

Impact de l'introduction des légumineuses dans les systèmes de culture sur les émissions de N₂O

Premiers résultats marquants du projet CASDAR LEG-N-GES

Cohan J.P.^{1*}, Cadillon A.², Dubois S.¹, Duval R.³, Flenet F.⁴, Justes E.⁵, Mary B.⁶, Massad R.S.⁷, Plaza-Bonilla D.⁵, Schneider A.⁴

1 : ARVALIS-Institut du végétal, station expérimentale de La Jaillière, 44 980 La Chapelle Saint-Sauveur

2 : ITAB, Ferme Expérimentale d'Etoile-sur-Rhône (26800)

3 : ITB, 45 rue de Naples, 75008 Paris

4 : Terres Inovia, Avenue Lucien Brétignières, Campus de Grignon, 78850 Thiverval-Grignon

5 : INRA, UMR 1248 AGIR, Centre INRA de Toulouse, Auzeville, CS 52627, 31326 Castanet-Tolosan cedex, France

6 : INRA UR AGRO-IMPACT, - Site de Laon Pôle du Griffon - 180, rue Pierre-Gilles de Gennes, 02000 Barenton-Bugny

7 : INRA-AgroParisTech UMR ECOSYS, Route de la Ferme, 78850 Thiverval-Grignon

* auteur pour correspondance : jp.cohan@arvalisinstitutduvegetal.fr

1 – Introduction

La maîtrise des émissions de gaz à effet de serre (GES) provenant des systèmes de production de grande culture revêt un double enjeu. **Du point de vue environnemental**, l'atténuation du réchauffement moyen planétaire est devenue un objectif national et international, afin de limiter au maximum les conséquences néfastes du changement climatique. **Du point de vue économique**, abaisser le niveau des émissions a une importance certaine pour la pérennité des filières de production de bio-carburants et pour la place des productions végétales dans le futur affichage environnemental des produits finis. Le poids des grandes cultures dans les émissions globales de GES est surtout dû aux émissions de protoxyde d'azote N₂O (90 % des émissions N₂O étant attribuables à l'agriculture en France), mais aussi à la production de CO₂ et de N₂O associée à la production des intrants comme les engrais azotés (CITEPA 2015). En France, les émissions de méthane CH₄ sont attribuables aux élevages bovins et les sols de grandes cultures (non immergés) n'y contribuent pas (CITEPA 2015).

Les méthodes de calcul du bilan GES appliqué aux systèmes de grande culture relient les émissions de N₂O aux différents flux d'azote. L'emploi d'engrais minéraux azotés représente le principal poste d'émissions directes et indirectes de N₂O (Cohan et al. 2011, Sutton et al. 2011). Une part non négligeable des émissions est attribuable à la phase amont de production d'engrais (émission indirecte). L'autre partie des émissions directement liée à l'usage des engrais azotés se produit dans le champ au cours de l'année et notamment après leur épandage. Le recours aux engrais minéraux azotés représente une charge grandissante pour les exploitations agricoles (hausse tendancielle sur 10 ans du prix des engrais) (Laurent et Leveau 2014). En conséquence, la conception de rotations de cultures moins dépendantes des engrais minéraux devient une nécessité à la fois environnementale et économique pour l'agriculture française. Etant donné que la nutrition azotée est un facteur de production majeur, il est nécessaire d'assurer un état de nutrition azotée suffisant des cultures pour maintenir et si possible augmenter les objectifs de production et de qualité des récoltes (Cohan et al. 2011a). Le moindre recours aux engrais minéraux azotés devra donc s'accompagner d'une amélioration de l'efficacité des engrais apportés et d'une substitution d'une partie de l'azote minéral de l'engrais par d'autres sources moins émissives en GES. Etant donné la nature multifactorielle du lien entre la dynamique de l'azote et les émissions de N₂O, l'évaluation d'un levier technique permettant de diminuer le recours aux engrais minéraux doit aussi inclure son impact sur les deux autres postes potentiellement contributeurs indirectement ou à moyen terme aux émissions: la lixiviation du nitrate et la restitution d'azote au sol issu des résidus de culture incorporés.

L'implantation de légumineuses est la seule voie alternative à la synthèse industrielle des engrais pour introduire de l'azote réactif dans les systèmes agricoles. La capacité de ces cultures à fixer le diazote N₂ de l'air représente en moyenne 60% de l'azote total absorbé et encore plus si le sol offre peu d'azote minéral (Voisin et al. 2002). L'optimisation de l'emploi de produits résiduels organiques

(effluents d'élevage, urbains et industriels) revêt aussi une grande importance mais ne concerne que le recyclage de l'azote déjà présent dans les systèmes de production et initialement introduit par les légumineuses (tourteaux de soja, légumineuses prairiales...) ou les engrais (Galloway et al. 2003, Cellier et al. 2008). Le projet CASDAR LEG-N-GES* a été lancé en 2013 afin d'évaluer les différents effets de l'introduction de légumineuses sur les flux d'azote et les émissions de protoxyde d'azote. Il considère un large jeu de données expérimentales acquises sur de nombreuses années par divers partenaires. Le projet est piloté par ARVALIS-Institut du végétal et réunit plusieurs partenaires (Terres Inovia, ITB, ITAB, INRA-UMR AGIR, INRA-AgroParisTech-UMR ECOSYS, INRA UR-AGROIMPACT). Cette communication se propose de présenter les méthodes d'analyse de données et de calcul d'émissions retenues et les premiers résultats.

2 – Méthodes d'estimation des émissions de N₂O suite à l'introduction de légumineuses

2.1 – Lien entre les flux d'azote et les émissions de N₂O

L'émission de N₂O à partir d'un sol agricole résulte principalement de deux réactions impliquant des populations microbiennes spécifiques du sol (Cellier et al. 2008, Hénault et al. 2014). La **dénitrification** (voie généralement majoritaire) consiste en la réduction de l'ion nitrate NO₃⁻ en N₂ « inerte » dans l'atmosphère mais en partie également en N₂O. La **nitrification** consiste en la transformation de l'ion NH₄⁺ en NO₃⁻ et produit également un flux de N₂O. Ainsi, bien que l'intensité des processus soit dépendante de nombreuses caractéristiques agro-climatiques (conditions d'humidité et de température du sol, caractéristiques des populations microbiennes présentes, type de sol, disponibilité en carbone...), la présence d'azote minéral (nitrate et ammonium) est un facteur primordial pour expliquer les émissions.

