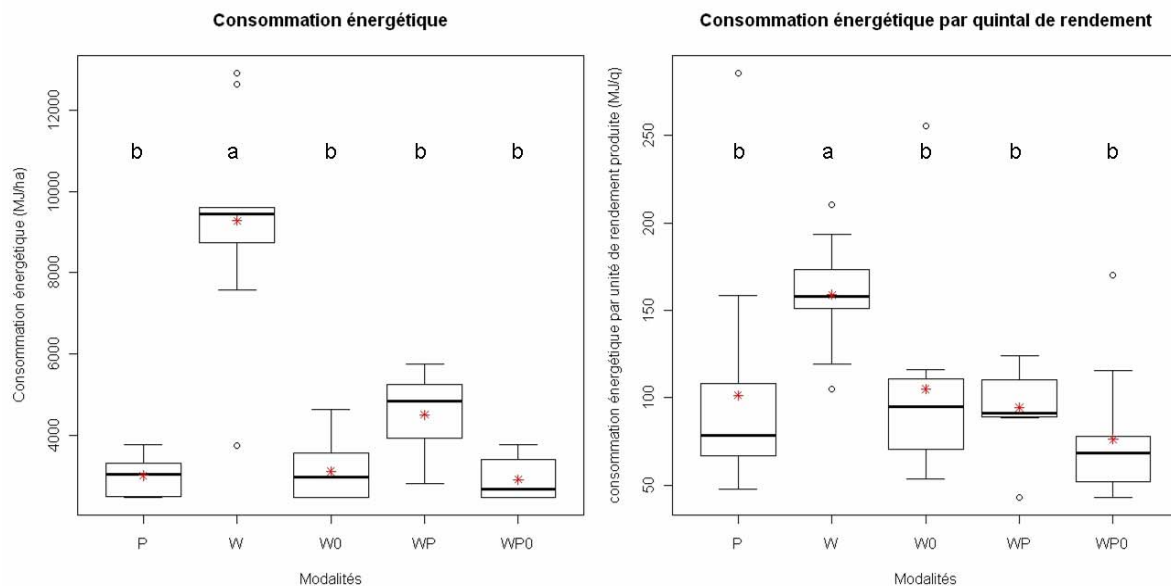


Figure 4 : Estimation du coût énergétique de production et de l'efficacité énergétique calculée par le ratio coût énergétique/rendement (plus le ratio est faible, plus l'efficacité est importante), en fonction des modalités : P : pois pur (sans azote), W : blé pur avec fertilisation azotée, W0 : blé pur sans azote, WP : pois-blé avec fertilisation azotée, WP0 : pois-blé sans azote. Les étoiles représentent les moyennes.

Ces résultats montrent l'intérêt des légumineuses par rapport aux céréales, puisqu'elles présentent une consommation énergétique plus faible et une meilleure efficacité énergétique. La réintroduction des légumineuses dans les rotations présente donc un avantage en termes de performances énergétiques. Par ailleurs, ces travaux montrent l'intérêt des associations qui peuvent permettre de produire des céréales à des coûts énergétiques moindres, du fait d'une diminution (ou d'une absence d'utilisation) de l'engrais azoté, grâce à l'association avec la légumineuse.

Impact sur le bilan de gaz à effet de serre

Ce bilan a été abordé par l'ACV, qui est une approche utilisée pour quantifier les impacts de systèmes agricoles dans plusieurs domaines : changement climatique, utilisation d'énergie non-renouvelable (Haas *et al.*, 2000). Cette méthode estime les impacts dits « directs », qui ont lieu sur une exploitation, et ceux dits « indirects », dus à la production et le transport des intrants à la ferme depuis l'extraction des matières premières. L'ACV permet aussi d'identifier des transferts d'impact entre catégories : une réduction d'utilisation de produits phytosanitaires peut engendrer une augmentation de quantité de

gazole (diesel) utilisée par exemple pour gérer les mauvaises herbes par le travail du sol plutôt que par des herbicides.

Matériel et méthode

Les ACV ont été réalisées sur des fermes types, issues d'études exploratoires. Une typologie de 5 fermes conventionnelles (i.e., non-biologiques) a été construite : deux fermes de région de « grande culture » et trois fermes d'élevage laitier.

