

Émissions de N₂O de systèmes de culture alternatifs valorisant les légumineuses ou dédiés à la production de biomasse

Joël Léonard^{*1}, Céline Peyrard¹, Fabien Ferchaud¹, Eric Gréhan², Eric Justes³, Bruno Mary¹, Pierre Perrin³, Grégory Véricel³.

¹INRA UR 1158 AgroImpact, site de Laon, F-02000 Barenton-Bugny, France

²INRA, UR 1158 AgroImpact, site d'Estrées-Mons, F-80203 Péronne, France

²INRA, UMR 1248 INRA-INPT AGIR, F-31326 Castanet-Tolosan, France

*joel.leonard@inra.fr

Résumé

Accroître l'autonomie azotée des systèmes de culture et développer des alternatives à l'utilisation des ressources fossiles sont deux enjeux majeurs. Dans ce contexte l'introduction de légumineuses et de plantes pérennes destinées à la production de biomasse, dont le miscanthus, pourrait prendre de l'ampleur. Nous nous sommes intéressés aux émissions de N₂O induites par ces deux pratiques en mesurant les émissions sur deux essais de longue durée avec une différenciation des traitements d'une dizaine d'années. Nous nous sommes appuyés sur des enceintes automatiques permettant des mesures journalières pendant 2 à 3 ans. Les résultats obtenus indiquent que les émissions de N₂O dans un système privilégiant les légumineuses à la fertilisation minérale sont un peu plus élevées sans que ce soit suffisant pour remettre en question cette pratique. Malgré des cumuls d'émissions similaires, la dynamique et la répartition de ces émissions diffèrent toutefois fortement entre ces deux types de systèmes. Les émissions sur une culture de miscanthus fertilisée (120 kg/ha) dépendent fortement de la date de coupe : les émissions sont 5 fois plus importantes en coupe tardive qu'en coupe précoce et atteignent des niveaux très importants (jusque 9 kg N-N₂O/ha/an). Nous avons montré que cet effet était en grande partie dû à la présence d'un mulch à la surface du sol en coupe tardive, qui se développe à cause de la chute des feuilles en hiver et induit des taux de saturation en eau du sol élevés tout au long du cycle cultural. Ces forts taux de saturation stimulent en retour les émissions de N₂O. Une fertilisation ajustée pour simplement compenser les pertes d'azote par exportation et la recherche de variétés ne perdant pas leurs feuilles en hiver pourraient permettre d'atténuer cette influence négative d'une coupe tardive du miscanthus sur les émissions de N₂O.

1 Introduction

L'accroissement de l'autonomie azotée de la production agricole et l'accès à des ressources carbonées renouvelables sont des enjeux clés dans un contexte de changement climatique et d'épuisement des ressources fossiles. Dans les deux cas, la valorisation des potentialités des cultures constitue un levier important, qu'il s'agisse de faire appel à la capacité des légumineuses à fixer l'azote atmosphérique ou à celle de plantes pérennes d'origine tropicale comme le miscanthus à produire une biomasse importante tout en restant économe en intrants. À l'échelle du bassin de la Seine, des scénarios peuvent être envisagés dans lesquels la réintroduction de légumineuses dans les rotations prendrait de l'ampleur, notamment en lien avec le développement de l'agriculture biologique, en même temps que se développerait l'introduction de cultures pérennes destinées à la production de biomasse et à la fourniture de services incluant la maîtrise de la pollution nitrique dans des zones à risque.

Malgré les bénéfices attendus, les conséquences d'un accroissement significatif de la présence de légumineuses, en culture principale ou intermédiaire, et celles de l'introduction de cultures dédiées à la production de biomasse méritent d'être étudiées. C'est en particulier essentiel pour ce qui concerne

l'influence de ces cultures et de leur mode de conduite sur les émissions de gaz à effet de serre (GES). En effet, la recherche d'un accroissement de l'autonomie azotée comme celle de voies de substitution de carbone renouvelable aux ressources fossiles ont aussi pour objectif de réduire notre empreinte GES, et si le développement de ces cultures conduisait à une augmentation significative des émissions associées à la phase de culture, cela pourrait constituer un frein important.