La méthode de calcul de niveau 1 du GIEC distingue les sources d'émission de N₂O qui font suite à un changement de pratique culturale comme le montre le tableau 1. Ces postes sont additifs et distinguent les effets directs entre le flux d'azote calculé et les émissions, et les effets indirects qui correspondent à des flux d'azote alimentant d'autres compartiments environnementaux pouvant à leur tour induire des émissions.

Tableau 1 : Flux d'azote pris en compte dans le calcul des émissions de N₂O suite à un changement de pratique culturale selon les lignes directrices du GIEC (GIEC 2006).

Effets directs		Effets indirects	
Abréviation	Descriptif	Abréviation	Descriptif
ΔE engrais	Emissions liées à la consommation d'engrais azoté	ΔE volatilisation	Emissions liées à la volatilisation ammoniacale suite à l'apport d'engrais azoté
ΔE résidus	Emissions liées à la restitution d'azote par les résidus végétaux	ΔE amont	Emissions liées à la production d'engrais azoté en amont de la parcelle
		ΔE lixiviation	Emissions liées à la lixiviation du nitrate

Les émissions sont calculées à l'aide de facteurs d'émissions multiplicatifs des flux d'azote concernés (cf. paragraphes suivants pour une description poste à poste). Les émissions sont d'abord exprimées en kg N-N₂O.ha⁻¹. A l'aide d'un facteur de conversion de 1.57, les émissions peuvent être exprimées en kg N₂O.ha⁻¹. Afin d'intégrer les émissions de N₂O dans un bilan GES global du système de culture, elles sont alors converties en équivalent de CO₂, soit en kg Eq CO₂.ha⁻¹ en utilisant un pouvoir réchauffant global (PRG) du N₂O de 298 par rapport au CO₂ (GIEC 2006). Il est alors possible d'intégrer dans le calcul l'impact de la pratique culturale sur les émissions de CO₂ liées à la fabrication d'engrais (ΔE amont-C) et le stockage de carbone dans le sol (ΔS C). Notons que la fixation symbiotique n'est pas considérée comme ayant un impact spécifique sur les émissions de N₂O (GIEC 2006, Jeuffroy et al. 2013).

Dans le cadre du projet, nous appliquons dans un 1^{er} temps cette méthode aux différents flux d'azote calculés dans de nombreux dispositifs expérimentaux conduits en France par les partenaires du projet. L'impact de l'introduction de légumineuses sur les flux d'azote est calculé par comparaison à une modalité sans introduction de légumineuse. Le lien entre le flux d'azote étudié et le niveau d'émissions réel de N₂O est affecté d'une grande incertitude (Philibert et al. 2012). En l'occurrence, parallèlement aux calculs à l'aide de la méthode de niveau 1 du GIEC, l'étude de plusieurs essais de longue durée équipés de dispositifs de mesures de N₂O va nous permettre 1) d'évaluer les émissions à l'aide des modèles de simulation des flux sol-plante STICS (Brisson et al., 2008) et CERES EGC

(Gabrielle et al., 2006) et 2) d'acquérir directement des données d'émissions suite à l'introduction de légumineuses sur les quelques dispositifs expérimentaux disposant de l'équipement adéquat (chambres de mesure statiques ou dynamiques). Enfin, l'intégration de tous ces résultats pourrait nous conduire à proposer de nouvelles références d'estimation des émissions de N₂O (méthode de niveau 2 selon la terminologie du GIEC).

2.2 – Emissions liées à la lixiviation du nitrate

Le facteur d'émission FE(l) à multiplier à la variation de pertes par lixiviation due à l'introduction de légumineuse pour en déduire les émissions de N₂O correspondantes (**ΔE lixiviation**) est égal à 0.75%, soit 0.0075 kg N-N₂O émis par kg N lixivié (GIEC, 2006).

L'estimation de la lixiviation d'azote nitrique dans les expérimentations repose sur plusieurs méthodes en fonction des données disponibles :

- Evaluation directe du flux de lixiviation si l'expérimentation est équipée de dispositifs permettant de le mesurer (lysimètres et bougies poreuses)
- Estimation via des modèles paramétrés et validés sur des mesures de terrain. Selon les situations, les 3 modèles utilisés sont LIXIM (Mary et al. 1999), STICS (Brisson et al. 2008) ou CHN (Le Bris et al. 2015).
- Estimation indirecte via l'écart de stocks d'azote minéral du sol à l'entrée de la période de drainage entre la modalité avec légumineuse et le témoin sans légumineuse. Cette dernière méthode présente l'avantage de la simplicité. Par contre, elle est essentiellement adaptée à des insertions sous forme de couverts intermédiaires et « maximise » les pertes par lixiviation en faisant l'hypothèse que l'intégralité de l'écart mesuré sera perdue par lixiviation.

2.3 – Emissions liées à la restitution des résidus végétaux

Le calcul des émissions liées à la restitution des résidus végétaux (**ΔE résidus**) est le plus simple à réaliser. Il suffit de disposer des quantités d'azote contenu dans les résidus (mesurés dans les expérimentations) et de les multiplier par le facteur FE(p) égal à 1%, soit 0.01 kg N-N₂O émis par kg N restitué sous forme de résidus (GIEC, 2006).