Les assolements des deux fermes de grande culture ont été établis à partir de données réelles d'exploitations non-diversifiées (pas de culture spéciale, pas d'animaux) et betteravières de Champagne crayeuse sur les récoltes 2005 à 2009 (CDER de la Marne). Le tri de ces exploitations selon leur surface en légumineuses a permis d'identifier deux groupes homogènes de 458 exploitations chacun, un dont la proportion de légumineuses est de 5% (taux bas), l'autre dont la proportion est de 20% (taux haut).

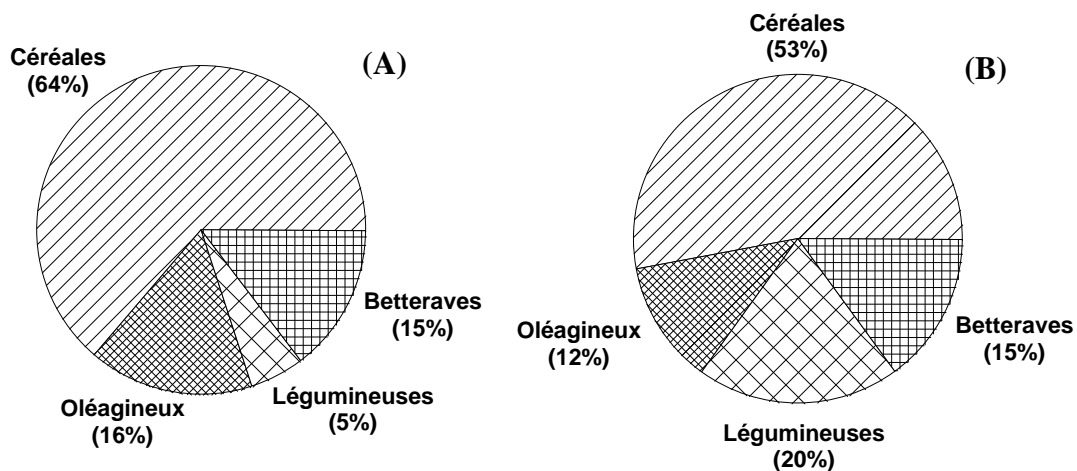


Figure 5 : Répartition de l'assolement des deux exploitations de grandes cultures (%): avec peu de légumineuses (A) ou significativement plus (B).

La surface agricole utile (SAU) des exploitations est de 157,6 ha et 169,2 ha respectivement pour le taux bas et le taux haut de légumineuses. Leur surface en légumineuses concerne majoritairement de la luzerne, puis du pois, de la féverole et de la vesce.

Les caractéristiques des fermes d'élevage types ont été établies à partir des données d'un échantillon d'exploitations laitières du réseau ETRE et BIO de Bretagne, évaluées avec l'outil EDEN-E (van der Werf *et al.*, 2009). Un type représente des fermes avec plus de 35% de maïs dans la SFP (« maïs herbe »). Les 2 autres types ont moins de 35% de maïs dans la SFP et un taux de légumineuses dans la surface herbagère qui est élevé (« herbe légumineuses (+) ») ou bas (« herbe légumineuses (-) »). Pour être proche de taux d'incorporation de légumineuses observés dans les fourrages, nous retenons les valeurs de 30 et 10% de la MS pour « (+) » et « (-) », respectivement, avec un rendement de 5,8 t MS.ha⁻¹.an⁻¹. L'assolement des fermes « maïs herbe » et « herbe légumineuses (+) » représentent respectivement la moyenne de 7 et 10 fermes de chaque type identifié (Tableau 1).

L'assolement des fermes « herbe légumineuses (+) » a été utilisé pour les fermes « herbe légumineuses (-) » pour réduire les différences dans les résultats dues à l'assolement. La quantité de lait produit représente la moyenne de 6 à 10 fermes de chaque type identifié dans l'échantillon. Par contre, les autres caractéristiques des exploitations – rations ; bâtiments ; épandage d'effluents ; achats d'engrais minéraux, concentrés, céréales, et fourrages ; ventes de céréales et fourrages ;

phytosanitaires utilisées ; consommation d'énergie et plastiques – ont été tirées de une ou deux fermes de chaque type dans l'échantillon et éventuellement ajustés par rapport à l'assolement. Les « surfaces indirectes » mentionnées correspondent aux surfaces nécessaires à la production des intrants végétaux utilisés sur l'exploitation. Les résultats de l'ACV sont exprimés en prenant en compte ces surfaces supplémentaires.