En termes d'émissions de GES associées à l'agriculture, les émissions de N₂O tiennent une place importante du fait du très fort potentiel de réchauffement de ce gaz (265 fois celui du CO₂), de la contribution majoritaire de l'agriculture aux émissions (86.6 % en France), et du fort lien existant avec les pratiques agricoles et notamment la fertilisation azotée (Helgason et al., 2005 ; Pellerin et al., 2015). Les références disponibles sur les émissions comparées de systèmes de culture basés sur une fertilisation minérale ou le recours à l'introduction de légumineuses font état de résultats variables, parfois contradictoires. Les résultats de Schwenke et al. (2015) suggèrent par exemple que l'azote issu de la fixation symbiotique induirait moins d'émissions de N₂O que celui issu de la fertilisation minérale, ce qui va dans le sens des conclusions de Jeuffroy et al. (2013) avec une réduction de 20 à 25 % des émissions pour une rotation incluant du pois contrairement à une rotation similaire conduite de façon conventionnelle avec fertilisation minérale. Mais cette tendance à des émissions plus faibles peut être inversée notamment à travers les émissions associées à la décomposition des résidus après récolte (Rochette et Janzen, 2005 ; Basche et al., 2014). En ce qui concerne les émissions sur miscanthus, les références existantes suggèrent des émissions plutôt faibles et concentrées sur les quelques semaines suivant la fertilisation (Davis et al., 2010 ; Behnke et al., 2012). Les effets de pratiques comme la date de coupe, précoce ou tardive, sur les émissions de N₂O n'ont quant à eux pas été explorés. Une récolte tardive, après senescence, permet en particulier de mieux valoriser la mise en réserve et la remobilisation de l'azote au redémarrage de la culture et d'être ainsi plus économe en intrants (Strullu et al., 2015) tout en étant plus favorable à l'efficacité des procédés de transformation, en éthanol par exemple. La chute des feuilles en hiver conduit toutefois au développement progressif d'un mulch (Amougou et al., 2012) qui peut être un facteur stimulant des émissions de N₂O (Shan and Yan, 2013 ; do Carmo et al., 2016 ; Wang et al., 2016).

Dans ce cadre, l'objectif de ce travail était d'abord d'apporter des références solides sur les émissions de N₂O de systèmes de culture ayant largement recours à des cultures légumineuses et les émissions d'une culture de miscanthus fertilisée en fonction de la date de coupe, précoce ou tardive. Nous nous sommes appuyés pour cela sur des essais de longue durée permettant d'étudier des systèmes ou pratiques bien différenciés, au-delà de la phase de transition. Nous avons en outre privilégié des mesures in situ, en continu sur de longues périodes (2 à 3 ans) à la fois pour intégrer les flux de façon fiable sur l'ensemble de la rotation et pour considérer la variabilité interannuelle des émissions.

2 Matériel et méthodes

2.1 Mesure des émissions de N₂O

Les flux de N₂O ont été suivis à l'aide de chambres automatiques (3 répétitions par traitements) de grande taille (0.7 m x 0.7 m) permettant des mesures quasi continues (4/jour) et une grande précision des cumuls d'émissions au cours du temps contrairement à des mesures ponctuelles peu fréquentes. Les contraintes d'alimentation électrique et de câblage ne permettant pas d'installer chaque réplicat sur un bloc différent des dispositifs expérimentaux utilisés, les trois répétitions d'un même traitement ont été installées pour chaque cycle cultural sur une parcelle correspondant à un seul bloc. Nous avons suivi pour un même traitement différentes parcelles, dans des blocs différents, au fil du temps et des cycles culturaux de façon à pallier cette difficulté.

Les 4 cinétiques de concentration enregistrées chaque jour pour chaque chambre (à l'aide d'un analyseur infrarouge Thermo 46C) sont traitées de façon semi-automatique pour obtenir un flux de N₂O via un ajustement linéaire ou exponentiel de la concentration en fonction du temps. Le choix du modèle tient compte à la fois de la comparaison des performances des deux modèles et de contraintes fixées à partir des connaissances sur la physique des transferts de gaz. Le flux moyen journalier est ensuite obtenu en moyennant les 12 flux ponctuels (3 chambres x 4 mesures par jour). Ces flux journaliers sont intégrés sur la durée des périodes d'intérêt, correspondant généralement à un cycle de culture ou d'interculture. Pour comprendre les variations de flux, des mesures de température du sol, de teneur en eau, sont également effectuées en continu, ainsi que plus ponctuellement des mesures de concentration en azote minéral.

2.2 Expérimentation légumineuses

Ce travail a été conduit sur l'essai « MicMac » du site d'Auzeville près de Toulouse, sous un climat subméditerranéen où les précipitations annuelles sont de 685 mm et la température moyenne de 13.7°C. Le sol est un sol argileux calcaire profond, avec des caractéristiques (0-30 cm) variant beaucoup à l'échelle de l'essai (argile 18.6 à 33.4%, pH 6.2 à 8.3) et une faible teneur en carbone organique (0.7 à 1.1 %). Ce dispositif a été mis en place en 2010. Nous nous sommes intéressés à deux traitements correspondant à des rotations de 3 ans qui sont des alternatives bas intrants à la rotation classique blé-tournesol. Les deux rotations étudiées (LI, blé dur-sorgho-tournesol et VLI, blé dur-tournesol-féverole) se différencient essentiellement par le fait que la fertilisation est essentiellement minérale sur LI (96 kg N/ha/an en moyenne) alors que sur VLI la fixation symbiotique contribue significativement aux entrées d'azote (50 kg N/ha/an sur un total de 83 kg N/ha/an). Des modalités avec et sans cultures intermédiaires (+CC et -CC) ont également été suivies. De 2003 à 2010 les traitements étaient similaires hormis la culture principale légumineuse sur VLI (pois au lieu de féverole), ce qui permet de considérer que les traitements sont différenciés depuis une dizaine d'années.