2.4 – Emissions liées à la consommation d'engrais azoté des cultures suivantes

Trois postes d'émissions sont estimés à partir de la différence de quantité d'engrais azoté apporté sur la culture selon qu'elle est précédée d'une légumineuse ou pas, multipliée par plusieurs facteurs d'émissions. Les émissions directes (**ΔE engrais**) sont obtenues avec le facteur FE(p) égal à 0.01 kg N-N₂O émis par kg N apporté (GIEC 2006). Les émissions indirectes liées à la volatilisation de l'azote ammoniacal suite à l'épandage d'engrais (**ΔE volatilisation**) sont obtenues par la multiplication successive d'un taux de volatilisation de 0.037 pour l'ammonitrate (EMEP 2013) et d'un facteur d'émission FE(v) de 0.01 kg N-N₂O émis par kg N apporté. Les émissions indirectes liées à la production d'engrais à l'amont de la parcelle (**ΔE amont**) sont calculées avec le facteur FE(iN₂O) égal à 0.00379 kg N-N₂O émis par kg N produit sous forme d'ammonitrate, seule forme d'engrais présente dans les essais traités à l'heure actuelle (source Fertilizers Europe). La base de tous ces calculs repose sur l'estimation de l'impact de l'introduction de la légumineuse sur la dose optimale d'engrais azoté à apporter à la ou les cultures non légumineuses qui suivent. Pour cela, plusieurs méthodes de calculs ont été employées en fonction des données disponibles dans les essais :

- **Evaluation par le calcul d'un bilan de masse de l'azote sous la culture** (utilisée par Constantin et al. 2011, Cohan et al. 2011b). Cette méthode nécessite de disposer des stocks d'azote minéral du sol en début et fin de phase d'absorption, ainsi que des quantités d'azote présentes dans la culture à ces mêmes dates. Sous certaines hypothèses, des essais ne disposant pas de mesure de stock d'azote du sol peuvent aussi être traités de la même façon. On parle alors de « bilan simplifié ».
- **Evaluation par l'étude de courbe de réponse du rendement à des doses croissantes d'engrais azoté sur la culture suivante.** Cette méthode, dite des « courbes de réponse à l'azote », nécessite l'emploi de modèles statistiques d'ajustement de la réponse. Le modèle quadratique-plateau (Makowski et al. 1999) est le modèle employé dans cette communication mais plusieurs autres formalismes sont à l'étude pour décrire au mieux les situations expérimentées. Le cas où le rendement de la culture suivante serait impacté sans pouvoir le relier à une variation de fourniture d'azote sera aussi traité plus tard dans le projet.

2.5 – Les types d'insertion de légumineuses étudiés

Il existe trois grands types d'insertion de légumineuses dans les systèmes de grandes cultures (Schneider et Huyghe, 2015): 1) en culture principale, 2) en couvert non récolté (en période d'interculture ou associé à une culture de rente) et 3) en cultures associées. Utilisées comme couverts, les légumineuses sont considérées comme des plantes de services; comme culture de rente, elles sont exploitées pour leurs graines ou leur biomasse globale, après une culture en monospécifique ou en association de culture avec une non légumineuse. Dans les plantes dites de service, à côté des couverts intermédiaires bien connus, on observe dans les pratiques actuelles l'émergence des couverts semi-permanents à permanents de légumineuses dans lesquels sont semées des cultures de rente. Les expérimentations annuelles et pluriannuelles mises en commun par les partenaires au sein du projet fournissent des données pour l'ensemble des cas de figure. Pour cette communication, nous nous limiterons à des exemples concernant les couverts intermédiaires et les cultures principales à graines qui seront comparés à des modalités sans introduction de légumineuses.

3 – Premiers résultats marquants

3.1 – Emissions calculées de N_2O liées à la lixiviation du nitrate

La capacité des couverts intermédiaires pour limiter la lixiviation du nitrate est proportionnelle aux quantités d'azote captées dans leurs parties aériennes (figure 1). Selon le type de couverts intermédiaires, cette relation est plus ou moins étroite mais néanmoins toujours significative même pour les couverts à base de légumineuses pures qui sont les moins performants sur ce point. La limitation des émissions de N_2O consécutive à la réduction de la lixiviation suit la même logique (figure 2). La réduction de la lixiviation est calculée via la réduction de stock d'azote minéral du sol en début de période de drainage (matérialisée par la date de destruction du couvert au mois de novembre) par rapport à une modalité sans couverture du sol (sol « nu »). Facile à obtenir, cet indicateur est néanmoins imparfait car il surestime généralement les pertes réelles et perd de sa pertinence si les mesures sont réalisées alors que le drainage a repris de manière significative. Les études en cours au sein du projet s'attachent à estimer les pertes par lixiviation nitrique selon d'autres méthodes pour affiner les conclusions.

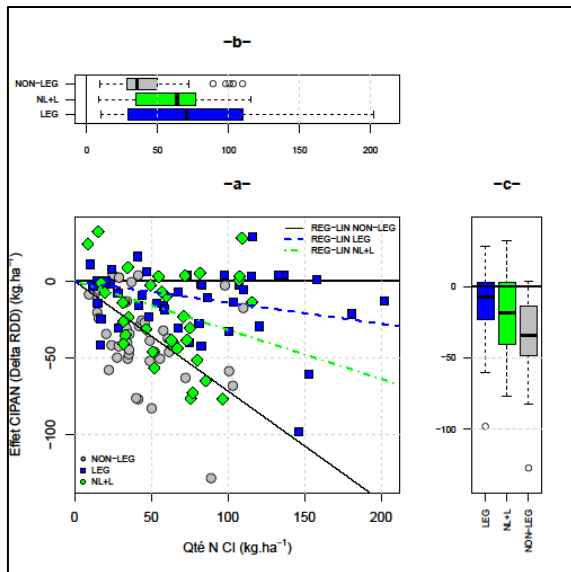


Figure 1 : -a- lien entre la quantité d'azote dans le couvert à destruction et l'effet CIPAN estimé par la différence de stock d'azote minéral du sol en début de période de drainage entre la modalité avec couvert et la modalité maintenu en sol nu. Relations établies pour 3 types de couverts : NON-LEG=non-légumineuses, LEG=légumineuses, NL+L=mélanges des 2 types de couverts. Les pentes des régressions linéaires sont toutes différentes de 0 au seuil de 5%, et toutes différentes entre elles au seuil de 5% pour les comparaisons avec les non-légumineuses, et au seuil de 10% pour la comparaison légumineuses-mélanges. -b- distribution des quantités d'azote capté dans les parties aériennes selon le type de couvert. -c- distribution des effets CIPAN estimés selon le type de couvert. Données ARVALIS-CREAS- Comité technique FDGEDA 10/CA51-ITB.