Tableau 1 : Surface par culture et pourcentage de matière sèche des légumineuses dans l'herbe dans les fermes types d'élevage laitier. L'effectif du cheptel laitier est exprimé en Unité Gros Bovins (UGB).

Type	SAU (ha)	« surfaces indirectes » (ha)	SFP (ha)		blé (ha)	% MS de légumineuses dans l'herbe	cheptel (UGB)	production lait par VL (kg.an ⁻¹)
			herbe	maïs				
maïs herbe	54,4	14,1	27,6	18,9	7,9	3,2	71,3	7756
herbe légumineuses (+)	61,6	2,7	51,7	4,0	5,9	30,0	71,3	5838
herbe légumineuses (-)	61,6	2,7	51,7	4,0	5,9	10,0	71,3	5838

Les catégories d'impact d'intérêt étaient le changement climatique (en kg équivalent CO₂) et l'utilisation d'énergie non-renouvelable (NR, en MJ), les deux exprimées par ha de surface globale (SG = SAU + surfaces indirectes) de chaque type de ferme. Le calcul des émissions et impacts potentiels pour les fermes de grande culture a été fait avec le logiciel SimaPro 7.2.4 (PRé Consultants, 2008), qui contient une base de données (INRA, UMR SAS de Rennes) sur les itinéraires techniques, les gestions, les rendements, et les émissions de chaque culture en France. Cette base de données fait appel à d'autres bases, telle que « ecoinvent 2.0 » (Frischknecht *et al.*, 2007), pour estimer les émissions dues à d'autres activités telles que la fabrication d'engrais, la construction de bâtiments, et le transport. Le calcul des émissions et impacts potentiels pour les fermes d'élevage a été fait avec l'outil EDEN-E.

Résultats et discussion

Pour les exploitations de grande culture, les données recueillies ne permettent pas de distinguer des charges différenciées entre cultures pour l'un ou l'autre groupe d'exploitation. Les rendements obtenus ont tendance à être plus élevés en situation à plus forte proportion de légumineuses, sans différence significative (données non montrées). Les résultats de l'ACV indiquent une diminution des impacts de changement climatique (-4%) et d'utilisation d'énergie non-renouvelable (-5%) par hectare de SAU pondéré des assolements respectifs, en faveur des exploitations disposant de 20% de surface occupée par des cultures de légumineuses (Tableau 2). Ces valeurs peuvent paraître modestes, mais ramenées à l'échelle d'une exploitation disposant de 20% de surface en légumineuses, cela évite le rejet de plus de 16400 kg équivalent CO₂ et l'emploi de 153500 MJ d'énergie non-renouvelable.

Ces résultats sont en accord avec ceux de Nemecek *et al.* (2008) qui ont réalisés des ACV détaillées de rotations avec légumineuses. Ces auteurs justifient ce résultat par trois facteurs : 1/ les légumineuses n'ont pas besoin d'apport d'engrais azoté pour leur culture, ce qui réduit fortement le poste « fertilisants et nutriments » (seuls des apports de P et K sont nécessaires) ; 2/ les apports d'azote sur la culture suivante sont réduits pour tenir compte de la minéralisation de résidus plus riches en azote qu'une paille de céréale ; 3/ le contexte de la récolte peut conduire à une réduction de travail du sol, en s'affranchissant d'un labour consommateur d'énergie fossile.

Tableau 2 : Impacts potentiels de changement climatique (CC, kg équivalent CO₂) et d'utilisation d'énergie non-renouvelable (NR, MJ) par ha de culture (émissions de CO₂, N₂O, CH₄ principalement), et moyenne pondérée de l'assolement respectif de chaque type de ferme de grande culture.

		CC (kg éq. CO ₂)	Energie NR (MJ)
Céréales	Blé	2659	17600
	Escourgeon	2238	16494
	Orge	1735	10125
	Maïs grain	3072	18532
Oléagineux	Colza	2849	23263
	Tournesol	1411	9362
Légumineuses	Pois	1337	12048
	Féverole	1016	9905
	Luzerne	1968	10092
Autre	Betterave	2099	21457
Taux de Légumineuses :			
Ferme (pondéré par l'assolement)	Bas	2337	16904
	Haut	2240	15997

Pour les fermes d'élevage laitier, le bilan global d'impact sur le changement climatique affiche un gain de 7% en faveur des exploitations avec légumineuses (5861 ± 75 kg éq. CO₂/ha SG). Ce résultat peut paraître faible, mais ces systèmes induisent une conduite d'élevage où les animaux passent davantage de temps au pâturage qu'en système intensif maïs-herbe, générant des émissions liées aux excréments animales ayant un impact plus important (simulations réalisées à effectif animal constant).