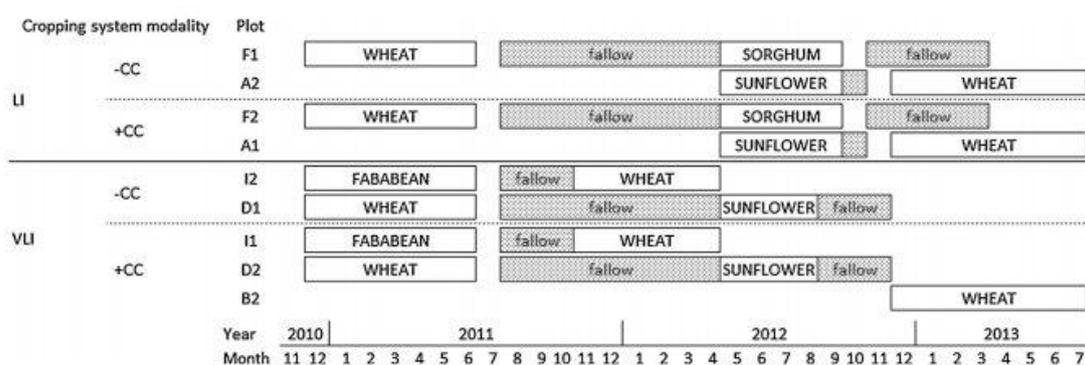


Figure 1 : Répartition des mesures au cours des trois années de suivi. Les périodes d'interculture sont en grisé.

Le fait que pour un même traitement différentes parcelles aient été suivies au fil du temps (Figure 1) permet de s'assurer que l'effet observé globalement est bien un effet traitement et non un effet parcelle. Une même culture a par ailleurs parfois été suivie plusieurs fois, dans des conditions climatiques différentes, ce qui a permis de mesurer la variabilité interannuelle des émissions.

2.3 Expérimentation Miscanthus

Ce travail a été conduit sur l'essai « Biomasse & Environnement » du site d'Estrées-Mons, sous un climat océanique à influence continentale avec des précipitations annuelles de 658 mm et une température moyenne de 10.7°C. Le sol est un limon profond de type 'haplic luvisol' (classification FAO) avec une teneur moyenne en argile de 18% (0-30 cm) et une faible teneur en carbone organique (1.3 à 1.6% en surface en coupe précoce et tardive respectivement). Le pH moyen est de 7.5 en dessous de 5 cm mais plus variable et souvent plus acide en surface. Ce dispositif a été mis en place en 2006 et la durée de différenciation était ainsi de 8 ans au moment du début des mesures. Nous nous sommes intéressés à deux traitements comparant une culture de miscanthus giganteus fertilisée (120 kg N/ha/an) avec deux modalités de coupe : coupe précoce (EH) en octobre, avant la chute des feuilles, et coupe tardive (LH) en février. La coupe tardive a pour principales conséquences i) une prolongation de la phase de mise en réserve de l'azote dans le rhizome en automne, cette mise en réserve étant ainsi plus efficace ; ii) une moindre exportation de biomasse et donc d'azote ; iii) la chute des feuille en hiver ce qui aboutit à échéance de 4 ans environ à la constitution d'un épais mulch à la surface du sol pouvant modifier les propriétés physiques de la surface du sol (température, humidité).

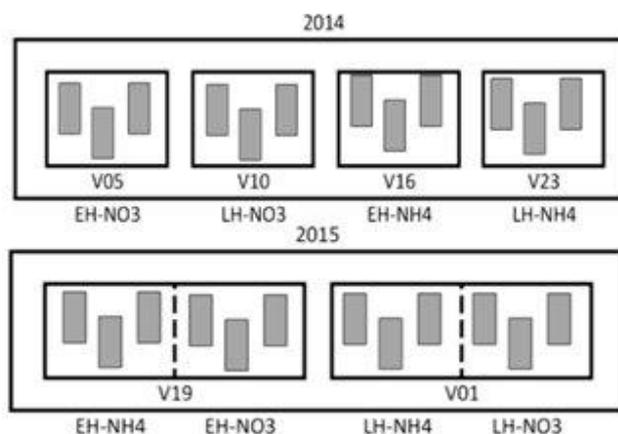


Figure 2 : Répartition des mesures (1 rectangle grisé = 1 enceinte) au cours des deux années de suivi. Les traitements étudiés croisent coupe précoce (EH) et tardive (LH) ainsi que deux modalités pour la forme d'azote apporté : NH₄ ou NO₃.