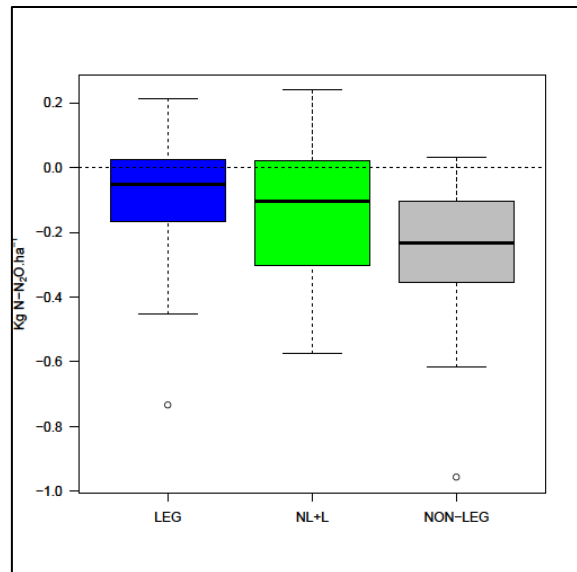


Figure 2 : émissions de N₂O (en kg N-N₂O.ha⁻¹) estimées à partir de l'impact sur la lixiviation du nitrate de l'introduction d'un couvert intermédiaire, selon son type (LEG= légumineuses, NL+L=mélanges légumineuses + non-légumineuses, NON-LEG = non légumineuses). Impact lixiviation évalué par la réduction du stock d'azote minéral du sol à l'entrée de la période de drainage. Données ARVALIS-CREAS- Comité technique FDGEDA 10/CA51-ITB.

Concernant l'introduction des légumineuses en cultures principales, l'analyse, grâce au modèle STICS, d'un des essais pluriannuel inséré dans le projet (essai INRA d'Auzeville) indique que l'introduction de légumineuses en culture principale entraîne une augmentation des pertes d'azote par lixiviation nitrique ; néanmoins, l'introduction de culture intermédiaire permet d'éviter cet inconvénient (Plaza-Bonilla et al. 2015). Ce phénomène avait déjà été mis en évidence dans des travaux antérieurs (Laurent et al. 1998) et lors de la première phase du projet LEG-N-GES. A cette occasion, il a été réalisé une analyse de l'évolution des stocks d'azote minéral du sol et des risques de transfert de nitrate par lixiviation à court et moyen termes dans des successions céréalières comprenant du pois ou du colza (Bellouin et al. 2014). Le travail s'est basé sur la compilation des données de six dispositifs expérimentaux français des années 1990 et 2000, de deux dispositifs au Danemark dans les années 1990, sur les résultats du projet Casdar-7-175 (Pois-Colza-Blé) mené de 2007 à 2011, et sur la bibliographie. Pendant l'interculture qui suit une légumineuse à graines à récolte estivale comme le pois protéagineux, et en l'absence de CIPAN, les risques de lixiviation du nitrate à court terme sont généralement plus élevés qu'après un blé si on utilise le stock d'azote minéral du sol avant l'entrée en période de drainage comme indicateur. En moyenne pluriannuelle, sur l'ensemble des six dispositifs français étudiés, l'écart entre le stock d'azote minéral après pois et après blé oscille entre 0 et + 20 kg N.ha⁻¹ après récolte et entre +15 et +30 kg N.ha⁻¹ à l'entrée de l'hiver selon les lieux et les années. Cependant des mesures directes réalisées sur deux sites et la simulation sur 20 ans avec les données d'un autre site montrent que la quantité d'azote lixivié est en tendance supérieure de 0 à 8 kg N.ha⁻¹ (différence non significative) en précédent pois par rapport à un précédent blé. L'analyse de la bibliographie internationale a montré soit une absence de différence de quantité d'azote lixivié entre un précédent pois et un précédent blé, soit une différence plus importante aux dépens du pois si le stock d'azote minéral du sol à l'entrée de l'hiver et la lame drainante sont tous deux importants. En revanche, sur les quelques essais où les données sont disponibles sur deux années toutes choses égales par ailleurs, le phénomène semble s'inverser lors de la campagne suivante. Le stock d'azote

minéral à l'entrée de l'hiver de l'année n+1 est en effet significativement plus faible pour un blé qui suit un pois par rapport à un blé de blé, avec, en moyenne, une réduction de 18 kg N.ha⁻¹ dans les essais de Grignon. Les simulations de pertes d'azote par lixiviation sur 20 ans (réalisée avec le modèle INRA LIXIM) semblent confirmer cette tendance à l'inversion du risque de lixiviation entre le premier et le second automne après la culture de pois (pertes d'un blé de pois réduites en moyenne de 7 kg N.ha⁻¹ par rapport à un blé de blé – écart non significatif au seuil de 5%). Cette information jette une lumière nouvelle sur les effets moyens à long termes sur les flux d'azote des légumineuses en culture de rente et sera consolidé lors de la dernière phase du projet par l'apport de nouveaux dispositifs expérimentaux et le calcul des émissions de N₂O qui découleront des calculs de flux d'azote correspondant.

Soulignons enfin que la gestion de l'interculture ou de la conception du système sont des voies de réduction du risque de lixiviation du nitrate durant l'automne suivant les protéagineux, c'est-à-dire : 1) en implantant une culture intermédiaire après le pois et avant le blé ou avant une culture de printemps qui suit le pois, 2) en implantant une culture de colza après le pois, 3) en choisissant de mettre le pois en culture en association avec une céréale. Notons également que l'introduction du soja à récolte plus tardive n'augmente pas le risque de lixiviation du nitrate.