En revanche, les exploitations type herbe avec légumineuses utilisent 27% d'énergie non-renouvelable de moins que l'exploitation maïs-herbe : respectivement 13008 (±270) MJ et 17924 MJ/ha SG. Cette différence est liée aux postes achats d'engrais et d'aliments, en baisse par rapport à l'exploitation maïs-herbe.

Le bilan, à l'échelle de l'exploitation, montre que le système « herbe avec légumineuses » réduit ses émissions d'environ 30 200 kg éq. CO₂ et l'emploi de 316 100 MJ d'énergie non-renouvelable.

Conclusion

L'introduction de légumineuses dans les assolements français, qu'ils soient de grande culture ou d'élevage, présente de nombreux atouts vis-à-vis des émissions de N₂O. En grandes cultures, les successions comportant un pois émettent moins de N₂O que celles comportant uniquement des cultures fertilisées. En système prairial, la densité de trèfle blanc n'a pas d'effet significatif sur le niveau d'émission, mais sa densité semble les stabiliser en diminuant leur dépendance vis-à-vis des conditions climatiques. Après une application d'azote au printemps, les émissions liées au pool d'azote du sol sont apparues majoritaires (60%) par rapport à celles issues de la prairie avec trèfle, corroborant les travaux de Linzmeier *et al.* (2001) et Lampe *et al.* (2006), conduits sur prairie.

L'agriculteur peut agir sur le niveau d'émission de GES en limitant les apports d'engrais azoté au strict nécessaire (réalisation de bilans d'azote à la parcelle), en mettant en œuvre des techniques culturales limitant la lixiviation d'azote (absorption par des couverts intermédiaires), et en limitant le nombre

d'interventions consommatrices d'énergie fossile (remplacement d'un labour par un travail du sol simplifié). Sur prairie, il peut agir en réalisant une conduite raisonnée du pâturage, qui incite à limiter le piétinement du sol par les animaux, notamment en conditions hivernales humides difficiles.

En terme de performance énergétique, l'introduction du pois dans un assolement de grande culture permet d'obtenir une consommation énergétique et une efficacité énergétique meilleures que lors d'un assolement comportant exclusivement des cultures de céréales et d'oléagineux. En association avec elles, il permet de réduire le coût énergétique de leur culture, du fait d'une diminution d'emploi d'engrais azoté. A l'échelle de l'exploitation, une proportion significative (20%) de légumineuses permet de réduire de 4% l'impact de l'assolement sur le changement climatique, et de 5% le bilan énergétique. En système d'élevage laitier, les exploitations de type herbe-légumineuses ayant une proportion de légumineuses de 10 à 30% de la matière sèche du fourrage récolté réduisent de 7% l'impact sur le changement climatique et de 27% le bilan énergétique.

L'introduction de légumineuses dans les rotations (pures, ou associées à des céréales ou des graminées) est donc un moyen efficace de réduire les émissions de GES par l'agriculture, et d'améliorer l'efficacité énergétique des systèmes. Par la fixation symbiotique, les légumineuses constituent le seul levier que nous ayons pour accroître le taux d'azote dans les sols (Picard, 1982). En effet, l'azote contenu dans les déjections animales résulte uniquement d'un recyclage de l'azote ingéré sous forme d'aliment à un autre moment de la vie de l'animal, donc prélevé par la plante dans le sol ; ce qui ne constitue pas un accroissement du stock d'azote initial. Les légumineuses ont donc un rôle environnemental indéniable. De plus, elles diversifient les paysages de nos campagnes et contribuent ainsi à la préservation de la biodiversité hébergée. Elles sont également nécessaires à l'équilibre et l'indépendance protéique de nos élevages, où elles sont une alternative aux tourteaux d'oléagineux métropolitains ou de soja importé (Thiébeau *et al.*, 2003).