Les flux de N₂O ont été suivis deux années (2014 et 2015) sur des traitements croisant coupe précoce (EH) et tardive (LH) ainsi que deux modalités pour la forme d'azote apportée : NH₄ ou NO₃. En 2014 les 4 traitements ont été répartis sur 4 parcelles différentes (Figure 2), en 2015 les deux parcelles restantes en miscanthus fertilisé coupe précoce et tardive ont été utilisées, ce qui a permis de s'affranchir des variations de pH dans la comparaison des formes d'azote différentes.

3 Résultats

3.1 Influence de la nature des intrants azotés : fertilisation minérale vs. fixation symbiotique

Les résultats des mesures d'émissions de N₂O sur les 4 rotations étudiées (LI sans culture principale légumineuse, VLI avec culture principale légumineuse, et chacune avec ou sans cultures intermédiaires) sont présentés dans la figure 3 (voir aussi Peyrard et al., 2016a pour une présentation plus détaillée) sous la forme d'un histogramme circulaire des cumuls d'émissions par cycle de culture (en foncé) ou d'interculture (en clair).

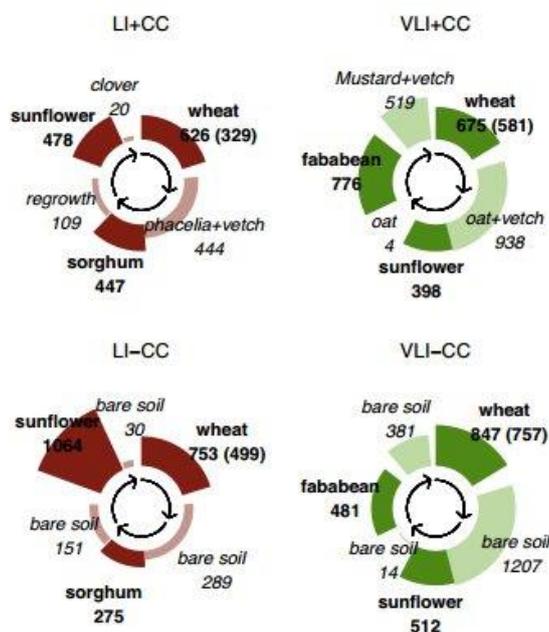


Figure 3 : Histogramme circulaire des cumuls d'émissions de N₂O par cycle de culture ou d'interculture (g/ha sur la durée considérée).

À l'échelle de la rotation complète, les émissions sont légèrement mais significativement plus fortes dans le système VLI avec une légumineuse en culture principale : 3375 g N-N₂O/ha sur 3 ans contre 2342 g N-N₂O/ha pour LI. La présence ou l'absence de cultures intermédiaires pendant l'interculture ne se traduit pas par des différences significatives d'émissions. Le seul effet décelable des cultures intermédiaires est une courte augmentation des émissions dans les 10 jours suivant la destruction du couvert lorsque celui-ci est laissé à la surface du sol. Ces niveaux d'émissions (0.78 et 1.12 kg N-N₂O/ha/an pour LI et VLI) sont cohérents avec les niveaux d'émissions généralement observés en grande culture : ceux-ci sont relativement stables et de l'ordre de 1 à 2 kg N-N₂O/ha/an pour des niveaux de fertilisation inférieurs à 190 kg N/ha (Bouwman et al., 2002 ; Van Groenigen et al., 2010). Dans des contextes plus arides, et notamment en milieu méditerranéen, des niveaux d'émissions plus faibles, inférieur à 0.8 kg N-N₂O/ha/an, ont généralement été reportés (Kessavalou et al., 1998 ; Dusenbury et al., 2008 ; Tellez-Rio et al., 2015).

Au-delà des cumuls, on peut constater que la répartition des émissions est très différente entre les systèmes LI sans légumineuse, donc avec une fertilisation à dominante minérale, et les systèmes VLI qui font largement appel à la fixation symbiotique. Dans le premier cas, les émissions interviennent en majorité (78 %) pendant les périodes de culture et elles sont quasi nulles pendant la période d'interculture non fertilisée. Les émissions sont en fait concentrées dans la période de quelques semaines qui suit la fertilisation de la culture principale, et sont proches de zéro ensuite. Au contraire, dans les systèmes VLI avec ou sans cultures intermédiaires, la répartition est plus homogène, les émissions pendant les périodes d'interculture représentant 45% du total. Les émissions journalières sont plus régulières, et il y a peu de périodes avec des émissions inférieures à 5 g N-N₂O/ha/jour. Ce résultat est cohérent avec les résultats obtenus par Schwenke et al. (2015) qui montrent que plus de 75 % des émissions associées aux légumineuses interviennent après la récolte.