3.2 – Emissions calculées de N₂O liées à la restitution des résidus végétaux

3.2.1 – Cas des couverts en interculture

Le calcul de niveau 1 (GIEC, 2006) indique que la distribution des émissions de N₂O par type de couvert intermédiaire (figure 3) est de la même forme que la distribution des quantités d'azote absorbé par les couverts (figure 1-b). Une des hypothèses sous-jacentes à ce calcul est que la totalité de l'azote restitué est disponible à court-moyen terme pour les processus de nitrification et dénitrification. Cependant, la connaissance des cinétiques de minéralisation de l'azote des résidus de culture acquises en laboratoire (Justes et al. 2009) nous indique que la fourniture d'azote minéral lors de la décomposition est partielle et atteint au maximum 50% de l'azote total restitué (le reste étant organisé dans la matière organique du sol), et que son intensité est fonction du rapport C/N des résidus végétaux considérés. Afin de confirmer ce constat au champ, une des actions du projet consiste à élaborer les cinétiques de minéralisation d'azote lors de la décomposition des résidus de couverts végétaux, à partir des mesures régulières des stocks d'azote minéral du sol au cours du temps et du modèle Lixim (Mary et al. 1999). Les premières expérimentations analysées (figure 4 pour deux exemples) confirment que le taux de minéralisation est partiel et que la dynamique est liée au rapport C/N des résidus restitués (les couverts de légumineuses ayant des rapports C/N plus faibles que les non-légumineuses et les mélanges).

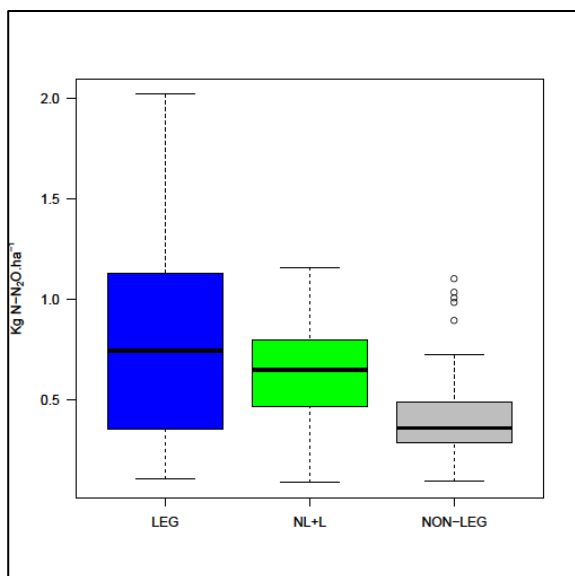


Figure 3 : émissions de N_2O (en $kg\ N-N_2O.ha^{-1}$) calculées suite à la restitution de résidus de couverts intermédiaires selon la nature du couvert (LEG= légumineuses, NL+L=mélanges légumineuses + non-légumineuses, NON-LEG = non légumineuses). Essais ARVALIS-CREAS-CA51- Comité technique FDGEDA 10/CA51-ITB. Référence de facteur d'émission : GIEC (2006).

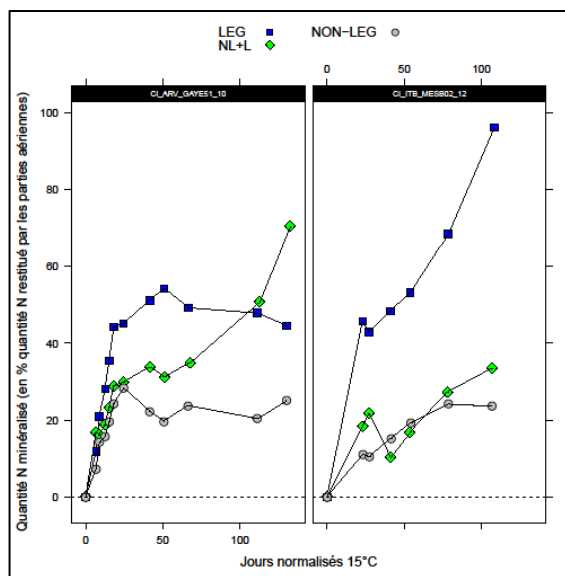


Figure 4 : Cinétiques de minéralisation de résidus de couverts intermédiaires élaborées sur deux expérimentations au champ selon la nature du couvert (LEG= légumineuses, NL+L=mélanges légumineuses + non-légumineuses, NON-LEG = non légumineuses). Calculs réalisés à partir du modèle INRA LIXIM paramétré par des mesures régulières du stock d'azote minéral du sol en sol nu. Essais ARVALIS et ITB (les étiquettes des graphiques représentent les sigles des essais).

3.2.2 – Cas de légumineuses de rente en culture mono-spécifique

Dans les essais traités au sein du projet LEG-N-GES, seul le cas du pois protéagineux a fait l'objet d'un suivi de mesures au champ en comparaison avec des céréales et du colza dans les mêmes conditions sur huit rotations différentes sur un site (Grignon, Yvelines). Lors des trois campagnes sur lesquelles l'essai a été conduit, les émissions de N_2O enregistrées pour le blé et le colza fertilisés se sont ainsi montrées 5 à 10 fois plus élevées que celles relatives au blé non fertilisé et au pois, qui équivalent essentiellement au niveau d'émission de base des sols (Jeuffroy et al, 2013). De plus, la culture présente au printemps n'a pas eu d'effet significatif sur les émissions mesurées à l'automne suivant, très faibles dans tous les cas. L'estimation des émissions globales annuelles liées à une culture et à ses résidus montre que celles sous pois représentent moins d'un quart des émissions sous blé et colza fertilisés. Une succession comportant un pois permettrait donc de réduire de 20 % les émissions de N_2O sur les 3 ans.

3.3 – Emissions calculées de N_2O liées à la consommation d'engrais sur la culture suivante

3.3.1 – Cas des couverts en interculture

L'analyse de l'effet fertilisant des couverts intermédiaires sur la culture suivante nous indique que seuls les couverts à base de légumineuses (seules ou en mélange) sont à même de permettre une économie d'engrais significative (figure 5). Bien que les plus forts effets soient permis par des couverts de légumineuses pures, les mélanges peuvent aussi produire un effet positif et permettent d'obtenir une efficacité moins aléatoire d'une expérimentation à l'autre. D'une manière logique, les émissions de N_2O liées à la consommation d'engrais azoté, calculées via la méthode de niveau 1 du GIEC, se classent selon une hiérarchie qui est fonction de la part de légumineuses dans le couvert (figure 6).