Références bibliographiques

- Abdalla M., Jones M., Smith P., Williams M., 2009. Nitrous oxide fluxes and denitrification sensitivity to temperature in Irish pasture soils. *Soil Use Manage* 25, 376-388.
- Ambus P., Petersen S.O., Soussana J.F., 2007. Short-term carbon and nitrogen cycling in urine patches assessed by combined carbon-13 and nitrogen-15 labelling. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 121, 84-92.
- Baranger E., Guichard L., Jeuffroy M.H., Yvergnaux M., Bedoussac L., Justes E., 2008. Cultiver des associations céréales-protéagineux: des intérêts agronomiques, économiques et environnementaux à découvrir. Rapport technique final, programme coordonné par l'UNIP avec le soutien du CASDAR, appel à projet 2005, N°431.
- Bockstaller C., Guichard L., Keichinger O., Girardin P., Galan M.B., Gaillard G., 2009. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 223-235.
- Carter M.S., Ambus P., 2006. Biologically fixed N₂ as a source for N₂O production in a grass-clover mixture, measured by 15N₂. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74, 13-26.
- Clayton H., McTaggart I.P., Parker J., Swan L., Smith K.A., 1997. Nitrous oxide emissions from fertilised grassland: a 2-year study of the effects of N fertilizer form and environmental conditions. *Biology and Fertility of Soils* 25, 252-260.
- Corre-Hellou G., Fustec J., Crozat Y., 2006. Interspecific competition for soil N and its interaction with N₂ fixation, leaf expansion and crop growth in pea-barley intercrops. *Plant and Soil* 282, 195-208.
- Davidson E.A., 1991. Fluxes of nitrous oxide and nitric oxide from terrestrial ecosystems. In: Rogers JE, Whitman WB (Eds) *Microbial production and consumption of greenhouse gases: methane, nitrogen oxides and halomethanes*, American Society for Microbiology, Washington DC, USA, pp 219-235.

- Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Doka G., Dones R., Hirschier R., Hellweg S., Nemecek T., Rebitzer G., Spielmann M., 2007. Overview and Methodology. Final report ecoinvent data v2.0, No. 1. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland.
- Gaborit G., Vincent J., 2006. Gaz à effet de serre: définition et inventaire de la contribution de l'agriculture et des élevages français. Fourrages 186, 155-164.
- Germon F., 1998. Rhizodeposition of nitrogen in pea as influenced by water stress. Report ESA-RISØ, Denmark.
- Ghaley B.B., Hauggaard-Nielsen H., Høgh-Jensen H., Jensen E.S., 2005. Intercropping of wheat and pea as influenced by nitrogen fertilization. Nutrient Cycling in Agroecosystems 73, 201-212.
- Haas G., Wetterich F., Geier U., 2000. Life cycle assessment framework in agriculture on the farm level. International Journal of Life Cycle Assessment 5, 345-348.
- Hauggaard-Nielsen H., Gooding M., Ambus P., Corre-Hellou G., Crozat Y., Dahlmann C., Dibet A., Fragstein P.v., Pristeri A., Monti M., Jensen E.S., 2009. Pea-barley intercropping and short-term subsequent crop effects across European organic cropping conditions. Nutrient Cycling in Agroecosystems 85, 141-155.
- IPCC, 1997. Greenhouse gas reference manual: Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Reference Vol. 3. J.T. Houghton et al. (Eds) available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.htm> (verified 1 Dec. 2003).
- IPCC, 2001. Climate change 2001 : The scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. J.T. Houghton et al. (Eds) Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. S. Solomon et al. (Eds) Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Jensen E.S., 1996. Rhizodeposition of N by pea and barley and its effect on soil N dynamics. Soil Biology & Biochemistry 28, 65-71.
- Jones S.K., Rees R.M., Skiba U.M., Ball B.C., 2007. Short term carbon and nitrogen cycling in urine patches assessed by combined carbon -13 and nitrogen-15 labelling. Agriculture, Ecosystems & Environment 121, 74-83.
- Justes E., Thiébeau P., Cattin G., Larbre D., Nicolardot B., 2001. Libération d'azote après retournement de luzerne : Un effet sur deux campagnes. Perspectives Agricoles 264, 22-28.
- Klumpp K., Bloor J.M.G., Ambus P., Soussana J.F., 2010. Effects of clover density on N₂O emissions and plant-soil N transfers in a fertilised upland pasture. Plant and Soil, Online First, DOI 10.1007/s11104-010-0526-8.
- Lampe C., Dittert K., Sattelmacher B., Wachendorf M., Loges R., Taube F., 2006. Sources and rates of nitrous oxide emissions from grazed grassland after application of 15N-labelled mineral fertilizer and slurry. Soil Biology and Biochemistry 38, 2602-2613
- Linzmeier W., Gutser R., Schmidhalter U., 2001. Nitrous oxide emission from soil and from a nitrogen-15-labelled fertilizer with the new nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP). Biology and Fertility of Soils 34, 103-108.
- Mayer J., Buegger F., Jensen E.S., Schloter M., Hess J., 2006. The role of N rhizodeposition of legumes in the N cycle of crop rotations. In: Grain legumes and the environment: how to assess benefits and impacts?, 18-19 November 2004, Agroscope FAL Reckenholz, Zurich, Switzerland, (Ed. AEP-Paris), 125-130.
- Menner J.C., Ledgard S., McLay C., Silvester W., 2005. Animal treading stimulates denitrification in soil under pasture. Soil Biology and Biochemistry 37, 1625-1629.
- Muller J.C., Denis D., Thiébeau P., 1993. Présence de légumineuses dans la succession de cultures : Luzerne et pois cultivés purs ou en association, influence sur la dynamique de l'azote. In : Decroux J. et Ignazi J.C. (Eds). Matières organiques et Agricultures. Congrès GEMAS-COMIFER, Blois. pp 83-92.

Nemecek T, von Richthofen J.S., Dubois G., Casta P, Charles R., Pahl H., 2008. Environmental impacts of introducing grain legumes into European crop rotations. *European Journal of Agronomy* 28, 380-393.

Niklaus P.A., Wardle D.A., Tate K.R., 2006. Effects of plant species diversity and composition on nitrogen cycling and the trace gas balance of soils. *Plant and Soil* 282, 83-98

Oenema O., Wrage N., Velthof G.L., van Groenigen J.W., Dolfing J., Kuikman J., 2005. Trends in global nitrous oxide emissions from animal production systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72, 51-65.

Picard J., 1982. Les légumineuses dans la production fourragère française – évolution au cours des vingt dernières années. *Fourrages* 90, 17-26.

PRé Consultants 2008. Introduction to LCA with SimaPro 7. <http://www.pre.nl/download/manuals/SimaPro7IntroductionToLCA.pdf>

Rochette P., Angers D.A., Belanger G., Chantigny M.H., Prevost D., Levesque G., 2004. Emissions of N₂O from alfalfa and soybean crops in Eastern Canada. *Soil Science Society of America Journal* 68, 493-506.

Rochette P., Janzen H.H., 2005. Towards a revised coefficient for estimating N₂O emissions from legumes. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 73, 171-179.

Rudaz A.O., Walti E., Kyburz G., Lehmann P., Fuhrer J., 1999. Temporal variation in N₂O and N₂ fluxes from a permanent pasture in Switzerland in relation to management, soil water content and soil temperature. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 73, 83-91.

Skiba U.M., Sheppard L.J., McDonald J., Fowler D., 1998. *Atmospheric Environment* 32, 3311-3320

Smith K.A., Thomson P.E., Clayton H., McTaggart I.P., Conen F., 1998. Effects of temperature, water content and nitrogen fertilisation on emissions of nitrous oxide by soils. *Atmospheric Environment* 32, 3301-3309.

Smith K.A., Dobbie K.E., 2003. The impact of sampling frequency and sampling times on chamber-based measurements of N₂O emissions from fertilized soils. *Global Change Biology* 7, 933-945.

Thiébeau P., Parnaudeau V., Guy P., 2003. Quel avenir pour la luzerne en France et en Europe ? *Courrier de l'Environnement de l'INRA* 49, 29-46 (<http://www.inra.fr/dpenv/thieb49.htm>)

van der Werf H.M.G., Kanyarushoki C., Corson M.S., 2009. An operational method for the evaluation of resource use and environmental impacts of dairy farms by life cycle assessment. *Journal of Environmental Management* 90, 3643-3652.

Wrage N., Velthof G.L., Laanbroek H.J., Oenema O., 2004. Nitrous oxide production in grassland soils: assessing the contribution of nitrifier denitrification. *Soil Biology and Biochemistry* 36, 229-236

Yamulki S., Harrison R.M., Goulding K.W.T., Webster C.P., 1997. N₂O, NO and NO₂ fluxes from a grassland effect of soil pH. *Soil Biology and Biochemistry* 29, 1199-1208.

Yamulki S., Jarvis S.C., Owen P., 1998. Nitrous oxide emissions from excreta applied in a simulated grazing pattern. *Soil Biology and Biochemistry* 30, 491-500.