Enfin, la variabilité interannuelle des émissions est élevée, en lien avec la variabilité des conditions climatiques. Pour la culture de blé d'une même rotation par exemple, les cumuls obtenus sur des années différentes sur la période de culture varient de 284 à 1438 g N-N₂O/ha pour VLI et de 311 à 1195 g N-N₂O/ha pour LI. L'effet du taux de saturation en eau du sol explique en partie cette dépendance aux conditions climatiques, avec des émissions plus élevées lorsque le taux de saturation est compris entre 30 et 70 %. Dans cette gamme, les émissions croissent de façon exponentielle avec le taux de saturation. Des simulations réalisées à l'aide du modèle STICS (Brisson et al., 2008) ont permis de simuler une forte variabilité des émissions à l'échelle de la rotation en fonction des années climatiques (Plaza-Bonilla et al., 2016) en cohérence avec les résultats rapportés ici. Elles suggèrent par ailleurs que des climats plus humides qui favorisent la décomposition et la minéralisation des résidus stimulent les émissions dans les systèmes avec légumineuses, au contraire de climats plus secs.

3.2 Émissions de N₂O sur *Miscanthus* et effet de la date de coupe

Les émissions de N₂O cumulées obtenues (une valeur de cumul par enceinte et par an, n = 24) sont représentées sur la figure 4, en différenciant coupe précoce (EH) et coupe tardive (LH). Les modalités de nature de fertilisation et les années 2014 et 2015 ne sont pas différenciées (voir Peyrard et al., 2016b pour une analyse plus détaillée). Les valeurs moyennes et médianes des cumuls sont proches et les émissions cumulées en coupe tardive (4.21 kg N-N₂O/ha) sont 5 fois plus importantes que celles obtenues en coupe précoce (0.89 kg N-N₂O/ha), avec des cumuls d'émissions très élevés pour une période de 4 mois seulement. Les intervalles de confiance à 95% des valeurs moyennes obtenus par bootstrap comme les 'notch' qui fournissent un intervalle de confiance sur la médiane ne se recouvrent pas ce qui indique que la différence entre coupe précoce et tardive est significative.

La représentation des cumuls individuels par enceinte indique que les valeurs maximales de cumul d'émissions en coupe précoce correspondent aux valeurs minimales en coupe tardive, ce qui conforte l'idée que les niveaux d'émissions sont très significativement différents. Les cumuls d'émissions sont plus homogènes sur coupe précoce et répartis sur une gamme étroite. Au contraire, la gamme de valeurs de cumuls est très étirée en coupe tardive, avec des valeurs extrêmes pouvant atteindre plus de 9 kg N-N₂O/ha sur 4 mois. Les niveaux d'émissions obtenus sont plutôt dans la gamme haute des valeurs rapportées dans la littérature dans des conditions similaires (*miscanthus*, coupe tardive, 120 kg N) : 2.13 kg N-N₂O/ha/an en moyenne pour Behnke et al. (2012), 0.90 à 4.34 kg N-N₂O/ha/an pour Davis et al. (2014).

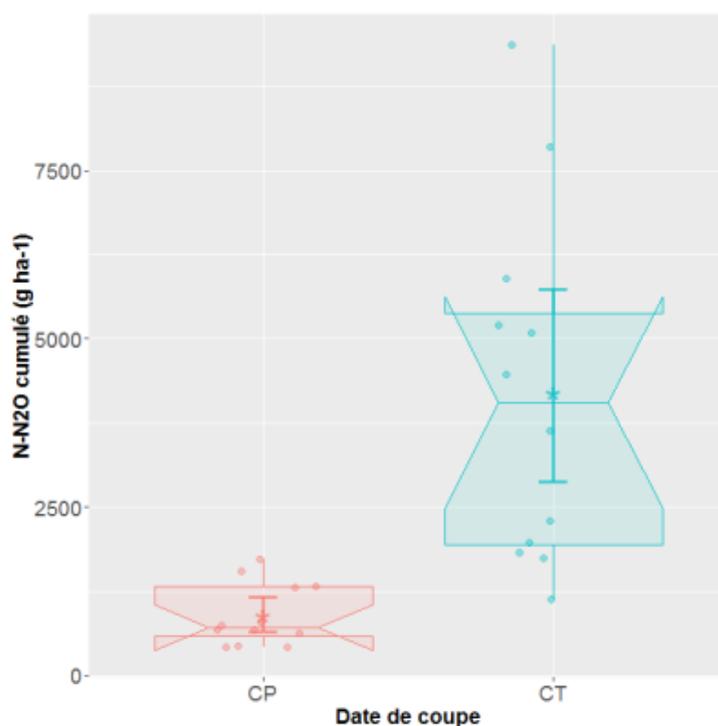


Figure 4 : Boxplot des émissions de N₂O cumulées (un point = une enceinte et une année, n = 24) en fonction de la date de coupe (CP précoce et CT tardive).

Les mesures de taux de saturation en eau du sol (0-5 cm pour les mesures gravimétriques, 0-30 cm pour les mesures en continu par TDR) indiquent une très forte différenciation entre coupe précoce et coupe tardive. En coupe tardive et indépendamment de l'année, le taux de saturation varie peu et reste proche de 80 %. En coupe précoce des différences sont observées en fonction de l'année, 2014 étant plus humide, mais le taux de saturation moyen est nettement inférieur à celui observé en coupe tardive : 65 % en 2014 et 46 % en 2015. Cette différence s'explique par la présence d'un mulch épais de feuilles en coupe tardive lié à la senescence et la chute hivernale des feuilles qui limite fortement l'évaporation de l'eau à la surface du sol. La mesure en continu du taux de saturation en eau sur 0-30 cm à l'aide des TDR a permis de mettre en relation les émissions de N₂O avec ce taux de saturation, celui-ci expliquant à lui seul 68% de la variance des émissions journalières (Figure 5, n=872).

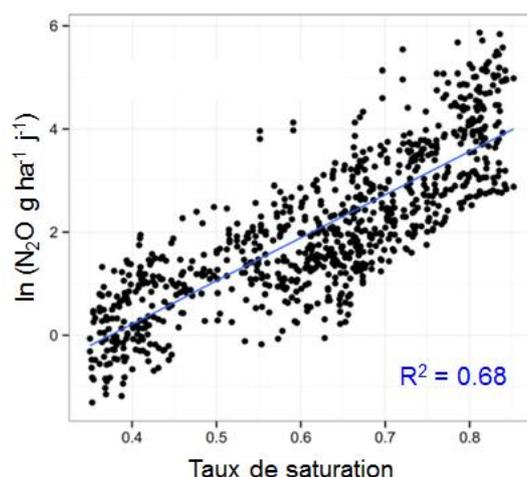


Figure 5 : Relation entre taux de saturation en eau du sol (WFPS) et émissions de N₂O (échelle log).

La relation linéaire que l'on observe sur la figure 5 entre le taux de saturation en eau et ln(N₂O) est cohérente avec la forme exponentielle de la relation rapportée dans de nombreux travaux et introduite dans les modèles simulant les émissions de N₂O (Grundmann and Rolston, 1987).

L'utilisation du modèle STICS pour simuler les émissions de N₂O pour les deux modalités de coupe (Peyrard et al., 2016b) a permis de compléter les résultats précédents. Tout d'abord, les simulations confortent l'idée que la présence du mulch est bien à l'origine de la différenciation des taux de saturation entre les deux modalités de coupe. Par ailleurs, la différence de teneur en eau explique une large partie de la différence d'émissions de N₂O simulée entre coupe précoce et coupe tardive, comme attendu. Cela n'est cependant pas suffisant pour rendre compte de la différence observée (facteur 5). Les mesures de potentiel de dénitrification réalisées par Domeignoz-Horta et al. (2015) sur le même site indiquent un potentiel de dénitrification 3 fois plus élevé en coupe tardive qu'en coupe précoce, ce qui est peut-être aussi une conséquence de la présence du mulch et de teneurs en carbone organique un peu plus élevées en coupe tardive.

L'introduction de cette différence de potentiel de dénitrification dans le modèle permet de retrouver dans les simulations à la fois des ordres de grandeur d'émissions cohérents avec les valeurs observées (en valeurs journalières de flux comme en cumuls), et une différenciation entre coupe précoce et coupe tardive similaire aux observations (ratio 4.6 contre 4.7). Les simulations réalisées suggèrent aussi une contribution très variable de la dénitrification aux émissions (42 à 88%) et ainsi une contribution importante du changement dans les processus impliqués pour expliquer l'effet date de coupe.

4 Conclusion

Ce travail a permis d'apporter des références solides sur les émissions de N₂O associées à des pratiques qui ont vocation à se développer dans le futur, notamment en réponse à l'enjeu de l'acquisition d'une plus grande autonomie vis-à-vis des ressources fossiles non renouvelables : introduction de légumineuses pour remplacer partiellement le recours à la fertilisation minérale d'une part ; implantation de cultures dédiées à la production de biomasse d'autre part, avec des variantes sur la date de récolte.

Nous avons montré que les émissions de N₂O de systèmes ayant recours à des légumineuses pour limiter la fertilisation minérale ne sont pas forcément plus faibles que ceux d'un système basé sur une fertilisation exclusivement minérale. Des émissions un peu plus importantes ont même été observées dans le système avec légumineuses, notamment à cause d'émissions plus soutenues durant les phases d'interculture, la différence étant de l'ordre de 0.3 kg N-N₂O/ha/an. Cet écart limité ne justifie probablement pas de considérer les émissions de N₂O comme un frein potentiel à l'introduction de cultures légumineuses, surtout si l'on considère que cette différence a tendance à s'atténuer dans des conditions climatiques plus sèches et qu'elle ne prend pas en compte les émissions de N₂O associées à la production d'acide nitrique pour la production de l'engrais. La répartition très différente dans le temps des émissions pour le système avec légumineuses, avec des flux plus réguliers tout au long de la rotation sans que l'on puisse relier cela à une disponibilité plus grande en azote minéral pose en revanche des questions de recherche sur les différences possibles dans la nature des processus impliqués dans les deux systèmes comparés.

Les résultats obtenus pour une culture de miscanthus fertilisée ont permis de mettre en évidence et d'expliquer une très forte influence de la date de coupe sur les émissions de N₂O. En coupe tardive et notamment à cause du mulch qui se développe suite à la chute des feuilles, les émissions de N₂O sont 5 fois plus élevées qu'en coupe précoce, avec des niveaux d'émissions systématiquement très élevés. Il s'agit d'un frein important à l'introduction de miscanthus conduit en coupe tardive, malgré les avantages de ce mode de conduite pour le recyclage de l'azote et la transformation, moins en raison des conséquences globales dans la mesure où les surfaces cultivées vont sans doute rester limitées qu'en raison des contraintes réglementaires posées sur le bilan gaz à effet de serre de ce type de culture. Cependant, cette conclusion doit être nuancée pour deux raisons. Tout d'abord, le niveau de fertilisation considéré dans ce travail (120 kg N/ha/an) excède largement le niveau de fertilisation requis pour compenser les exportations d'azote, ce dernier étant de 40 à 50 kg N/ha/an. Compte tenu de l'influence très importante du niveau de fertilisation sur les émissions de N₂O, on peut s'attendre à une forte réduction des émissions avec une fertilisation de 50 kg N/ha/an. Les mesures effectuées sur des modalités non fertilisées confortent cette idée, les émissions étant dans ce cas quasi nulles. Ensuite, nous avons montré qu'une cause majeure des fortes émissions observées était le développement du mulch associé à la chute des feuilles en hiver. Or il existe des espèces de miscanthus qui ne perdent pas leurs feuilles en hiver. On peut ainsi espérer disposer grâce à l'amélioration génétique de variétés performantes en matière de production et de gestion de l'azote tout en contournant l'inconvénient de la coupe tardive que constitue le développement progressif d'un mulch à la surface du sol.

Au-delà du cas du miscanthus, la présence d'un mulch est parfois recherchée, notamment lorsque cela

permet de lutter efficacement contre la dégradation physique du sol et l'érosion par le ruissellement. C'est notamment le cas dans certains systèmes de conservation ou systèmes sous couvert permanent. Les résultats obtenus ici, et qui sont cohérents avec les résultats rapportés dans la littérature, suggèrent une stimulation importante des émissions de N₂O par la présence d'un mulch. Ce phénomène mériterait d'être étudié dans une gamme plus large de situations, de façon à pouvoir disposer des références nécessaires pour le considérer comme un critère clé du bilan gaz à effet de serre lors de la conception des systèmes de culture.

5 Références

- Amougou, N., Bertrand, I., Cadoux, S., Recous, S., 2012. Miscanthus x giganteus leaf senescence, decomposition and C and N inputs to soil. *Global Change Biology Bioenergy* 4, 698–707. doi:10.1111/j.1757-1707.2012.01192.x
- Basche, A.D., Miguez, F.E., Kaspar, T.C., Castellano, M.J., 2014. Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions? A meta-analysis. *Journal of Soil and Water Conservation* 69, 471–482. doi:10.2489/jswc.69.6.471
- Behnke, G.D., David, M.B., Voigt, T.B., 2012. Greenhouse Gas Emissions, Nitrate Leaching, and Biomass Yields from Production of Miscanthus x giganteus in Illinois, USA. *Bioenerg. Res.* 5, 801–813. doi:10.1007/s12155-012-9191-5
- Bouwman, A.F., Boumans, L.J.M., Batjes, N.H., 2002. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data: SUMMARY OF NO AND N₂O MEASUREMENT DATA. *Global Biogeochemical Cycles* 16, 6-1-6–13. doi:10.1029/2001GB001811
- Brisson, N., 2008. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. Éditions Quæ, Versailles.
- Carmo, J.B. do, Filoso, S., Zotelli, L.C., de Sousa Neto, E.R., Pitombo, L.M., Duarte-Neto, P.J., Vargas, V.P., Andrade, C.A., Gava, G.J.C., Rossetto, R., Cantarella, H., Neto, A.E., Martinelli, L.A., 2013. Infield greenhouse gas emissions from sugarcane soils in Brazil: effects from synthetic and organic fertilizer application and crop trash accumulation. *GCB Bioenergy* 5, 267–280. doi:10.1111/j.1757-1707.2012.01199.x
- Davis, M.P., David, M.B., Voigt, T.B., Mitchell, C.A., 2014. Effect of nitrogen addition on Miscanthus x giganteus yield, nitrogen losses, and soil organic matter across five sites. *GCB Bioenergy* n/a-n/a. doi:10.1111/gcbb.12217
- Domeignoz-Horta, L.A., Spor, A., Bru, D., Breuil, M.-C., Bizouard, F., Leonard, J., Philippot, L., 2015. The diversity of the N₂O reducers matters for the N₂O:N-2 denitrification end-product ratio across an annual and a perennial cropping system. *Frontiers in Microbiology* 6, 971. doi:10.3389/fmicb.2015.00971
- Dusenbury, M.P., Engel, R.E., Miller, P.R., Lemke, R.L., Wallander, R., 2008. Nitrous Oxide Emissions from a Northern Great Plains Soil as Influenced by Nitrogen Management and Cropping Systems. *Journal of Environment Quality* 37, 542. doi:10.2134/jeq2006.0395
- Grundmann, G., Rolston, D., 1987. A water function approximation to degree of anaerobiosis associated with denitrification. *Soil Science* 144, 437–441.
- Helgason, B.L., Janzen, H.H., Chantigny, M.H., Drury, C.F., Ellert, B.H., Gregorich, E.G., Lemke, R.L., Pattey, E., Rochette, P., Wagner-Riddle, C., 2005. Toward Improved Coefficients for Predicting Direct N₂O Emissions from Soil in Canadian Agroecosystems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72, 87–99. doi:10.1007/s10705-004-7358-y
- Jeuffroy, M.H., Baranger, E., Carrouée, B., de Chezelles, E., Gosme, M., Hénault, C., Schneider, A., Cellier, P., 2013. Nitrous oxide emissions from crop rotations including wheat, oilseed rape and dry peas. *Biogeosciences* 10, 1787–1797. doi:10.5194/bg-10-1787-2013
- Kessavalou, A., Mosier, A.R., Doran, J.W., Drijber, R.A., Lyon, D.J., Heinemeyer, O., 1998. Fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide, and methane in grass sod and winter wheat-fallow tillage management. *Journal of Environmental Quality* 27, 1094–1104.

- Pellerin, S., Bamière, L., Pardon, L., 2015. Agriculture et gaz à effet de serre: dix actions pour réduire les émissions. Ed. Quae, Versailles.
- Peyrard, C., Mary, B., Perrin, P., Véricel, G., Gréhan, E., Justes, E., Léonard, J., 2016a. N₂O emissions of low input cropping systems as affected by legume and cover crops use. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 224, 145–156. doi:10.1016/j.agee.2016.03.028
- Peyrard, C., Ferchaud, F., Mary, B., Gréhan, E., Léonard, J., 2016b. Management Practices of *Miscanthus × giganteus* Strongly Influence Soil Properties and N₂O Emissions Over the Long Term. *BioEnergy Research*. doi:10.1007/s12155-016-9796-1
- Plaza-Bonilla, D., Léonard, J., Peyrard, C., Mary, B., Justes, É., n.d. Precipitation gradient and crop management affect N₂O emissions: Simulation of mitigation strategies in rainfed Mediterranean conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. doi:10.1016/j.agee.2016.06.003
- Rochette, P., Janzen, H.H., 2005. Towards a Revised Coefficient for Estimating N₂O Emissions from Legumes. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 73, 171–179. doi:10.1007/s10705-005-0357-9
- Schwenke, G.D., Herridge, D.F., Scheer, C., Rowlings, D.W., Haigh, B.M., McMullen, K.G., 2015. Soil N₂O emissions under N₂-fixing legumes and N-fertilised canola: A reappraisal of emissions factor calculations. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 202, 232–242. doi:10.1016/j.agee.2015.01.017
- Shan, J., Yan, X., 2013. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils. *Atmospheric Environment* 71, 170–175. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.02.009
- Strullu, L., Ferchaud, F., Yates, N., Shield, I., Beaudoin, N., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Besnard, A., Mary, B., 2015. Multisite Yield Gap Analysis of *Miscanthus × giganteus* Using the STICS Model. *BioEnergy Research*. doi:10.1007/s12155-015-9625-y
- Tellez-Rio, A., García-Marco, S., Navas, M., López-Solanilla, E., Tenorio, J.L., Vallejo, A., 2015. N₂O and CH₄ emissions from a fallow–wheat rotation with low N input in conservation and conventional tillage under a Mediterranean agroecosystem. *Science of The Total Environment* 508, 85–94. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.11.041
- Van Groenigen, J.W., Velthof, G.L., Oenema, O., Van Groenigen, K.J., Van Kessel, C., 2010. Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: a case study for arable crops. *European Journal of Soil Science* 61, 903–913. doi:10.1111/j.1365-2389.2009.01217.x
- Wang, S., Luo, S., Li, X., Yue, S., Shen, Y., Li, S., 2016. Effect of split application of nitrogen on nitrous oxide emissions from plastic mulching maize in the semiarid Loess Plateau. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 220, 21–27. doi:10.1016/j.agee.2015.12.030