3.3.2 – Cas de légumineuses de rente en culture mono-spécifique

Si on s'intéresse à l'effet précédent des légumineuses en cultures principales, nos analyses indiquent que l'effet « fertilisant N » sur la culture suivante peut être significatif, rejoignant en cela les études antérieures sur l'intérêt des précédents légumineuses (Jeuffroy et al. 2015). La conséquence est que les émissions de N_2O seraient réduites après légumineuse par rapport à un précédent céréale à paille

(figure 7 et 8). Il faut souligner que l'étude des précédents avec légumineuses ne nécessite pas seulement l'évaluation de l'impact sur les flux d'azote car, comme le montrent les 2 expérimentations prises en exemple, il peut aussi y avoir un effet sur le potentiel de rendement de la culture suivante. Ce phénomène devra être considéré quand il sera question de replacer les émissions de N_2O dans un bilan de gaz à effet de serre plus global de la parcelle agricole.

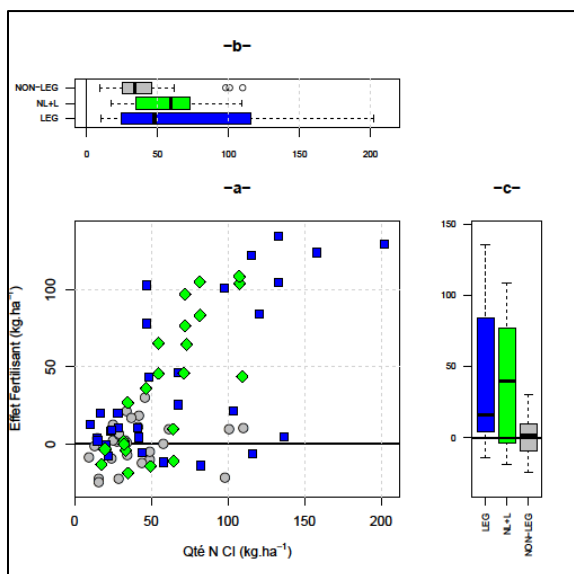


Figure 5 : -a- lien entre la quantité d'azote dans le couvert à destruction et l'effet « Fertilisant N » estimé par bilan d'azote minéral du sol *a posteriori*. Relations établies pour 3 types de couverts : NON-LEG = non-légumineuses, LEG = légumineuses, NL+L = mélanges des 2 types de couverts. -b- distribution des quantités d'azote capté dans les parties aériennes selon le type de couvert. -c- distribution des effets Fertilisant estimés selon le type de couvert. Données ARVALIS-CREAS- Comité technique FDGEDA 10/CA51-ITB.

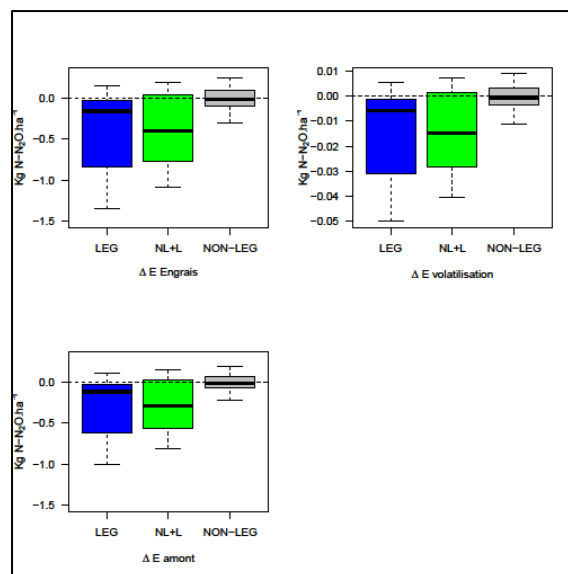


Figure 6 : Emissions calculées de N_2O (en $kg\ N-N_2O\cdot ha^{-1}$) suite à l'impact sur la consommation d'engrais azoté de la culture suivante selon la nature du couvert (LEG= légumineuses, NL+L=mélanges légumineuses + non-légumineuses, NON-LEG = non légumineuses). Données ARVALIS-CREAS- Comité technique FDGEDA 10/CA51-ITB. Référence de facteurs d'émission : GIEC (2006), EMEP (2013), Fertilizer Europe.

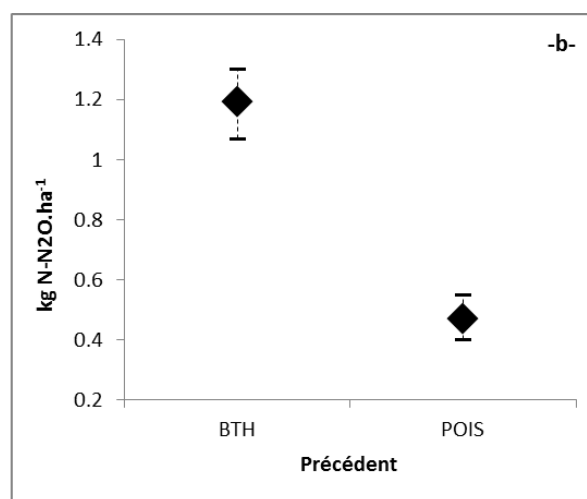
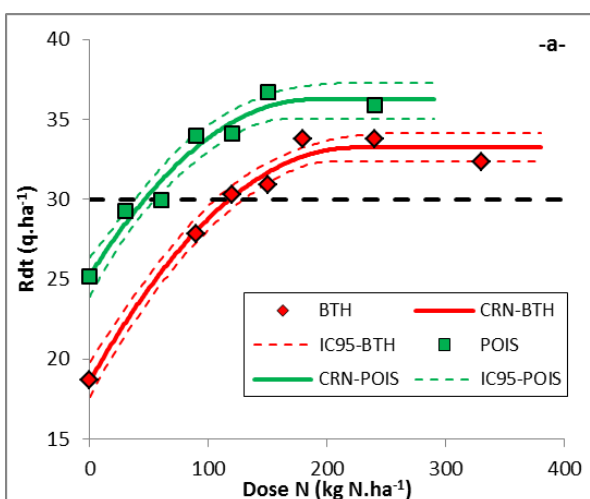


Figure 7 : -a- Exemple de réponse d'une culture de colza à des doses croissantes d'engrais N selon la nature du précédent (modélisation selon un formalisme en quadratique plateau) ; -b- émissions directes calculées de N_2O (en $kg\ N-N_2O\cdot ha^{-1}$) selon la nature du précédent pour l'obtention d'un rendement de $30\ q\cdot ha^{-1}$. Essai Terres Inovia (Yonne, 2009). Référence de facteur d'émission : GIEC (2006). BTH=précédent blé tendre d'hiver ; POIS=précédent pois protéagineux.

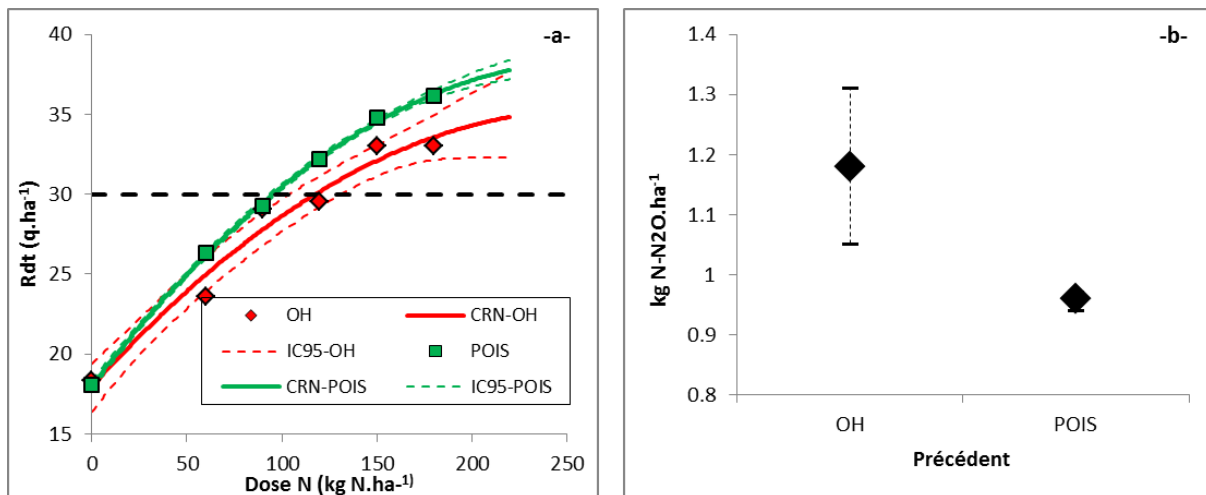


Figure 8 : -a- Exemple de réponse d'une culture de colza à des doses croissantes d'engrais N selon la nature du précédent (modélisation selon un formalisme en quadratique plateau) ; -b- émissions directes calculées de N₂O (en kg N-N₂O.ha⁻¹) selon la nature du précédent pour l'obtention d'un rendement de 30 q.ha⁻¹. Essai Terres Inovia (Nièvre, 2008). Référence de facteur d'émission : GIEC (2006). OH=précédent orge d'hiver ; POIS=précédent pois protéagineux.

4 – Conclusion et perspectives

Les premiers résultats du projet permettent d'esquisser quelques conclusions sur la base des calculs de niveau 1 du GIEC :

- L'introduction de couverts intermédiaires à base de légumineuses (pures ou en mélange avec des non-légumineuses) a été étudiée sur plus de 30 expérimentations. Ces couverts avec légumineuses permettraient de réduire les émissions de N₂O via une diminution de dose d'engrais azoté appliqué sur la culture suivante. Par contre, par rapport à un couvert de non-légumineuse, cet effet est en partie contrebalancé par une augmentation des émissions liées à une réduction moins efficace de la lixiviation du nitrate et à la restitution de résidus végétaux plus riches en azote. Certains essais nous permettent d'élaborer les cinétiques de minéralisation d'azote lors de la décomposition des résidus de cultures intermédiaires, ouvrant la possibilité de réviser leur niveau de contribution réelle aux émissions et la variabilité associée.
- Des résultats publiés auparavant indiquent que les émissions de N₂O mesurées pour la culture du pois (et du blé non fertilisé) sont équivalentes au niveau d'émission de base des sols et sont 5 à 10 fois plus faibles que celles enregistrées pour le blé et le colza fertilisés (Jeuffroy et al. 2013). La culture de légumineuse a des impacts sur les flux azotés lors de la culture suivante qui varient selon l'espèce de légumineuse et son mode d'insertion. A partir d'une première analyse des expérimentations rassemblées dans LEG-N-GES, nous pouvons penser que les précédents avec légumineuses permettraient une diminution des émissions de N₂O à l'échelle de la culture et de la succession de culture (ou de la rotation complète), via un moindre recours aux engrais azotés par rapport à des systèmes sans légumineuse. Les autres flux d'azote potentiellement contributeurs aux émissions de N₂O peuvent être variables : la lixiviation du nitrate dépend de la conception de la succession culturale (avec une part majeure de la gestion de l'interculture qui suit la légumineuse), la restitution de résidus dépend de l'espèce pour son type de résidus et son mode d'exploitation (annuelle ou pluriannuelle, récolte des grains ou fauchage... (Schneider et Huyghe 2015)). Il faut souligner que l'étude des précédents avec légumineuses ne nécessite pas seulement l'évaluation de leur impact sur les flux d'azote, mais aussi sur le potentiel de rendement des autres cultures de la rotation. Cette question sera instruite dans le projet, notamment lors de l'intégration des émissions de N₂O au sein d'un bilan gaz à effet de serre (équivalent carbone) global de la parcelle.

Lors de sa dernière phase, le projet s'attachera à finaliser l'analyse de toutes les données expérimentales à disposition afin : 1) de produire des références scientifiques et techniques nécessaires à l'évaluation des différentes composantes de l'impact des légumineuses sur les émissions de N₂O ; 2) de proposer des recommandations de modifications des itinéraires culturaux et

de successions de cultures en vue d'une meilleure performance économique et environnementale ; et 3) de valider les facteurs d'émission utilisés actuellement dans les inventaires, ou de proposer des valeurs d'émission adaptées aux légumineuses et aux conditions françaises.

Références bibliographiques

- Beillouin D., Schneider A., Carrouée B., Champolivier L., Le Gall C., Jeuffroy M.H., 2014. Short and medium term effects on nitrogen leaching of the introduction of a pea or an oilseed rape crop in wheat-based successions Poster avec extended abstract, 18th Nitrogen Workshop Lisbon, 30 June - 3 July 2014.
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N., 2008. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model. *QUAE Ed.* 297p.
- Cellier P., Bethenod O., Castell J.F., Germon J.C., 2008. Contribution de l'agriculture à l'effet de serre - Importance de l'azote et interactions avec l'ozone. *OCL*, 15(5), 317-323.
- CITEPA 2015. Rapport national d'inventaire – Format SECTEN, avril 2015.
- Cohan J.P., Laurent F., Lellahi A., 2011a. Fertiliser les cultures : concilier efficacité technique et défis environnementaux. *DEMETER*, 2011, 269-327.
- Cohan J.P., Laurent F., Champolivier L., Lieven J., Duval R., Morin P., 2011b. Effet des couverts intermédiaires sur la fourniture d'azote à la culture suivante. In « Cultures intermédiaires – Impacts et conduite » Ed. ARVALIS-CETIOM-ITB-ITL; pp. 44-61.
- Constantin J., Beaudoin N., Laurent F., Cohan J.P., Duyme F., Mary B., 2011. Cumulative effects of catch crops on nitrogen uptake, leaching and net mineralization. *Plant and Soil*, 341, 137-154.
- Gabrielle B., Laville P., Duval O., Nicoulaud B., Germon J.C., Hénault C., 2006. Process-based modeling of nitrous oxide emissions from wheat-cropped soils at the sub-regional scale. *Global Biogeochemical Cycles*, 20, GB4018.
- Galloway J.N., Aber J.D., Erisman J.W., Seitzinger S.P., Howarth R.W., Cowling E.B., Cosby B.J., 2003. The Nitrogen Cascade. *BioScience*, 53, 341-356.
- GES'TIM 2006. Rapport de projet.
- GES'TIM 2010. Rapport de projet.
- GIEC 2006. Rapport.
- Henault C., Le Gall C., Cohan J.P., Cellier P., 2014. Dossier GES N₂O - Des émissions liées à l'activité des microorganismes du sol. *Perspectives Agricoles*, 407 (janvier), 51-55.
- Jeuffroy M.H., Baranger E., Carrouée B., De Chezelles E., Gosme M., Henault C., Schneider A., Cellier P., 2013. Nitrous oxide emissions from crop rotations including wheat, oilseed rape and dry peas. *Biogeosciences*, 10, 1787-1797.
- Jeuffroy M.H., Biarnès V., Cohan J.-P., Corre-Hellou G., Gastal F., Jouffret P., Justes E., Landé N., Louarn G., Plantureux S., Schneider A., Thiébeau T., 2015. Performances agronomiques et gestion des légumineuses dans les systèmes de productions végétales, In: *Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables*. Éditions Quæ, Versailles, 512 pages.
- Justes E., Mary B., Nicolardot B., 2009. Quantifying and modelling C and N mineralization kinetics of catch crop residues in soil: parameterization of the residue decomposition module of STICS model for mature and non-mature residues. *Plant and Soil*, 325, 171-185.
- Laurent F., Bouthier A., Aubrion G., Carrouée B., 1998. Le pois dans la rotation : comment maîtriser le risque nitrates ? *Perspectives Agricoles*, 240 (novembre), 50-56.
- Laurent F., Leveau V. 2014. La grande culture face aux (r)évolutions des marchés et politiques agricoles. In *Fertilisation et environnement. Quelles pistes pour l'aide à la décision ?* S. Pellerin, F. Butler, C. Guiard-Van Laethem coord. Éditions QUAE, pp 59-72.
- Le Bris X., Soenen B., Laberdesque M., Gouache D., Lorgeou J., Piquemal B., 2015. "CHN", a crop model to add value to phenotyping and approach genetic variation for RUE and WUE. Recent progress in drought tolerance conference: from genetics to modelling, 8 & 9 June 2015 – Montpellier (France).
- Mary B., Beaudoin N., Justes E., Machet J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science*, 50, 549-566.
- Makowski D., Wallach D., Meynard J.M., 1999. Models of yield, grain protein, and residual mineral nitrogen responses to applied nitrogen for winter wheat. *Agronomy Journal*, 91, 377-385.

- Philibert A., Loyce C., Makowski D., 2012. Quantifying uncertainties in N₂O emission due to N fertilizer application in cultivated areas. Plos One, 7, 1-9.
- Plaza-Bonilla D., Nolot J.M., Raffaillac D., Justes E., 2015. Cover crops mitigate nitrate leaching in cropping systems including grain legumes: Field evidence and model simulations. Agriculture, Ecosystems and Environment, 212, 1-12.
- Schneider A., Huyghe C., 2015. Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Éditions Quæ, Versailles, 512 pages.
- Sutton M.A., Howard C.M., Erisman J.W., Billen G., Bleeker A., Grennfelt P., Van Grinsven H. et Grizzetti B. 2011. The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press
- Voisin A.S., Salon C., Munier-Jolain N.G., Ney B., 2002. Quantitative effects of soil nitrate, growth potential and phenology on symbiotic nitrogen fixation of pea (*Pisum sativum* L.). Plant and Soil, 243, 31-42.

Remerciements

Ce projet a été soutenu financièrement par le compte d'affectation spéciale « développement agricole et rural » du Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt.