



HAL
open science

Atténuation des émissions des gaz à effet de serre dans les systèmes prairiaux

Raia Silvia Massad, Katja Klumpp, Nicolas Vuichard, Raphaël Martin, Xavier Leroux, Cornelia Rumpel

► **To cite this version:**

Raia Silvia Massad, Katja Klumpp, Nicolas Vuichard, Raphaël Martin, Xavier Leroux, et al.. Atténuation des émissions des gaz à effet de serre dans les systèmes prairiaux. [Contrat] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. 2017, 80 p. <hal-01851774>

HAL Id: hal-01851774

<https://hal.science/hal-01851774v1>

Submitted on 30 Jul 2018

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 CC BY-SA 4.0 - Attribution - ShareAlike - International License

ATTENUATION DES EMISSIONS DES GES DANS LES SYSTEMES PRAIRIAUX

AEGES

Février 2017

Projet de recherche coordonné par : *Raia Silvia Massad et Cornelia Rumpel*
Appel à projet de recherche : REACTIFF
N° de contrat : 12-60-C-0038

Coordination technique ADEME : Thomas EGLIN **Direction/Service** : Direction Production et Energie Durables / Services Forêt, Alimentation et Bio-économie



RAPPORT FINAL

REMERCIEMENTS

Nous remercions toutes les personnes qui ont participé à ce projet :

Le consortium :

Abad Chabbi (INRA . ECOSYS Grignon, 3PF Lusignan)
Benoit Gabrielle (Agroparistech . ECOSYS Grignon)
Cornelia Rumpel (IEES . Paris)
Katja Klump (INRA . UREP Clermont Ferrand)
Nicolas Vuichard (LSCE . Gif-sur Yvette)
Raia Silvia Massad (INRA . ECOSYS Grignon)
Raphael Martin (INRA . UREP Clermont Ferrand)
Xavier le Roux (Université de Lyon)

Les stagiaires, thésards et postocs :

Adeline Romian (M2, Université de Tours, IEES-Paris.)
Alexandra Crème (Thésarde, Université de Poitiers/INRA . 3PF Lusignan)
Lais Gonzaga Gomez (M2, INRA-ECOSYS Grignon, Université Marne la Vallée)
Marco Carrozi (INRA . ECOSYS Grignon)
Marine Vieille (Chambre Interdépartementale d'Agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort)
Tuo Lan (M2, UPMC, IEES-Paris)

Les responsables des sites du SOERE È ACBB :

Xavier Charrier (INRA . Lusignan)
Christophe Beranger (INRA . Lusignan)
Francois Gastal (INRA . Lusignan)
Frédérique Louault (INRA-Clermont-Ferrant)

Les participants à la réunion des parties prenantes :

Carole Piquemal (Cniel)
Caroline Guinot (INTERBEV)
Caroline Petitjean (IDELE)
Elisabeth Panac-Farbiaz (Ministère d'Agriculture)
Fiona Erhardt (INRA - Paris)
Francesca Degan (ACTA)
Hélène Chambaut (IDELE)Manuel Martin (INRA -Infosol)
Jean-Baptiste Paroissien (Institut de l'élevage)
Robert Colas (CITEPA)
Robert Trochard (Avalis)

CITATION DE CE RAPPORT

Massad Raia Silvia, Katja Klump, Nicolas Vuichard, Raphael Martin, Xavier Leroux et Cornelia Rumpel. 2017. Atténuation des émissions des gazes à effet de serre dans les systèmes prairiaux . Rapport final. ADEME. 79 pages.

En français :

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

En anglais :

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 . L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means

Table des matières

RESUME.....	5
1. CONTEXTE DU PROJET	7
2. OBJECTIFS.....	9
3. METHODOLOGIE	10
3.1. Programme scientifique et structuration du projet	10
3.2. Sites d'études	10
3.2.1 Lusignan	10
3.2.2 Theix/Laqueuille.....	13
3.3. Acquisition des données pour les différents travaux dans le cadre de l'ANR AEGES.....	14
3.3.1 Stockage du C des sols (sites Lusignan) (Tâche 2).....	14
3.3.2 Couplage entre MOS-processus microbiennes-flux GES (site Lusignan) (Tâche 2).....	14
3.4. Modélisation (tâches 3 et 4).....	17
3.4.1. Description des modèles.....	18
3.4.2. Spatialisation des modèles.....	20
3.4.3. Scenarios des simulations spatiales.....	22
3.4.4. Analyses de sensibilités	22
4. BILAN / PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS.....	23
4.1. Tâche 1 : Coordination.....	23
4.2. Tâche 2 : Compréhension de l'effet de différents modes de pratiques agricoles sur le fonctionnement biogéochimique et biologique des sols et sur les émissions associées de GES .	24
4.2.1. Stockage du C des sols: arrière effet de gestion de prairies sur la quantité des MOS des prairies.....	24
4.2.2. Couplage entre MOS-processus microbiennes-flux GES (site Lusignan)	26
4.3. Tâche 3 : Evaluation critique de la capacité des modèles à reproduire les effets des différents types de forçage anthropiques sur les stocks de matières organiques du sol et des émissions de GES.....	39
4.3.1. Evaluation critique des modèles.....	39
4.3.2. Nouvel outil pour simuler les rotations prairies . cultures (modèle FarmSim).....	45
4.4. Tâche 4 : Estimation des émissions de gaz à effet de serre par les surfaces agricoles en France	51
4.4.1. Résultats des modèles CERES-EGC et PaSIM.....	51
4.4.2. Résultats du modèle ORCHIDEE.....	57
5. RECOMMANDATIONS.....	59
5.1. Recherche	59
5.2. Acteurs	59
6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	60
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	62
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES	65
ANNEXES.....	70

Résumé

Les prairies sont des systèmes importants en termes de stockage du carbone et plus généralement de limitation des émissions de gaz à effet de serre GES (CO_2 et N_2O notamment). Leur introduction dans les cycles de cultures pourrait être une solution pour maintenir et à terme augmenter ce potentiel de puits de carbone des agroécosystèmes. Il existe deux verrous principaux : (1) une grande incertitude concernant la quantification des flux couplés de carbone et d'azote dans les systèmes prairiaux et (2) un manque d'évaluation des émissions de GES en réponse aux différentes pratiques agricoles (en particulier ceux des prairies : fertilisation, durée, retournement). Ceci nécessite une modélisation intégrée des émissions des GES et du stockage du carbone, tout en prenant en compte les rendements pendant la période de culture. Dans ce projet nous avons proposé de réduire l'incertitude concernant les prédictions des émissions de GES et de stockage du C et N faites par trois modèles (CERES-EGC, PaSim, ORCHIDEE) pour les agro-écosystèmes. Nous avons travaillé sur deux sites expérimentaux du système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement Agrosystèmes, cycles biogéochimiques, biodiversité (SOERE ACBB), l'un à Lusignan sur des prairies temporaires et l'autre à Laqueuille sur des prairies permanentes. Les flux des GES ont été mesurés sur ces deux sites depuis l'installation des dispositifs en 2005. Ces données ont été utilisées pour la modélisation. Afin de comprendre les processus contrôlant les émissions une expérience de terrain a été réalisée afin de déterminer les liens entre les caractéristiques microbiens ainsi que l'état des MOS et les flux de GES. Nos résultats ont permis de proposer un modèle conceptuel pour expliciter le rôle de groupes microbiens clés dans l'émission des GES. Nous avons aussi développé un modèle couplé qui permet de modéliser les flux des GES et le stockage de C dans les prairies temporaires. Des modèles spatialisés ont été également utilisés afin de produire des cartes de stockage du C dans les sols de prairie sous gestions différents et des émissions sur le territoire européen sous deux scénarii climatiques. Nos résultats montrent que la gestion des prairies affecte le potentiel de stockage de C ainsi que le fonctionnement et les rendements des prairies. Nos résultats montrent également que le fonctionnement et les rendements des prairies changeront sous réchauffement climatique et que ces changements risquent d'être perceptibles dès maintenant. Toutefois, les prédictions des émissions de N_2O étant encore peu fiables, il est nécessaire de continuer à travailler sur ces processus pour comprendre les interactions complexes et d'introduire les paramètres microbiens et ceux concernant les MOS dans les modèles. Pour comprendre l'effet des modes de gestion sur les émissions des GES et le stockage de C, l'utilisation des expérimentations de longue durée est indispensable.

Abstract

Grassland systems are important in terms of carbon storage and mitigation of greenhouse gas emissions, in particular those of CO₂ and N₂O. Their introductions into cropping cycles could be a solution to maintain and increase the carbon sink potential of agroecosystems. However, there are two important knowledge gaps: (1) a big uncertainty concerning the quantification of C and N fluxes in grassland systems and (2) a lack of evaluation of greenhouse gas emissions from soils under different management practices. This calls for integrated modelling of greenhouse gas emissions and carbon storage, while taking into consideration harvesting yields during crop phase. For this project, we proposed to reduce uncertainties concerning the prediction of greenhouse gas emissions and soil C and N storage by three models (CERES-EGC, PaSim, ORCHIDEE) for agroecosystems. We used two long-term experimental sites, which are part of an long-term observatory for environmental research, the so-called SOERE ACBB. The sites were located in Laqueuille (INRA Clermont-Ferrand) and Lusignan (INRA Poitou-Charentes). At both sites, greenhouse gas emissions were monitored since 2005. These data were used for our modelling approach. To understand the processes controlling greenhouse gas emissions, we carried out a common field experiment to determine linkages between microbial characteristics, soil organic matter status and greenhouse gas fluxes. Our results allowed us to propose a conceptual model to show the role of key microbial groups in the emission of greenhouse gasses. We also developed a coupled model allowing for the representation of greenhouse gas emissions and carbon storage in temporary grassland. We also used spatial models to produce maps of C stocks in grassland soil under contrasting management and maps of greenhouse gas emissions throughout Europe with different climate scenarios. Our results show that grassland management affects soil carbon storage potential as well as ecosystem functioning and yield. The also indicate that grassland functioning and yield changes with increasing global temperature and that these changes are noticeable from now on. However, the modelsq reproduction of N₂O emissions is still uncertain. Therefore it is necessary to continue working on processes to understand the complex interactions between organic matter, microbial communities and greenhouse gaz fluxes and to introduce these parameters in models. To understand the effect of management practices on greenhouse gas emissions and carbon storage in agricultural systems, the use of long term field experiments and research infrastructures is crucial.

1. Contexte du projet

Il est généralement accepté maintenant que l'essentiel du potentiel d'atténuation des émissions de GES du secteur agricole (89 % du potentiel technique) serait dû à la séquestration de carbone dans les sols (augmentation du puits) (GIEC, 2007). Pour augmenter une telle séquestration, et ainsi réduire les émissions de CO₂ et N₂O des pratiques agricoles optimales doivent être identifiées. Dans le cadre du projet AEGES nous nous sommes intéressés aux pratiques agricoles associées à la gestion des prairies et des rotations prairies-cultures. Les prairies représentent l'un des plus grands écosystèmes à l'échelle mondiale, sensiblement équivalent aux forêts en surface (Steinfeld et al., 2006), avec un potentiel de stockage de carbone organique entre 0,01 et 0,3 Gigatonnes C par an sur 3,7 milliards d'hectares (Lal, 2004).

En France on trouve des prairies « permanentes » avec un couvert végétal riche en espèces mais aussi des prairies « temporaires » ou « artificielles ». Ces dernières font partie du paysage agricole et sont plus ou moins associées à des cultures annuelles, et leur végétation est composée par un petit nombre d'espèces, voire d'une seule espèce. Généralement ces prairies sont gérées par l'activité d'élevage qui leur est associée. Dans les régions de polyculture-élevage se pose inévitablement le problème de l'usage qui est fait de la prairie : fauche ou pâturage, densité des animaux et durée de présence, nature et doses de fertilisants, périodes d'utilisation sur l'année et des conséquences qui en découlent sur la maîtrise des flux environnementaux (ex N₂O, séquestration du C).

Les prairies se présentent comme système favorable au stockage du carbone dans les sols grâce à une couverture végétale pérenne et une plus grande biomasse souterraine par rapport à la biomasse aérienne. Toutefois la quantité de matière organique du sol (MOS) stockée et en contrepartie les émissions de gaz à effet de serre (GES) dépendent du mode de gestion de ces prairies (retournement, fertilisation, fauchage, pâturage...). Notre compréhension de la biogéochimie des matières organiques dans les sols de prairies sous différentes gestions et les facteurs influençant leur dégradation et les émissions de GES reste limitée. En particulier, les modèles actuellement utilisés n'arrivent pas à reproduire de manière satisfaisante les effets des gestions de prairies sur les émissions de GES et le stockage de carbone, et ne prennent pas suffisamment en compte le couplage entre les différents cycles biogéochimiques (par exemple, le rôle du cycle de l'azote dans le stockage et la dégradation des matières organiques ; l'effet de différents modes de gestion des prairies sur l'émission des GES, δ) (Soussana et al. 2004). Ainsi pour que la prairie puisse jouer pleinement un rôle de régulation des émissions de GES, l'objectif est de maximiser son effet sur la séquestration des matières organiques tout en minimisant i) les risques d'émission de N₂O liées notamment aux apports d'engrais azotés et à la gestion des déjections animales, et ii) limitant les inévitables émissions de CH₄ par les animaux. Afin de développer des techniques de gestion permettant d'augmenter le stockage des matières organiques dans le sol et de réduire les émissions des GES, notamment du N₂O, il est fondamental d'améliorer la compréhension mécaniste des couplages et découplages entre cycles de C et N ainsi que la modélisation intégrée de ces processus permettent d'établir des bilans quantifiés, doivent être améliorées. Cette amélioration implique la prise en compte de différentes échelles d'espace et de temps pertinentes pour la gestion des prairies et l'alternance entre prairies et cultures et vice-versa. L'enjeu est *in fine* de modéliser les émissions de GES des systèmes prairiaux au niveau de la France et de formuler des recommandations aux agriculteurs qui leur permettront de réduire leurs émissions de GES et de préserver la qualité des sols, sans pour autant impacter leurs productions.

Dans ce contexte, le concept d'intensification écologique prend toute son importance. La séquestration des matières organiques dans les sols de prairies pourrait contrebalancer jusqu'à 4% des émissions mondiales de GES (Lal, 2004). Pour cette raison, l'estimation du bilan de gaz à effet de serre des prairies représente un enjeu important. Les émissions de GES par les systèmes agricoles sont très variables et dépendent des conditions pédoclimatiques ainsi que des pratiques agricoles. L'utilisation des modèles pour simuler les émissions de GES reste un outil indispensable afin de pouvoir prendre en compte toute la diversité des conditions et faire des évaluations sur des échelles spatiales et temporelles étendues. Cependant, les flux simulés sont encore entachés de fortes incertitudes, surtout en ce qui concerne les écosystèmes de prairies temporaires et leur rôle dans les cycles de cultures (Soussana et al. 2004). Il est donc important d'améliorer les modèles existant avec l'ensemble des données acquises sur les observatoires prairies/cultures. Il s'agit aussi de tester et calibrer ces modèles pour différents modes de gestion et en considérant la place des prairies dans des systèmes de rotation avec différentes cultures à une échelle de temps de l'ordre de la décennie.

Les pratiques agricoles qui minimisent les fuites de GES et stockent les MOS doivent être recherchées dans une optique d'amélioration du couplage maximum entre les éléments, notamment C et N. Pour ce faire, les flux de GES liés à ces deux éléments doivent être pris en compte simultanément.

Le N₂O émis par les sols et le CH₄ émis par les ruminants ont des pouvoirs de réchauffement global à 100 ans qui sont respectivement équivalent à 265 et 28 fois celui du CO₂ (GIEC, 2013). Il importe donc de considérer ces différents gaz, pour évaluer le bilan entre les 3 effets (séquestration du carbone, émissions de N₂O et émissions de CH₄) en fonction de l'intensification de la production des prairies et de leur utilisation par les herbivores. L'analyse du concept d'intensification écologique permet de voir jusqu'à quel niveau d'intensification les systèmes d'élevage utilisant des prairies peuvent être gérés pour maximiser leurs performances socio-économiques sans affecter de manière trop sensible leurs performances écologiques et environnementales.

Pour répondre à cet objectif, nous proposons d'évaluer les émissions de GES pour certaines grandes pratiques agricoles utilisées en France pour gérer les prairies et les rotations prairies-cultures. Dans ce cadre nous essaierons de répondre à 4 questions clés :

- Quel est l'effet des différentes pratiques agricoles (fauche, pâturage, charge animal, fertilisation, retournement) sur la qualité des MOS et l'activité microbienne ?
- Quel est le bilan net de GES (émissions de N₂O et de CH₄ et séquestration de C) des prairies sous différents modes de gestions (pâturage intensif et extensif, fauchage, retournement, fertilisation N) ?
- Peut-on quantifier à l'échelle de la parcelle et avec des mesures de terrain et la modélisation, les effets des rotations prairies-cultures sur le bilan net de GES de ces systèmes ?
- Quel est l'impact de l'introduction d'une rotation prairie-culture dans les bilans nationaux de GES et peut-on en déduire des recommandations pour une gestion des prairies favorables en termes de bilan de GES ?

2. Objectifs

Pour répondre à ces questions, nous nous sommes donné trois objectifs :

- Le **premier objectif** du projet a été de **mieux prendre en compte dans les modèles de bilan de GES les avancées récentes concernant la compréhension des processus microbiens** (dénitrification/nitrification, décomposition) lié aux cycles de l'azote et du carbone dans le sol ainsi qu'à leurs interactions. Pour répondre à cet objectif nous avons renforcé le dialogue entre expérimentateurs et modélisateurs afin i) d'identifier les processus clés devant être amélioré dans les modèles proposés et ii) de calibrer ces modèles avec les mesures existantes.
- Nous avons eu pour **deuxième objectif** de **étudier l'effet des pratiques agricoles sur le sol et son fonctionnement**. L'originalité de notre approche consistait à l'étude combinée de cycles de carbone et de l'azote en se focalisant à la fois sur la MOS et la biomasse microbienne dans le but de générer un schéma mécaniste expliquant les flux. Pour répondre à cet objectif, nous nous sommes basés sur les informations de changement de stockage des MOS. Dans des situations spécifiques, nous avons étudié la composition des MOS, et leur distribution dans différents compartiments et leur susceptibilité à se dégrader impacté par les pratiques contrastées (modes d'occupation du sol, successions, niveaux d'intensification, etc...). Ces données ont été complétées par l'analyse des communautés microbiennes du sol. Les résultats ont été utilisés pour proposer de nouveaux indicateurs moléculaires de l'état des MOS et pour élaborer de nouveaux paramètres de transformation de MOS dans le sol qui seront intégrés dans les différentes approches de modélisation.
- Le **troisième objectif** a concerné **l'évaluation de la capacité des modèles à reproduire l'effet des différents forçages anthropiques (pratique agricole) sur le stockage de matière organique (MOS) et les émissions de GES à l'échelle de la parcelle**. Nous avons répondu à cet objectif en utilisant les bases de données existantes sur le SOERE ACBB et le réseau NO-GAS qui ont été complétées par des inventaires de stocks de matières organiques et en comparant les résultats des différents modèles.
- Le **quatrième objectif** a consisté à **proposer des modes de gestion permettant d'atténuer ces émissions à l'échelle de la France**. Afin de répondre à cet objectif, nous avons comparé des approches de modélisations (générique vs spécifique) en utilisant d'une part le modèle ORCHIDEE et d'autre part une combinaison des modèles CERES-EGC et PaSIM et sa version spatialisés (PaSim-Spatial). Ceci nous a permis d'évaluer l'impact des différents modes de gestion, de tester des scénarios d'atténuation de GES en ce qui concerne fertilisation, type de prairie et prairie vs culture à l'échelle de la France entière.

Un schéma expliquant les différentes étapes du projet en lien avec l'existant (état de l'art) et les produits finaux de notre projet est présenté dans la Figure 2.1.

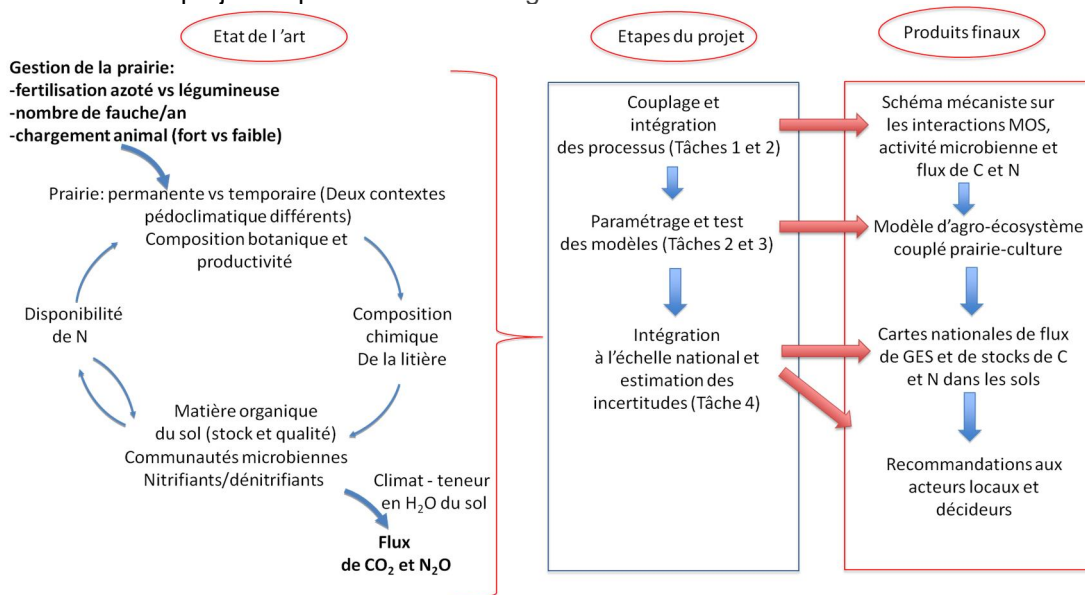


Figure 2.1: Etat de l'art, étapes du projet et produits finaux en lien avec nos quatre objectifs

3. Méthodologie

3.1. Programme scientifique et structuration du projet

Pour répondre aux quatre objectifs le projet a été structuré en 4 tâches avec 14 activités principales (Fig. 2). Ces tâches ont permis :

1. de coordonner les actions proposées par les différents acteurs (Tâche 1). L'activité essentielle associée à cette tâche a été (1) d'organiser des réunions et de faciliter le dialogue et le travail en commun entre modélisateurs et expérimentateurs dans le but de proposer une approche plus mécaniste décrivant certains processus dans les modèles. Une autre activité associée à cette tâche a été (2) d'organiser un workshop qui permettra aux différents acteurs (modélisateurs et expérimentateurs) de communiquer sur les avancées récentes dans les 2 domaines afin de mieux intégrer les processus microbiens dans les modèles et d'identifier de nouvelles questions à traiter.

2. d'approfondir notre compréhension de l'effet de différents modes de pratiques agricoles sur son fonctionnement biogéochimique et biologique et sur les émissions associées de GES (Tâche 2). Les activités dans cette tâche ont été: (5) de quantifier la dynamique des stocks et la qualité des MOS en réponse aux modes de gestion sur les sites étudiés de l'OPRE ACBB, (6) d'étudier la répartition du carbone et de l'azote dans les différentes fractions du sol et d'évaluer leurs susceptibilité à la dégradation microbienne, (7) de caractériser l'effet des différents traitements sur l'activité, l'abondance et la composition des communautés microbiennes impliquées dans les émissions de N₂O, en fonction de ces mêmes fractions et pour le sol dans son ensemble.

3. de faire une évaluation critique de la capacité de différents modèles à reproduire l'effet de pratiques agricoles sur le stockage de matière organique et les émissions de GES (Tâche 3). Les activités dans cette tâche ont été (9) de simuler à l'aide de différents modèles l'effet de certaines pratiques agricoles sur les émissions de GES et le stockage de carbone et de l'azote dans les sols pour les sites du SOERE-ACBB (Lusignan et Theix-Laqueuille) et Grignon, et (10) de comparer ces simulations entre elles et de les confronter aux bases de données existantes afin de quantifier l'incertitude associée aux simulations. (11) Assimiler les résultats des expérimentations (tâche 2) pour faire évoluer la représentation de certains processus clés dans ces modèles.

4. de proposer de meilleures estimations des émissions de GES à l'échelle de la France et des modes de gestion permettant d'atténuer ces émissions (Tâche 4). Les activités dans cette tâche ont été de: (12) spatialiser le modèle couplé CERES-EGC/PaSIM afin de produire des simulations des cycles prairies-cultures à l'échelle de la France; (13) générer des cadastres d'émissions de GES, de stockage de carbone et de production agricole dans ce type d'agroécosystèmes sur toute la France en relation avec les différentes pratiques agricoles avec en appliquant deux modèles CERES-EGC/PaSIM et ORCHIDEE, et comparer les deux approches de modélisation ; (14) proposer des recommandations aux acteurs locaux et décideurs en se basant sur les résultats des modèles.

3.2. Sites d'études

Nos travaux se sont focalisés sur deux sites du système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement Agrosystèmes, cycles biogéochimiques, biodiversité (SOERE ACBB), comprenant des prairies permanentes (site Theix/Laqueuille) et des prairies temporaires (site Lusignan). Ces sites expérimentaux sont installés depuis 2005. Les gestions de prairies étudiées sont pour la plupart représentatif par rapport aux gestions de prairies en France. Pour des raisons scientifiques, un traitement sans apport en N a été également installé. Dans le cadre du SOERE ACBB de nombreuses expérimentations ont été conduites afin de caractériser les émissions de GES dans différents systèmes prairiaux. Ainsi l'UREP de Clermont-Ferrand conduit depuis 2005 le dispositif Theix-Laqueuille qui comprend un gradient de pâturage (forte et faible chargement bovin, ovin) et fertilisation-fauche en prairie permanente. A Lusignan les GES sont mesurés en continu sur des parcelles de prairie permanente et temporaire sous différentes pratiques agricoles. Les différents paramètres enregistrés à ce jour pour les deux sites et ceux, que nous avons effectués dans le cadre de l'AGES sont détaillés dans le Tableau 3.1.

3.2.1 Lusignan

Les deux sites expérimentaux sont gérés par l'INRA. Le site de Lusignan se situe dans l'ouest de la France dans le département de Poitou-Charentes 30 km à l'ouest de Poitiers (46°25'12.91" N; 0°07'29.35" E). L

climat est de type océanique avec des sécheresses estivales marquées. Les moyennes annuelles de températures et de précipitations de 10.5 °C et de 800 mm respectivement (Chabbi et al., 2009). Le dispositif expérimental est caractérisé par l'insertion de séquences de prairies temporaires dans une rotation de cultures céréalières. Les prairies sont semées et constituées d'un mélange de trois espèces de poacées (*Lolium perenne*, *Festuca arundinacea* et *Dactylis glomerata*) et la rotation céréalière est conduite avec des cultures de maïs (*Zea mays*) suivi de blé (*Triticum aestivum*) et d'orge (*Hordeum vulgare*). Les prairies ainsi que les cultures sont fertilisées avec de l'azote sous forme NH_4NO_3 . La quantité ajoutée est calculée à partir d'un reliquat d'azote mesuré et varie entre 36 et 160 $\text{kg N ha}^{-1} \text{an}^{-1}$ pour les cultures et entre 170 et 380 $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ pour les prairies. Les traitements sont installés sur un sol de type Brunisol saturé profond, qui s'est développé sur argile rubéfiée. Le terrain est plat situé à une altitude de 151m. La Figure 3.1 et le Tableau 3.2 ci-dessous donnent l'implantation des différents traitements ainsi que leurs descriptions.

Le dispositif à Lusignan comprend:

- ~ Prairie de 3 ans en alternance avec cycle de grandes cultures de 3 ans
- ~ Prairie de 6 ans en alternance avec cycle de grandes cultures de 3 ans
- ~ Prairie permanente en place depuis 2005
- ~ Rotations de grandes cultures (maïs, blé, orge)
- ~ Différents niveaux de fertilisation azotée (fertilisé et non fertilisé)

En 2011, le premier cycle des prairies a pris fin, et les prairies de 3 ans et 6 ans ont été retournées puis remises en cultures annuelles pour 3 ans). Cela a permis en 2014 d'évaluer l'arrière effet induit par des différents modes de gestion de prairie. Sur ce site ont été mesurées les émissions des gaz à effet de serre, les stocks de carbone du sol, les caractéristiques des MOS et les caractéristiques de communautés microbiennes nitrifiantes et dénitrifiantes.

Tableau 3.1 : Mesures disponibles sur les sites expérimentaux et mesures effectuées dans le cadre d'AEGES

	Lusignan, Poitou-Charentes : prairie temporaire (rotations prairies-culture)	Theix-Laqueuille- Auvergne : Prairie permanente
Données disponibles depuis printemps 2005 (en continue)	Flux de CO_2 , H_2O et N_2O , Flux de DOC et DON, Stock de C et de N avec la profondeur, LAI (Leaf Area Index) Dépôt solide Biomasse aérienne et souterraine, Diversité microbienne (nitrifiant/dénitrifiant), Donnée météorologique Humidité de sol avec la profondeur) Pratique culturales et gestion	Flux de CO_2 , H_2O et N_2O , Flux de méthane Flux de DOC et DON, Stock de C et de N avec la profondeur, LAI Dépôt solide Biomasse aérienne et souterraine, Diversité microbienne (nitrifiant/dénitrifiant), Donnée météorologique Humidité de sol avec la profondeur) Pratique culturales et gestion
Analyses effectués dans le cadre d'AEGES	Stocks de C et N spatialisés Mesures émissions N_2O Paramètres MOS Paramètres microbiens	Stocks de C, N spatialisés Paramètres microbiens

Tableau 3.2 : Plan expérimentale du SOERE ACBB

Petites parcelles (0.4 ha)		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
C	Culture	Maïs	Blé	Orge	Maïs	Blé	Orge	Maïs	Blé	Orge	Maïs
T3N+	Prairie fauchée : fertilisée, 3 ans	Maïs	Blé	Orge	Prairie N +			Maïs	Blé	Orge	
T6N+	Prairie fauchée : fertilisée, 6 ans,	Prairie N +						Maïs	Blé	Orge	
T6N-	Prairie fauchée : non fertilisée, 6 ans	Prairie N -						Maïs	Blé	Orge	
G	Prairie fauchée: fertilisée	Prairie N +									
Grandes parcelles (3ha)											
P1	Prairie fauchée : fertilisée, 6 ans	Prairie N +						Maïs	Blé	Orge	
P2	Prairie pâturée : légumineuse,	Prairie leg						Maïs	Blé	Orge	
P3	Prairie fauchée : fertilisée	Prairie N +									
P4	Prairie pâturée: fertilisée	Prairie leg									

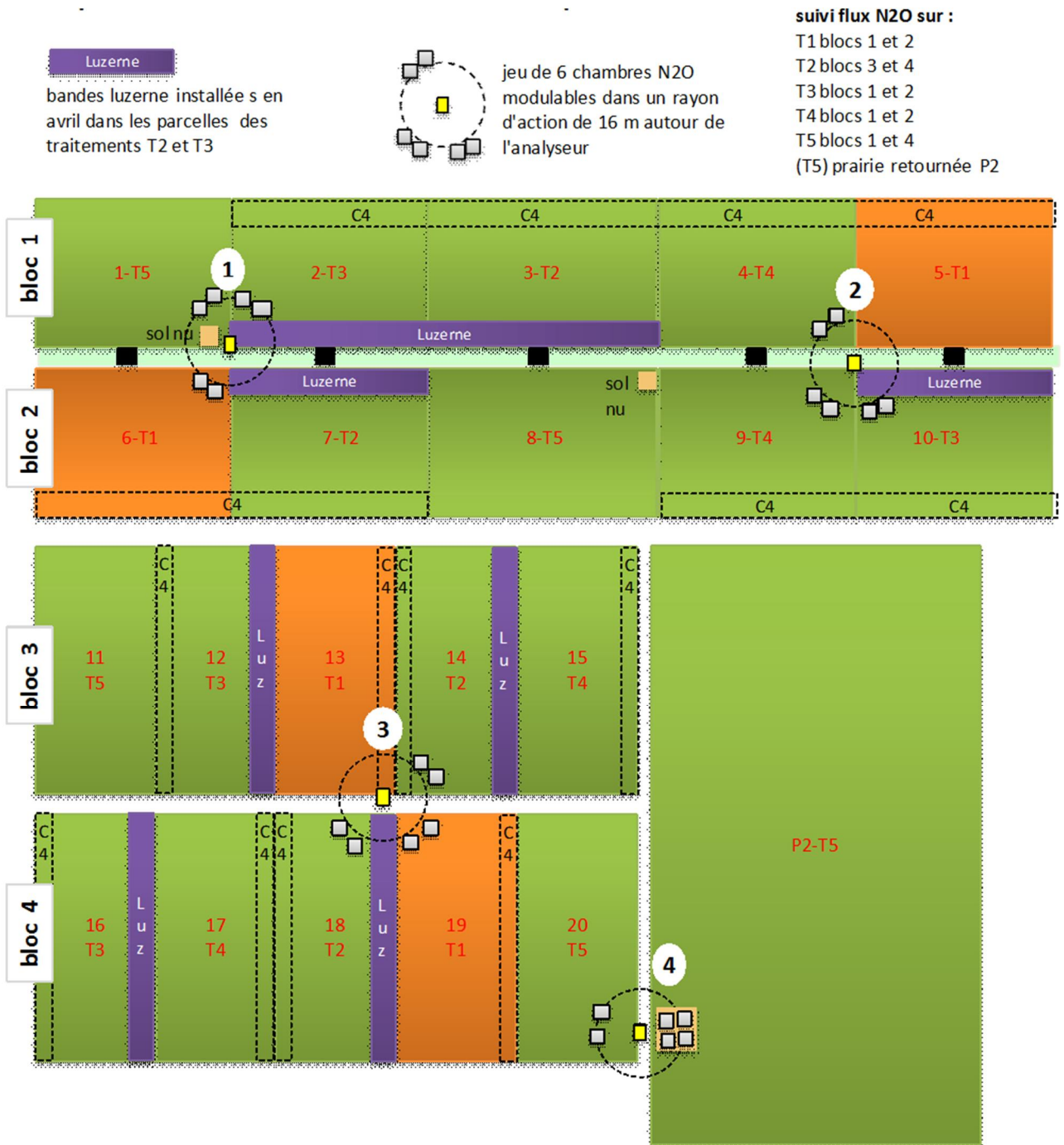


Figure 3.1: Site expérimental de Lusignan et le placement des chambres de mesures de GES dans le cadre du projet AEGES. Se référer au tableau 2 ci-dessus pour une description des différents traitements.

3.2.2 Theix/Laqueuille

Le site de Theix/Laqueuille se situe en Auvergne 40 km à l'ouest de Clermont-Ferrand (45.6510° N, 2.7331° E). Le site est caractérisé par des prairies permanentes sous différents gestions. Les espèces dominantes sont *Lolium perenne*, *Festuca arundinacea*, *Dactylis glomerata*, *Alopecurus pratense*, *Elymus repens*, *Taraxacum officinale* et *Trifolium repens* à Theix et *Agrostis capillaris*, *Dactylis glomerata*, *Trisetum flavescens*, *Poa pratense*, *Festuca rubra*, et *Trifolium repens* à Laqueuille. Le climat est de type semi-continentale montagnard avec une température annuelle de 8.7°C à Theix et 8°C à Laqueuille et des précipitations variant de 800 mm par an à Theix et 1000 mm à Laqueuille. Les sols sont un Brunisol développé sur substrat granitique à Theix et un Andosol sur substrat basaltique à Laqueuille. Theix est situé à 880 m d'altitude, et Laqueuille à 1000 m.

Le dispositif à Theix-Laqueuille (Theix-Laq) comprend des prairies permanente (>30 ans) en différents modes d'exploitation : pâturage versus fauche.

Le dispositif à Theix est conduit avec deux modes de pâturage (exploitation à fort chargement par des bovins (de l'ordre de 1 UGB/ha) ou à faible chargement (de l'ordre de 0.5 UGB/ha) par des bovins ou des ovins. Sur des parcelles conduites en fauche, deux niveaux de fertilisation azotée ont été mis en place (avec restitutions minérales NPK ou PK ou sans restitution). A Laqueuille, les traitements consistent à un pâturage bovin à fort chargement animal (1.0 UGB/ha) et fertilisation minérale (210 N/ha) ou faible chargement animal (0.5 UGB/ha) sans fertilisation. Sur ce site ont été mesurés les émissions de gaz à effet de serre, les stocks de carbone du sol, et les caractéristiques de communautés microbiennes nitrifiantes et dénitrifiantes.

3.3. Acquisition des données pour les différents travaux dans le cadre d'AEAGES

Nous avons utilisé les sites du SOERE de manière distincte. Ainsi, nous présentons les matériels et méthodes utilisées par rapport aux grandes thématiques.

3.3.1 Stockage du C des sols (sites Lusignan) (Tâche 2)

Pour évaluer le changement des stocks de C et N des sols dans différentes profondeurs jusqu'à 90 cm, nous avons effectué un échantillonnage géostatistique en respectant une grille mise en place en 2005. Le prélèvement est effectué à l'aide d'une tarière (120 cm de longueur et \varnothing 18 mm). Le sondage a été réalisé selon un principe de maille de 10 x 10 m tiré au sort. En 2005, au total 400 sondages ont été effectués dont 350 se trouvent dans les petites parcelles expérimentales I à IV. Certains échantillons (total 76) ont été répétés trois fois à 50 cm de distance pour la prise en compte de la micro-hétérogénéité spatiale. Chaque carotte de sol prélevée, a été coupée par la suite à quatre profondeurs (0-30, 30-60, 60-90 et 90-120 cm). Cette démarche d'échantillonnage, couplée avec une analyse géostatistique, permet à la fois une analyse fine de l'ampleur de la variabilité spatiale et sa structuration probablement héritée des modes d'utilisation antérieure des sols. En 2014, au total 1599 échantillons de sol ont été prélevés sur trois profondeurs (0-30, 30-60 et 60-90 cm). Cet échantillonnage géo-référencé a permis de générer des cartes des stocks de MOS en 2005 et 2014 et ainsi d'évaluer si les traitements influencent ces stocks après une période de 9 ans et à quel profondeur.

3.3.2 Couplage entre MOS-processus microbiennes-flux GES (site Lusignan) (Tâche 2)

3.3.2.1 Campagne de terrain et échantillonnage

Pour intégrer des processus concernant le turnover des matières organiques du sol dans les modèles, qui simulent les émissions des gaz à effet de serre, il est nécessaire de faire le lien entre (1) composition des MOS, (2) composition et activité des communautés microbiennes des sols et (3) flux de CO₂ et N₂O. Nous avons donc conduit une campagne de mesures et d'échantillonnage en printemps 2014 pendant un mois sur le site de Lusignan en se focalisant sur les différentes gestions des prairies fauchées. Cette période a été choisie, car il existe un fort potentiel d'émission de GES, notamment de N₂O, dû aux pluies abondantes et la présence des activités agricoles (fertilisation, labour). Nous avons mesuré les GES émis par les sols sous tous les traitements du SOERE à l'aide de chambres statique en continu (Figure 3.2). Le sol a été échantillonné avant et après labour directement dans les chambres de mesure des GES. Nous avons prélevé des échantillons perturbés et non-perturbés des premiers 10 cm du sol. Ces échantillons ont été tamisés sur place et partagés entre les deux laboratoires BIOEMCO et LEM afin d'assurer une caractérisation des MOS et des paramètres microbiens sur les mêmes échantillons.



Figure 3.2 : Chambres de mesures GES sur terrain et échantillonnage des sols en printemps 2014

3.3.2.2 Analyse des MOS

Nous avons mesuré des paramètres dont la prise en compte dans les modèles est susceptible d'améliorer la prédiction des émissions de GES.

- Analyses physiques

La humidité du sol a été déterminée après séchage de sol frais à 105°C dans une étuve. Nous avons utilisé 5g du sol frais (M_m). Après séchage pendant 48h nous avons re pesé l'échantillon (M_d) et calculé la teneur en eau (w , gH₂O g⁻¹ sol sec) avec la formule suivante:

$$w = \frac{M_m - M_d}{M_d} \times 100$$

Pour le calcul des stocks, la densité apparente d (g cm⁻³) a été mesuré par détermination de la masse sèche (M_s) d'un volume (V) du sol échantillonné à l'aide d'un cylindre avec un volume connu: $V = \frac{M_s}{d}$ (Mathieu and Pieltain, 1998).

- Fractionnement physicochimique

Un fractionnement des sols a été effectué par une combinaison des techniques physiques et chimiques. Nous avons utilisé le protocole introduit par Zimmermann et al. (2007) avec des modifications de Poeplau et al. (2013). Nous avons obtenu cinq fractions, qui correspondent aux compartiments utilisés par le modèle RothC. Les deux fractions, matière organique particulaire (POM) et dissoute (DOM) représentent le carbone labile. Les fractions limon et argile (S+C) et agrégats et sable (S+S) représentent le compartiment avec un turnover lent. Le compartiment récalcitrant est représenté par la fraction résistante à une oxydation chimique effectuée à l'aide du NaOCl (6%). Nous avons fractionné 30 g de sol, qui ont été dispersé dans 150 mL d'eau avec une sonde à ultrason avec une énergie de 22J/mL pour casser les macro-agrégats. Ensuite la suspension du sol a été tamisé et la fraction > 63µm, lyophilisé et soumis à un fractionnement densimétrique pour récupérer les fractions S+A à l'aide d'une solution de Sodium Polytungstate avec une densité de 1.8 g cm⁻³. Après centrifugation (15 minutes à 1000g), la fraction POM a été séparée par décantation et filtrée et lavée sur un filtre de verre (Whatman GF/C 0.45µm). La fraction < 63µm a été également passée sous pression sur un filtre de 0.45 µm. Nous avons déterminé le carbone organique dissout (DOC) avec un analyseur (TOC 5050A shimadzu). Le résidu solide comprenait la fraction S+C. La fraction rSOC a été déterminée par oxydation avec de hypochlorite de sodium de la fraction S+C. La réaction a eu lieu pendant 18 heures et à 25°C. Après oxydation, qui a été répétée deux fois nous avons lavé et lyophilisé toutes les fractions avant de les analyser pour leur teneur en C et N avec un analyseur élémentaire (CHN NA 1500, Carlo Erba).

- Analyses chimiques

Les concentrations en C et en N des échantillons de plante et de sol ont été mesurées avec un analyseur élémentaire (Flash EA, Thermo Electron Corporation, Bremen, Germany). Comme des carbonates ont été absents dans les échantillons, nous considérons qu'il s'agit du carbone organique. Le azote organique (ON) a été calculé par différence à partir de l'azote total et l'azote inorganique (IN).

La concentration en phosphore total du sol (P) a été déterminé avec la méthode de combustion (Walker and Adams, 1958) modifiée par Ivanoff et al. (1998). Nous avons utilisé 0.5 g du sol sec, qui a été mis dans un four à 550°C pendant une heure. Ensuite, l'échantillon a été extrait pendant 24h avec 30 ml de l'acide sulfurique (1M H₂SO₄). Un deuxième échantillon, non brûlé a été extrait également. Après centrifugation à 10000 rpm pour 10 min le P a été analysé par photométrie à 880 nm dans le surnageant après complexation avec de l'acide molybdenum (Murphy and Riley, 1962). Le phosphore organique (OP) a été déterminé par différence.

La concentration des lignines des sols totaux a été déterminé après oxydation avec du cuivre (CuO) (Hedges and Ertel, 1982; Kogel and Bochter, 1985) et quantification chromatographique des monomères libérés. L'oxydation a été effectuée avec de l'oxyde du cuivre à haute température (172°C) dans des conditions basiques (2 M NaOH) avec 500 mg de sol, 250 mg de CuO, 50 mg de hexahydrate d'ammonium ferrique et 50 mg de glucose. Les extraits ont été purifiés par acidification et extraction en phase solide des monomères phénoliques provenant de lignine à l'aide des colonnes C18. Les monomères ont été dérivés avec du BSTFA et quantifiés avec un chromatographe (HP GC 6890) équipé d'un analyseur à ionisation de flamme et une colonne SGE BPX-5 (50 m longueur, 0.25 mm diamètre interne, 0.32 µm revêtement). Les échantillons ont été injectés avec un spit (1:10). La température du four a été programmée à 100°C pendant 2 min, après de 100°C à 172°C avec une augmentation de température de 8°C min⁻¹, de 172 à 184°C à 4°C min⁻¹, et de 184 à 300°C à 10°C min⁻¹. La quantité de lignines est représentée par la somme des produits phénoliques de l'oxydation: des phénols de type vanillyl (V), syringyl (S) et p-coumaryl (Co) sous forme d'acides (Ac), d'aldéhyde (Al) et cétone. Ainsi la concentration des phénols types V est représentée par la somme des concentrations de vanilline, acetovanillone and acide vanillique. La concentration des phénols de type S est la somme de syringaldehyde, acetosyringone et acide syringique. La concentration des phénols type Co est représentée par la somme des acides ferulique et p-coumarique. Nous avons calculé plusieurs rapports en utilisant les monomères phénoliques ((Ac/Al)V, (Ac/Al)S, Co/V and S/V ratio) pour caractériser l'origine et l'état de dégradation des lignines.

La concentration des sucres neutres non-cellulosiques a été déterminée pour les sols totaux et les fractions physicochimiques. Leur contribution dans la fraction DOC a été déterminée par différence. Des monomères de sucre ont été quantifiés après hydrolyse avec l'acide trifluorique. Avant quantification par chromatographie, les monomères ont été transformés en acides d'alditol par la méthode introduite par Rumpel and Dignac (2006) et modifié par Eder et al (2010). L'hydrolyse a été effectuée à 105°C pendant 4h en utilisant 500 mg du sol sec et 5ml de 4M TFA. Après dérivation les monomères de sucre ont été extraits avec 1 mL de dichlorométhane. Les analyses ont été effectuées avec un chromatographe équipé d'un détecteur à ionisation de flamme et une colonne SGE BPX 70 (60m, 0.32 mm diamètre interne, 0.25 µm épaisseur du film) et le programme de température suivant: de 200 à 250°C à 8°C.min⁻¹ et 15 min isotherme à 250°C. La concentration des sucres est représentée par la somme des monomères: pentoses (C5:xylose, ribose and arabinose), hexoses (C6:glucose, galactose and mannose), and desoxyhexoses (fucose and rhamnose) (Kögel-Knabner, 2002). Pour déterminer l'origine végétale ou microbienne des cycles, les rapports C6/C5 et desoxyC6/C5 ont été calculés. Le degré de décomposition des sucres végétales a été déterminé par le rapport xylose/mannose (Oades, 1984).

3.3.2.3 Caractérisation des communautés microbiennes du sol

La biomasse microbienne a été déterminée en utilisant un échantillon du sol frais avec la méthode d'extraction après fumigation au chloroforme (Vance et al., 1987). Cette technique est basée sur la solubilisation des cellules microbiennes par une fumigation avec le chloroforme pendant 16h. Le C et N dissoute ont été extraits du sol par une solution de 0.03 M K₂SO₄ solution (1:4). Après filtration et lyophilisation, les teneurs en C et N des extraits ont été déterminés (CHN NA 1500, Carlo Erba). Les teneurs en C et N microbiens (Cmic et Nmic) ont été calculés par différence d'un échantillon fumigé et non-fumigé et multipliés avec le facteur de 2,64 pour le C (Vance et al., 1987) et 1,85 pour le N (Brookes et al., 1985).

Pour analyser les communautés microbiennes nitrifiantes et dénitrifiantes, l'ADN a été extraite de 0.5g du sol congelé après échantillonnage avec un kit d'extraction (Power Soil™ DNA Isolation Kit, MO BIO laboratories, Carlsbad, CA, USA). Les abondances des groupes dominants des nitrifiants et dénitrifiants ont été quantifiées, correspondant à 6 groupes fonctionnels. D'abord, les abondances des archaea et des bactéries oxydant l'ammonium (AOA et AOB) ont été mesurées par PCR quantitative. Nous avons visé des séquences de gènes fonctionnels amoA, qui codent la monooxidase d'ammonium, qui est spécifique pour ces groupes microbiens. Nous avons amplifié les gènes selon la méthode de Simonin et al (2015). Les échantillons ont été analysés deux fois par un Lightcycler 480 (Roche Diagnostics, Meylan, France). Nous

avons vérifié qu'il n'y avait pas d'inhibition de PCR. Dans un deuxième temps nous avons estimé l'abondance des dénitrifiants par PCR quantitative, en visant les gènes nirK, nirS, nosZ1 et nosZ2, qui codent les réductases du nitrite, avec un noyau cuivre ou de type cd1, ainsi que la réductase de l'oxyde d'azote. Les séquences NirK/S ont été amplifiées d'après la méthode décrite par Baudoin et al. (2009).

3.3.2.4 Mesure des flux de C et N au laboratoire

La minéralisation potentielle du C et de N (C_{min} et N_{min}) a été déterminée dans des conditions contrôlées en utilisant du sol frais tamisé à 4 mm. Les échantillons ont été incubés avec trois répétitions de 30g et 50g dans des bocaux de 1L à 20°C pour 56 jours. Tous les échantillons ont été pré-incubés pour 2 jours et flashés avec de l'air sans CO₂ au début d'incubation. Pour empêcher des conditions anaérobies nous avons remplacé l'air dans les bocaux par l'air synthétique sans CO₂ régulièrement. Les concentrations cumulées de CO₂ produit au cours de l'incubation ont été mesurées les jours 0, 1, 3, 7, 10, 14, 21, 28, 42 et 56 avec un chromatographe (Agilent 590). La minéralisation du C a été modélisée avec R (Studio Version 0.98.1062) en utilisant un modèle exponentiel du premier ordre à un pool de C avec l'équation :

$$C(t) = C_0(1 - e^{-kt})$$

où C(t) est la quantité de C minéralisée après un temps t, C₀ est la quantité initiale du C organique, t est le temps et k est une constante (jour⁻¹). Le sol a été collecté aux jours 7, 14, 28 et 56 pour suivre la minéralisation de l'azote. Les concentrations en nitrate et en ammonium ont été mesurées (voir ci-dessous).

Les productions potentielles et semi-potentielles brute et nette du N₂O ont été déterminées pour chaque échantillon. La nitrification potentielle a été mesurée comme production de NO₂⁻ plus NO₃⁻ après amendement des sols avec NH₄⁺. La production brute de N₂O a été mesurée après amendement des sols avec NO₃⁻ et C labile. De plus l'air dans les bocaux a été purgé par un mélange de He:C₂H₂ pour assurer des conditions anaérobies et l'inhibition de la réductase du N₂O (Patra et al 2005). Les échantillons du sol ont été incubés à 28°C pour 8h. La concentration de N₂O a été mesurée après 2h, 4h, 6h et 8h avec un chromatographe. Nous avons observé une production linéaire de N₂O. La production nette de N₂O a été mesurée de manière similaire mais sans inhibiteur, ainsi permettant la réduction de N₂O en N₂. La production semi-potentielle de N₂O a été également mesurée après amendement des sols avec un seul amendement de NO₃⁻, ou de C labile.

3.3.2.5 Mesure des flux de N₂O sur terrain

Les émissions de N₂O and CO₂ ont été mesurées avec des chambres statiques en continu selon la configuration représentée dans la figure. 4. Le système de mesure est effectué selon Laville et al. (2009). Ces chambres mesurent 30 cm de hauteur et 70 cm de largeur et de longueur. Chaque chambre a été programmée pour se fermer toutes les 90 minutes pendant une durée de 15 minutes. Chaque jour 16 cycles de mesure ont été réalisés par système. Quatre chambres ont été posées dans chaque traitement. Nous avons effectué des mesures pendant deux périodes du 13.3 au 26.3 2014, et du 16.4 au 27.5.2014. Des mesures de l'humidité et de la température du sol ont été effectuées en utilisant des sondes TDR (Time Domain Reflectometry) installées à 10, 20 et 30 cm dans la parcelle P2-T5 (voir figure 4).

3.4. Modélisation (taches 3 et 4)

La modélisation est un outil efficace pour reproduire les effets des pratiques agricoles sur les rendements des systèmes agricoles, sur le stock de matière organique du sol et sur les émissions de gaz à effet de serre à la fois au niveau local (parcelles) et des échelles régionales. Nous avons utilisé deux modèles, PaSim (Riedo et al. 1998, 2000; Calanca et al. 2007; Graux et al. 2012) et CERES-EGC (Jones and Kiriya, 1986, Gabrielle et al., 1998), pour évaluer les effets des pratiques agricoles dans les pâturages et les systèmes de culture, respectivement. Le modèle biogéochimique de pâturage PaSim et le modèle de culture CERES-EGC ont été spécifiquement utilisés pour évaluer les émissions de gaz à effet pour les agro-écosystèmes avec des scénarios climatiques et de pratiques culturelles différents à l'échelle de la France en complément du modèle Orchidee (Kriener et al., 2005, Chang et al. 2013). Un modèle capable de simuler les successions prairies cultures en tenant en compte des dynamiques des plantes et du sol a été développé à partir de ces deux modèles existants.

3.4.1. Description des modèles

3.4.1.1. CERES-EGC

CERES-EGC est un modèle mécaniste d'agroécosystème qui permet d'estimer la croissance de cultures annuelles (maïs, blé, orge, colza, sorgho, tournesol, pois, betterave sucrière et soja) ainsi que la dynamique des éléments nutritifs, de la température et de l'eau dans le sol. On peut ainsi simuler les flux de certains composés d'intérêt environnemental comme le nitrate (NO_3^-), l'ammoniac (NH_3), le protoxyde d'azote (N_2O), l'oxyde d'azote (NO) et le dioxyde de carbone (CO_2). CERES-EGC est basé sur le modèle CERES (Jones et Kiniry, 1986), et qui a été adapté aux conditions françaises (Gabrielle et al., 1998). CERES-EGC se compose de trois modules principaux: (i) un module physique pour les transferts de chaleur, d'eau et de solutés entre les couches du sol et l'atmosphère, et la transpiration des cultures; un module de décomposition de matière organique basés sur le modèle NCSOIL (Molina et al. 1996, Nicolardot et al., 1994) ou la matière organique du sol est composée de 3 pools pour les résidus de culture (glucides, cellulose et lignine) et 4 pools endogènes (biomasse zymogène, biomasse microbienne, actifs et passifs humus); (iii) un module de croissance des cultures basé sur la photosynthèse nette. L'absorption d'azote par la culture est calculée selon un schéma spécifique d'offre / demande dans lequel l'apport du sol dépend des concentrations de NO_3^- et de NH_4^+ et de la densité et de la longueur des racines (Gabrielle et al., 2005). CERES-EGC comprend le modèle NOE (Hénault et al., 2005) pour simuler les émissions de N_2O provenant de la dénitrification et de la nitrification. Les émissions de NO_x sont simulées comme décrit par Laville et al. (2005). Tous les processus sont calculés au pas de temps journalier et à l'échelle de la parcelle (Figure 3.3). Le modèle a été paramétré et validé dans différents contextes agronomiques et sur différents sites en France et en Europe. Les données d'entrée requises par le modèle sont de format ASCII et sont principalement de trois natures: données météorologiques, de sol et de gestion des cultures. Les données météorologiques sont constituées du rayonnement solaire global (MJ m^{-2}), de la température maximale et minimale ($^{\circ}\text{C}$), de la pluie (mm) et de la vitesse du vent (m s^{-1}). Concernant le sol, celles-ci sont divisées par couches et comprennent : saturation en eau, paramètres de la courbe de rétention, longueur maximale des racines, la teneur en carbone organique, la densité apparente, granulométrie du sol, le gravier, la teneur initiale en nitrate et ammonium et les paramètres spécifiques au N_2O . Le fichier de données sur la gestion des cultures contient l'information sur l'emplacement, la période de simulation et la gestion des cultures (espèces, cultivars, densité de semis, nombre et quantité d'irrigation et de fertilisation, gestion des résidus et rotations des cultures).

3.4.1.2. PaSIM

Le modèle PaSIM (Pasture Simulation Model) (Figure 3.4) est un modèle biogéochimique basé sur les processus, qui permet de simuler la production de matière sèche, les flux de CO_2 , les NEE (Net Ecosystem Exchange ou productivité nette des écosystèmes), GPP (Gross Primary Production ou production primaire brute), Reco (respiration des écosystèmes), la dynamique des pools de carbone organiques des sols (SOC), les émissions de N_2O des sols provenant de la nitrification et de la dénitrification dans les prairies et les émissions de méthane (CH_4) provenant du pâturage du bétail et de l'eau dans les pâturages (Riedo et al 1998, Calanca et al 2007, Vuichard et al, 2007a, Graux et al, 2012b, Nemoto, 2013). Le modèle peut fonctionner soit à des pas de temps journalier soit à des pas de temps plus fins et pour des échelles spatiales allant de la parcelle aux régions. PaSIM est composé de plusieurs sous-modules : pour les plantes, les animaux, le microclimat, la biologie des sols et la physique des sols. Les modèles de carbone et d'azote de PaSIM sont basés sur ceux du modèle CENTURY (Parton et al., 1988). Le sous-modèle de carbone est construit avec cinq pools de SOC: structurel, métabolique, actif, lent et passif. Les résidus végétaux sont divisés en pools structurels et métaboliques en fonction de leur teneur en lignine. Ces deux pools interagissent avec les pools actifs et lents qui ont une connexion entre eux et au pool de carbone passif, ou stable. Les données d'entrée requises sont au format ASCII et concernent les informations météorologiques, les sols, les cultures et les informations de gestion. Les données météorologiques sont les suivantes: température minimale et maximale ($^{\circ}\text{C}$), pluie (mm), rayonnement solaire global (J cm^{-2}), pression de vapeur (kPa), vitesse du vent (m s^{-1}), et les concentrations en CO_2 et NH_3 de l'atmosphère. Les données de gestion comprennent des renseignements sur la coupe, la fertilisation, le nombre et les caractéristiques des animaux de pâturage. Le sol contient les caractéristiques spécifiques du site (localisation et exposition, nombre et profondeur des couches de sols, hauteur maximale du couvert, fraction de trèfle et matière sèche maximale des racines) et les caractéristiques physico-chimiques des couches du sol (texture, densité apparente, etc., teneur en eau, paramètres hydrologiques et réaction du sol. La gestion est paramétrée également par des valeurs initiales sur la matière sèche (matière sèche de la tige et de la racine, indice de la surface foliaire, teneur en carbone et azote des organes végétaux), sur le sol (teneur en matière organique, teneur en eau

du sol et valeurs des formes azotées, Température du sol et dépôt d'azote), sur les animaux (typologie et caractéristiques, date de la période de pâturage, taux de consommation, production de lait, gestion des fourrages et proportion de différents animaux par surface).

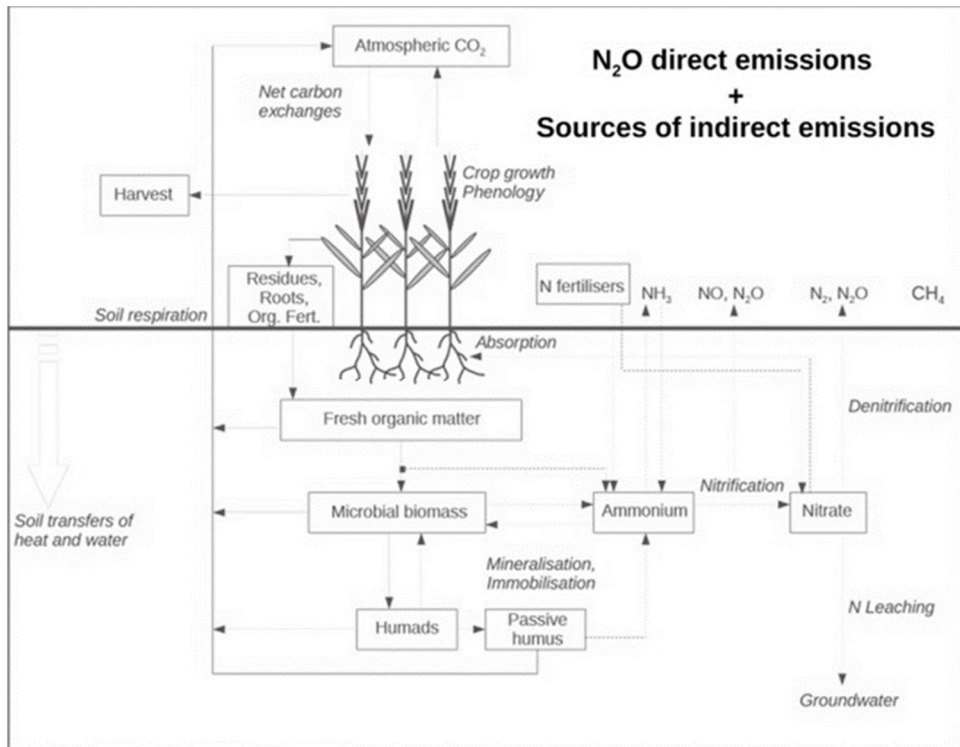


Figure 3.3 : Schéma conceptuel du modèle CERES-EGC

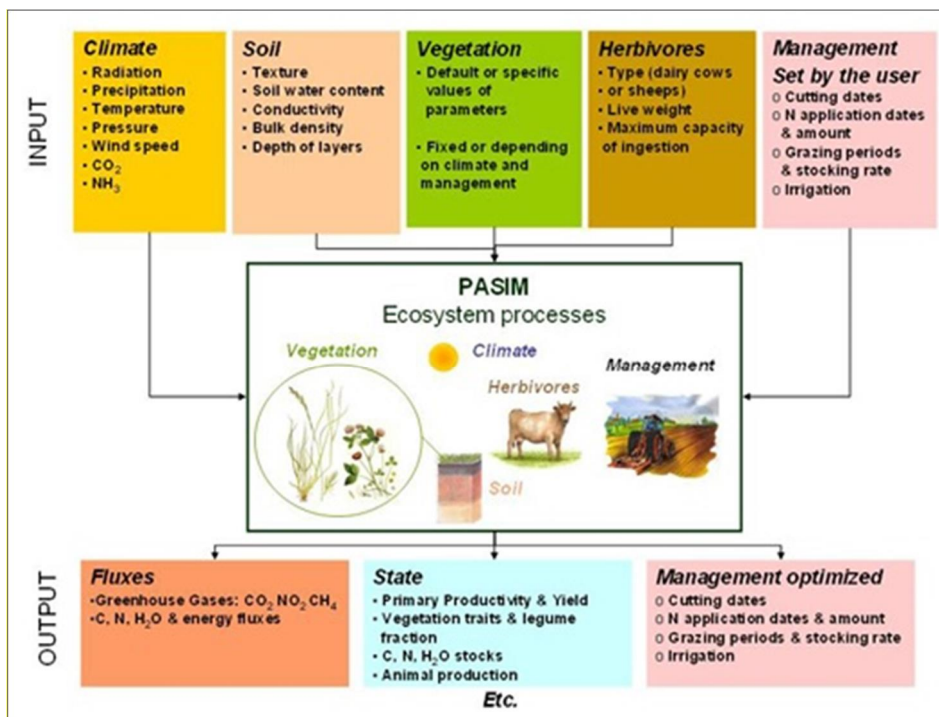


Figure 3.4 : Schéma conceptuel du modèle PaSIM

3.4.1.3. ORCHIDEE

Le modèle ORCHIDEE est un modèle global rendant compte des flux d'énergie, d'eau et de carbone à l'interface surface continentale / atmosphère. C'est un modèle qui a pour vocation d'être couplé à un modèle

de circulation générale de l'atmosphère. Cependant, il peut être également utilisé seul, forcé par des réanalyses climatiques ou des observations de terrain, afin de mener des études dites d'impact, où l'on étudie l'impact du changement climatique sur les flux et bilans de eau et de carbone, de l'échelle du site à l'échelle globale. La version historique de ORCHIDEE (Krinner et al., 2005) n'intègre pas de représentation des pratiques agricoles (mise en culture, pâturage, fertilisation, récolte, ...) et de leurs impacts sur les écosystèmes. Afin de combler ce manque, le modèle ORCHIDEE a été couplé au cours de la dernière décennie au modèle STICS pour mieux représenter les cultures (Gervois et al., 2004; Smith et al., 2010a, 2010b), puis plus récemment il a été couplé au modèle PaSim pour une meilleure caractérisation des prairies (Chang et al., 2013). Ce dernier développement a donné naissance au modèle ORCHIDEE-GM (pour Grassland Management, voir ci-dessous).

3.4.2. Spatialisation des modèles

Des données spatialisées de météorologie, des caractéristiques des sols et des modes de gestion agricole ont été formatées à partir de données existantes pour une grille de résolution régulière de 0,25 ° x 0,25 ° de latitude-longitude (~ 770 km²).

Les **données météorologiques** nécessaires pour définir les variables d'entrée des deux modèles sont fournies par le dernier GIEC pour son cinquième rapport d'évaluation (AR5) en 2014. Les scénarios de changement climatique considérés ici sont dérivés du modèle climatique HadGEM2-ES qui a fourni un ensemble de données historiques, de 1951 à 2004 et de deux scénarios de changement, de 2005 à 2099. Les scénarios de changement climatique sont retenus sont ceux entraînant une perturbation anthropique du système climatique de +4,5 et +8,5 W m⁻² (RCP4.5 et RCP8.5 respectivement). Les données sont fournies pour une grille de latitude-longitude régulière de 0,5 ° x 0,5 ° (~ 3080 km²) et les moyennes de certaines variables de ces deux scénarios sont représentés dans la Figure 3.5 ci-dessous.

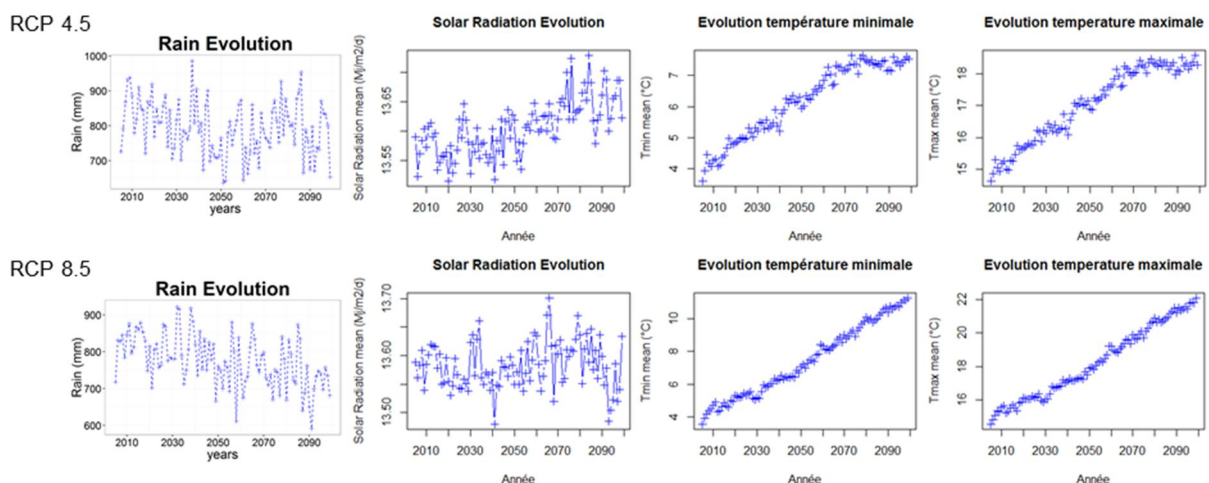


Figure 3.5 : Scénarios de changement climatique en Europe relatif au dernier rapport de l'IPCC, RCP 4.5 et RCP 8.5. Les graphiques montrent les moyennes annuelles de pluviométrie cumulées, moyennes de rayonnement solaire, moyennes des températures minimales et maximales respectivement.

Concernant les **données sur les sols**, les données représentatives par grilles ont été fournies par la Base de données européenne sur les sols (ESDB) pour le modèle CERES-EGC (mise à jour jusqu'en 2015) et de la base de données mondiale harmonisée sur les sols (HWSD, mise à jour en 2012) pour PaSim. L'ESDB fournit des données sur une résolution de 1 km² pour l'ensemble de la région européenne. Les données sont structurées en deux profils: un profil de sous-sol et un profil de sol qui incluent les caractéristiques fondamentales du sol: profondeur maximale du sol, texture (sable, limon, argile, gravier), teneur en carbone, densité apparente et pH du sol. Toutes ces caractéristiques ont été discrétisées en 5 couches en maintenant l'information sur la couche supérieure du sol (30 premiers cm) et les informations sur le sous-sol à la profondeur maximale du sol. Nous avons ensuite sélectionné le sol le plus représenté, dans la zone carrée de la grille de latitude-longitude de 0,25 ° x 0,25 ° qui représente la grille de référence utilisée pour agréger les données (voir la Figure 3.6). Les données, une fois conformes à la grille spatiale, ont été utilisées pour estimer des caractéristiques particulières du sol (teneur en eau volumétrique à saturation, capacité au champ et point de flétrissement permanent, albédo, paramètres de la courbe de rétention hydraulique, etc.)

Le potentiel d'entrée d'air et la conductivité hydraulique saturée. Le HWSO fournissait déjà des caractéristiques de sol adaptées et comparables, tant pour l'échelle que pour les caractéristiques concernant le modèle PaSIM.

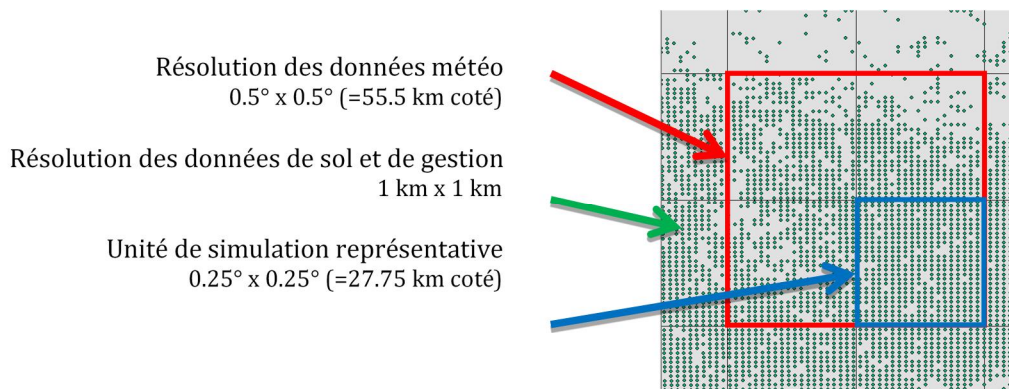


Figure 3.6 Représentation de l'aggrégation spatiale des données. Données météorologiques en rouge, culture et sol et vert et unité de simulation en bleu (0.25° x 0.25°).

Tableau 3.3: Cultures simulées par CERES-EGC: critères utilisés pour définir les dates de semis, densités et variétés. (doy = day of the year)

Description	Période min (doy)	Période max (doy)	Seuil de température minimale >C	Seuil de température maximale >C	Nombre de jour sans pluie (n)	Date de semis	Latitude > 45	Latitude < 45	Densité	Profondeur
Blé de printemps	20	70	5	20	3	45	ANZA	ANZA	300	2.5
Blé d'hiver	260	330	5	20	3	295	ROCHEBG	ROCHE	300	2.5
Blé Durum	260	330	5	20	3	295	CONDO	WARD	300	2.5
Seigle	260	330	5	20	3	295	ROCHEBG	ROCHE	225	2.5
Orge de printemps	20	70	5	20	3	45	Tellus	Generic (2)	300	2.5
Orge d'hiver	260	330	5	20	3	295	ROCHEBG	TestBG	300	2.5
Céréales de printemps	20	70	5	20	3	45	ANZA	ANZA	225	2.5
Maïs grains	65	130	10	20	3	105	SimonL	DEA	10	4
Triticale	260	330	5	20	3	295	ROCHEBG	ROCHE	350	2.5
Riz	90	130	12	20	3	110	RICE	RICE	300	2.5
Colza	250	310	5	20	3	280	MAGELLAN	MAGELLAN	55	4
Tournesol	65	130	10	20	3	95	FLORASOL	FLORASOL	5	4
Soja	85	150	10	20	3	115	SOYA	SOYA	30	3
Pulses	65	130	5	20	3	105	PEA	PEA	60	4
Pommes de terres	65	130	10	20	3	105	EMMA300d	EMMA150d	5	5
Bettraves	65	130	5	20	3	105	EMMA300d	EMMA150d	10	3
Chanvres et lins	40	120	10	20	3	105	ROCHEBG	ROCHE	500	2
Maïs fourrages	65	130	5	20	3	105	SimonL	SimonL	12	4

Les données de gestion ont été fournies à partir de deux bases de données différentes, d'Eurostat et du modèle CAPRI en ce qui concerne le modèle CERES-EGC. Les données d'Eurostat se composent de la succession des récoltes, de la quantité et du type de fertilisation, sur une période de 30 ans, de 1978 à 2005. Ces données ont été présentées avec une résolution de 1 km² pour l'ensemble de la région européenne et ont été agrandies à la grille de référence de 0,25 ° x 0,25 ° latitude-longitude. Cette opération a été effectuée en sélectionnant les deux rotations de cultures les plus représentatives (et leur fertilisation relative) en termes de fréquence par unité de quadrillage. Le choix de sélectionner deux rotations sur 30 ans

a été fait afin d'évaluer la modification des bilans nationaux de carbone et de N₂O en fonction de la succession des récoltes. Cette succession sur 30 ans a été reproduite de 1951 à 2099 en respectant les années où les données ont été fournies. Les dates de semis et de fertilisation des cultures ont nécessité certaines hypothèses. Le semis a été ainsi effectué dans des fenêtres temporelles délimitées à une date maximale et minimale choisie sur la base de la date de semis agronomique habituelle pour chaque culture. Le jour de semis est fixé au moins quand on a trois jours successives d'absence de pluviométrie et avec des températures minimales quotidiennes supérieures à la température de croissance minimale spécifique de la culture. La densité et la profondeur de semis ont été choisies par défaut pour chaque culture. Une autre règle concerne l'utilisation de différentes variétés selon la latitude supérieure ou égale à 45 ° (Tableau 3.3). Les dates de fertilisation ont été choisies en fonction de la charge d'azote et du fractionnement typique des cultures. Pour la France, tous les fumiers ont été appliqués cinq jours avant le semis et trois stratégies de fertilisation ont été envisagées pour l'azote minéral: i) pour la charge de fumier supérieure ou égale à 50 Kg N ha⁻¹, tout l'azote minéral a été appliqué une fois pendant la saison de culture en fonction du type de culture; ii) pour le fumier et les charges minérales respectivement inférieures et supérieures à 50 kg N ha⁻¹, l'azote minéral a été fractionné au 1/3 au moment du semis et 2/3 au cours de la croissance des cultures; iii) pour le fumier et les charges minérales inférieures à 50 kg N ha⁻¹, l'azote minéral a été appliqué au moment du semis. Les résidus de culture ont été gérés le lendemain de la récolte, par incorporation profonde dans le sol. Les données sur les prairies, les dates de coupe, la quantité et le type de fertilisation, la gestion des animaux et la densité des peuplements, ont été fournies par le système de modélisation CAPRI (Leip et al. 2011). Les données fournies couvraient un intervalle de 30 ans et ont été reproduites pour la période 1951-2099.

3.4.3.Scénarios des simulations spatiales

La simulation spatiale a été évaluée sur la base des deux scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5 et en utilisant ou pas l'irrigation des cultures. Différents scénarios climatiques ont permis de mettre en évidence les différences sur les rendements et les productions, ainsi que les stocks de carbone et les émissions de N₂O au cours de ce siècle. Le scénario avec des changements dans l'irrigation des cultures a été choisi afin d'évaluer l'effet sur les émissions potentielles de N₂O. Un autre scénario a été mis en place en prenant en compte les deux rotations de cultures sélectionnées pour chaque unité de simulation.

3.4.4.Analyses de sensibilité

L'analyse de sensibilité a été effectuée en utilisant des données météorologiques extrêmes selon deux critères, en choisissant (i) une année sèche et une année humide, et (ii) une année chaude et une année froide. La sensibilité a été exprimée comme variation du pourcentage des deux critères en considérant les résultats sensibles comme le carbone organique du sol, la teneur en azote ammoniacal du sol et en nitrate, le lessivage du nitrate, la teneur en eau du sol dans la première couche de sol, l'absorption d'azote, la minéralisation nette, les émissions de N₂O et le rendement. Les sensibilités > 10%, entre 5 et 10%, et <5% ont été considérées comme élevées, modérées et faibles. Une analyse de corrélation entre les scénarios décrits plus haut, en considérant ces sorties a également été réalisée.

4. Bilan / Principaux résultats obtenus

4.1. Tâche 1 : Coordination

La tâche consistait à coordonner les actions proposées par les différents acteurs. Les activités associées à cette tâche ont été

- (1) d'organiser des réunions et de faciliter le dialogue et le travail en commun entre modélisateurs et expérimentateurs dans le but de proposer une approche plus mécaniste décrivant certains processus dans les modèles.
- (2) d'organiser un workshop qui permettra aux différents acteurs (modélisateurs et expérimentateurs) de communiquer sur les avancées récentes dans les 2 domaines afin de mieux intégrer les processus microbiens dans les modèles et d'identifier de nouvelles questions à traiter.
- (3) la communication des résultats aux comités des parties prenantes (ministère d'agriculture, Arvalis, Institut d'élevage, IDELE).
- (4) proposer une synthèse des travaux qui sera communiquée vers des décideurs et le grand public.

Chaque année au moins une réunion a eu lieu pour discuter de l'incorporation de certains processus dans les modèles. Nous avons discuté tous ensemble plusieurs fois de nos résultats, qui ont été mis en commun entre les différents acteurs du projet. Le workshop entre modélisateurs et expérimentateurs a eu lieu le 13.1.2014 à Lyon. Nous avons eu des exposés concernant les avancées dans les deux domaines, ce qui a permis d'identifier des nouvelles questions notamment en ce qui concerne la physique du sol. D'autres réunions plus orientées vers la discussion des résultats et leurs implications pour les modèles ont eu lieu entre modélisateurs et expérimentateurs (23.7.2014 à Paris, 14.10.2015 visioconférence; 27./28.1.2016 à Paris; 24.2.2016 à Lyon; 19.10.2016 visioconférence). Un livrable important de cette tâche a été l'organisation d'une campagne de mesures des émissions de N₂O sur le site de Lusignan. Cette campagne de mesures a été accompagnée de deux campagnes d'échantillonnage du sol, permettant ainsi de coupler au plus près les analyses microbiennes, celle, qui caractérisent les MOS et les émissions.

Nous avons organisé une réunion de parties prenantes, qui a eu lieu le 15.11.16 à l'IdEES à Paris pour communiquer nos résultats. Il y avait une dizaine des acteurs des différents organismes (ministères en charge de l'agriculture et de l'écologie, et instituts techniques agricoles), qui ont échangé avec nous. Les discussions ont été riches et les parties prenantes intéressés aux résultats du projet.

4.2. Tâche 2 : Compréhension de l'effet de différents modes de pratiques agricoles sur le fonctionnement biogéochimique et biologique des sols et sur les émissions associées de GES

Les activités dans cette tâche ont été

- de quantifier la dynamique des stocks et la qualité des MOS en réponse aux modes de gestion sur les sites étudiés de l'OPRE ACBB,
- de déterminer la répartition du carbone et de l'azote dans les différentes fractions du sol et d'évaluer leur susceptibilité à la dégradation microbienne,
- de caractériser l'effet des différents traitements sur l'activité, l'abondance et la composition des communautés microbiennes impliquées dans les émissions de N₂O, en fonction de ces mêmes fractions et pour le sol dans son ensemble.

Ceci devrait permettre

- de proposer de nouvelles représentations et de nouveaux paramètres pour caractériser la matière organique et l'activité microbienne des sols pour les intégrer dans les modèles (lien Tâches 2 & 3).

4.2.1. Stockage du C des sols: arrière effet de gestion de prairies sur la quantité des MOS des prairies

Les stocks du C organique (OC) varient selon les zones géographiques, entre 5 et 25 kgC m⁻² dans les premières 10 cm du sol pour les prairies permanentes en moyenne montagne et entre 1 et 2 kg OC m⁻² dans les premiers 10 cms pour les prairies temporaires en plaine après trois années de culture (Figure 4.1). Les valeurs sont similaires pour les prairies permanentes pâturées intensivement et extensivement en ovine et bovine, alors, que les prairies avec un gradient de fauche-fertilisation (F_{nul}, F_{pk} et F_{npk}) ou abandon montrent une accumulation du OC dans les sols après 7 années de mise en exploitation en fauche. Pour les rotations, les prairies temporaires montrent des différences en ce qui concerne l'arrière effet des modes de gestion sur le stockage du OC. Un sol cultivé (Cr) mis en prairie depuis 8 ans (G) a considérablement augmenté les stocks du OC. Trois années après mise en culture, le stockage du OC des prairies temporaires non fertilisé (TG6N-) est significativement plus faible par rapport à tous les autres traitements. La durée de la prairie temporaire semble avoir peu d'arrière effet sur le stockage du OC. En général, les prairies temporaires fertilisées (TG3N+ et TG6N+) augmentent le stockage du OC.

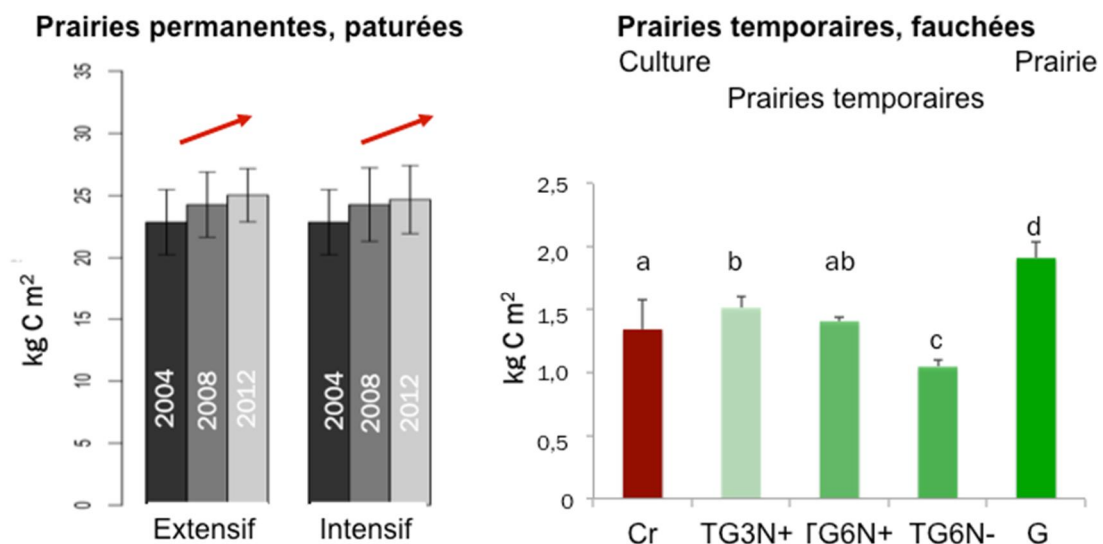


Figure 4.1: Stockage du carbone organique dans les 10 premiers centimètres des sols de prairies permanentes et temporaires sous différents mode de gestion (sites de Laqueuille-theix et site de Lusignan). Les sols sous prairies temporaires ont été échantillonnés en 2014 après trois années de culture. Les traitements correspondent à Cr=9 années de culture permanente, TG3N+=trois années de prairies temporaires fertilisées, TG6N+= six années de prairies temporaires fertilisées, TG6N-= six années de prairies temporaires non-fertilisées, G=9 ans de prairie permanente.

Pour aborder la question de l'évolution des stocks de carbone organique par rapport aux valeurs initiales, nous avons effectué une analyse spatiale des stocks de OC dans l'horizon labouré (0-30 cm) en 2005 et 2014 sur tout le site de Lusignan. La différence des stocks calculée avec ces données est présentée dans la Figure 4.2. Les résultats montrent, que les différences des stocks varient spatialement entre -5 et +12 t de OC ha⁻¹. Cette variation est plus forte pour les prairies pâturées par rapport aux prairies fauchées. Egalement sont présentées les valeurs moyennes pour les différents traitements ainsi que la significativité de cette différence. Les résultats montrent que tous les traitements ont augmenté leurs stocks de carbone. Les différences entre traitements sont significatives uniquement pour les petites parcelles, où la maille d'échantillonnage a été plus importante par rapport aux grands parcelles. Pour les petites parcelles l'augmentation des stocks du OC est la plus faible dans les sols sous culture permanente et la plus forte dans les sols sous prairie permanente. Les stocks des sols sous prairie temporaire sont entre ces deux extrêmes. La prairie de 3 ans montre des stocks significativement plus faibles que la prairie permanente et ne se distingue pas du sol sous culture. Les prairies temporaires de 6 ans ne montrent aucune différence, ce qui est différent des stocks calculés pour les 10 premiers centimètres (Figure 4.1). En conséquence, une augmentation des stocks de carbone induits par les prairies temporaires après un cycle n'est pas détectable si on intègre une plus grande profondeur. Toutefois, l'observation d'une production de biomasse très faible pour les prairies non-fertilisées nous mène à conclure, que la fertilisation azotée est nécessaire pour augmenter les stocks de C dans les sols sous prairies fauchées.

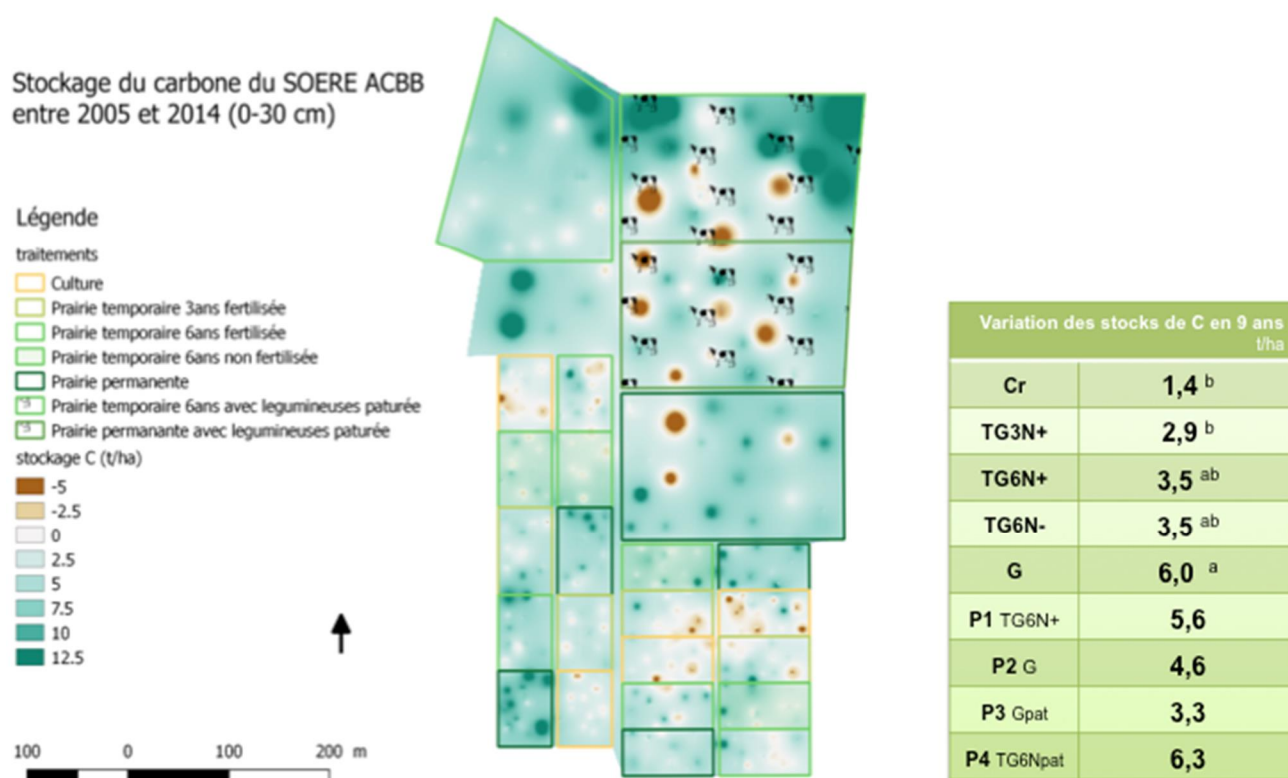


Figure 4.2: Distribution de la différence des stocks de carbone (0-30 cm) sur le site de Lusignan déterminé en 2005 et 2014 et variation moyenne des stocks en 9 ans.

Bilan

L'installation de prairies augmente le stockage du carbone organique (OC) dans les sols et ceci indépendamment de leur charge animale. Des arrière effets de la durée et le mode de fertilisation des prairies sur le stockage du OC ont été observés. Une prairie de 3 ans semble impacter le stockage du OC uniquement dans la première couche du sol, alors que l'effet d'une prairie temporaire de 6 ans se répartie sur tout l'horizon labouré. L'arrière effet d'une fertilisation en azote est visible dans la couche superficielle du sol (0-10 cms).

4.2.2. Couplage entre Matière Organique des Sols, processus microbiens et flux de GES (site Lusignan)

4.2.2.1. Arrières effets de la gestion sur la signature élémentaire (C, N, P) des sols sous prairie temporaire

Les concentrations en carbone organique dans les 10 premiers centimètres du sol sont comprises entre 9,14 et 16,83 mg g⁻¹, et celle du N entre 1,01 et 1,65 mg g⁻¹ (Tableau 4.1). Les plus faibles concentrations ont été observées pour le sol sous prairie temporaire de 6 ans non fertilisée (TG6N-) et les plus élevés pour le sol sous prairie permanente de 8 ans (G). C et N suivent le même profil avec en ordre décroissant G > TG3N+ > TG6N+ > Cr > TG6N-. De ce fait les ratios C/N ne sont pas significativement différents (Tableau 4). Les concentrations en P du sol varient entre 827,3 et 1135,8 µg g⁻¹ respectivement pour TG6N- et G (Tableau 4) et évoluent pas de la même façon que le C et le N du sol. Ainsi, le ratio C/P varie en fonction des traitements avec 18,4 pour G, ce qui est significativement plus élevé par rapport aux autres traitements, qui varient entre 11,1 et 13,5 (Tableau 4.1). Alors que les concentrations en OP (phosphore organique) comprises entre 354,9 et 533,3 µg g⁻¹ ne varient pas significativement, les concentrations du sol en IP (phosphore inorganique) variant entre 392,8 et 605,7 µg g⁻¹. Ils révèlent que G possède la plus faible concentration en IP et la plus élevée en OP. Ceci pourrait être dû à un plus fort apport de P par les litières racinaires, plus abondantes et une décomposition réduite sous prairie par rapport aux sols labourés.

Les concentrations du sol en azote inorganique (IN) comprises entre 4,3 et 11,6 µg g⁻¹ ne montrent pas de différence entre les prairies temporaires (TG) et la culture. Par contre, la concentration en IN est fortement supérieure dans les sols sous prairie permanente par rapport aux autres traitements (Tableau 4.1). Ceci pourrait s'expliquer par une fertilisation azotée plus importante dans les sols sous prairie comparée à ceux sous culture. Les concentrations en NH₄⁺ situées entre 0,7 et 4,9 µg g⁻¹ ne sont pas significativement différentes malgré une grande variabilité pour G. Celles en NO₃⁻ comprises entre 3,5 et 6,6 µg g⁻¹ décroissent suivant l'ordre G > TG6N+ > TG3N+ > TG6N- > Cr (Tableau 4). Ces données montrent, que la signature élémentaire se distingue dans les sols sous prairie par rapport aux sols sous culture (traitement G versus les autres traitements). De plus, il y a des arrières effets sur la signature élémentaire des sols, qui persistent après un cycle de cultures, notamment en ce qui concerne les teneurs en C, N, le rapport C/P et la teneur en NO₃⁻.

Tableau 4.1 : Caractéristiques du sol pour la culture permanente (Cr), la prairie temporaire fertilisée de 3 ans (TG3N+), de 6 ans (TG6N+) et de la prairie temporaire non-fertilisée de 6 ans (TG6N-), ainsi que de la prairie permanente de 9 ans (G). Les données présentent la moyenne de 4 réplicas.

	C mg g ⁻¹	N mg g ⁻¹	C/N	P µg g ⁻¹	C/P	IP µg g ⁻¹	OP µg g ⁻¹	IN µg g ⁻¹	NO ₃ ⁻ µg g ⁻¹	NH ₄ ⁺ µg g ⁻¹
Cr	11.33 ^c	1.22 ^c	9.3 ^a	979.9 ^{ab}	11.6 ^{bc}	539.7 ^{ab}	440.2 ^a	4.3 ^b	3.5 ^b	0.8 ^a
TG3N+	12.97 ^b	1.39 ^b	9.4 ^a	1135.8 ^a	11.7 ^{bc}	605.7 ^a	530.1 ^a	5.8 ^b	5.1 ^{ab}	0.7 ^a
TG6N+	12.25 ^{bc}	1.27 ^c	9.8 ^a	915.6 ^{ab}	13.5 ^b	430.4 ^{ab}	485.3 ^a	7.0 ^b	6.0 ^a	1.0 ^a
TG6N-	9.14 ^d	1.01 ^d	9.0 ^a	827.3 ^b	11.1 ^c	472.3 ^{ab}	354.9 ^a	5.7 ^b	4.9 ^{ab}	0.8 ^a
G	16.83 ^a	1.65 ^a	10.2 ^a	926.1 ^{ab}	18.4 ^a	392.8 ^b	533.3 ^a	11.6 ^a	6.6 ^a	4.9 ^a

^{abcd} Différents lettres indiquent des différences significatives testées par Anova et Tukey HSD post hoc test

4.2.2.2. Arrières effets de la gestion sur la signature biogéochimique des matières organiques dans les sols sous prairie temporaire

- Polysaccharides

Les concentrations en polysaccharides du sol comprises entre 3,94 and 5,98 mg g⁻¹ décroissent dans l'ordre suivant G > TG6N+ > TG3N+ > Cr > TG6N- (données non montrées). Cela révèle un arrière effet de la fertilisation et de la durée des prairies temporaires. Les concentrations en sucre du sol sous prairie permanente de 8 ans (G) sont significativement plus élevées que ceux de tous les autres traitements. Mais normalisé au C du sol, la réponse des traitements change. La teneur en sucre comprise entre 34.8 et 43.1% du C est similaire dans les sols de tous les traitements sauf pour les sols sous prairies temporaires non fertilisées, qui a une valeur plus élevée. Ceci pourrait s'expliquer avec l'état de dégradation élevé des MOS

dans ces sols avec une plus forte contribution des sucres microbiennes, indiqué par un faible rapport xylose/mannose et un rapport élevé de C6/C5 (Figure 4.3).

Le rapport xylose/mannose donne une idée de l'état de dégradation des sucres. Il est le plus élevé dans les sols sous prairie permanente (G) et plus faible pour les sols sous culture et prairies temporaires non-fertilisées, alors, que les prairies temporaires fertilisées montrent des valeurs intermédiaires.

Le rapport C6/C5 donne une idée sur l'origine des sucres dans les sols sous différentes gestions. La variation du rapport C6/C5 révèle une signature spécifique des traitements, avec les sols sous prairie permanente de 8 ans (G) présentant les valeurs les plus faibles (C6/C5 : 1,51) et les sols sous culture depuis 8 ans (C) le plus élevé (C6/C5 : 2,92). Ces résultats indiquent l'augmentation des sucres microbiens dans les sols sous culture en accord avec la dégradation rapide des matières organiques végétales suite au travail du sol. Les sols sous des prairies temporaires fertilisées ont des rapports intermédiaires entre G et C et les sols sous prairie temporaire non fertilisée montrent un rapport similaire aux sols sous culture (Figure 4.3). Ces résultats indiquent un arrière effet de la gestion des prairies temporaires sur la signature biogéochimique des sucres en ce qui concerne la fertilisation ainsi que la durée. L'absence de fertilisation favorise la dégradation des MOS et donc une plus forte contribution des sucres microbiens, alors, que l'augmentation de la durée des prairies temporaires favorise la contribution des sucres d'origine végétale.

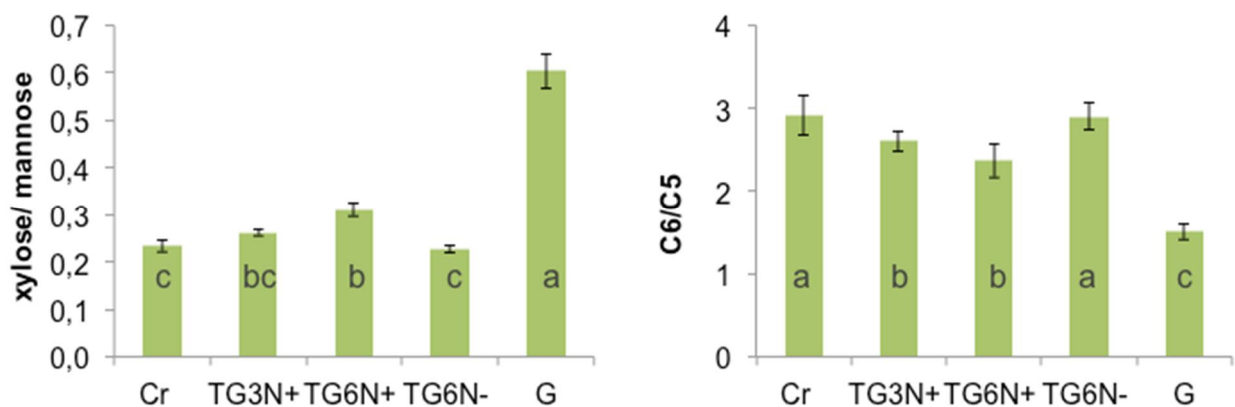


Figure 4.3: Rapport xylose/mannose, ainsi que le rapport C6/C5 indiquant l'état de dégradation et l'origine des sucres dans les sols de prairie sous différent gestion

- Lignines

Les concentrations en lignine du sol sont comprises entre 0,20 et 0,35 mg g⁻¹ et ne différencient pas pour les deux extrêmes G et Cr. Cependant, tous les traitements TG montrent des valeurs significativement plus faibles que G avec TG6N- montrant la plus faible (Tableau 4.2). Normalisée avec la concentration en C du sol, la teneur en lignine est comprise entre 1,9 et 2,4% du C et ne montre pas de différence entre les traitements (Tableau 4.2). Le ratio Ac/Al de la vanilline et du syringyl ne révèle pas de signature de la lignine différente pour les sols de G, Cr et TG sauf une différence non attendue du ratio (Ac/Al)_S pour TG3N+ et TG6N+ (Tableau 5). Le ratio Co/V permet de différencier l'état de dégradation de la lignine entre G et Cr en montrant une réponse intermédiaire des TG. TG3N+ montre encore une réponse inattendue avec des Co/V et S/V élevés. Cependant en général, il n'y a pas de tendance d'arrière effet des ratios S/V des sols (Tableau 4.2).

Tableau 4.2 : Signature des lignines des sols sous culture permanente (Cr), prairie temporaire fertilisée de 3 ans (TG3N+), de 6 ans (TG6N+) et de la prairie temporaire non-fertilisée de 6 ans (TG6N-), ainsi que de la prairie permanente de 9 ans (G). Les données présentent la moyenne de 4 réplicats.

	Part du carbone du sol (% C)	Concentration dans le sol (mg g ⁻¹)	(Ac/Al)V	(Ac/Al)S	Co/V	S/V
Cr	2.4 ^a	0.27 ^{ab}	0.45 ^a	0.54 ^{ab}	0.46 ^b	1.40 ^b
TG3N+	1.9 ^a	0.25 ^b	0.39 ^a	0.51 ^b	0.66 ^a	1.60 ^a
TG6N+	2.0 ^a	0.25 ^b	0.48 ^a	0.56 ^a	0.52 ^{ab}	1.40 ^b
TG6N-	2.2 ^a	0.20 ^b	0.46 ^a	0.52 ^{ab}	0.50 ^{ab}	1.43 ^{ab}
G	2.1 ^a	0.35 ^a	0.47 ^a	0.52 ^{ab}	0.66 ^a	1.29 ^b

^{abc} Différentes lettres indiquent des différences significatives selon une Anova à deux facteurs suivie d'un test HSD de Tukey.

4.2.2.3. Arrières effets de la gestion sur la distribution des différents compartiments physiques de matières organiques dans les sols sous prairies temporaires

A Lusignan, la majorité du C du sol est contenue dans la fraction limon et argile (S+C) avec 65 à 78% du carbone organique du sol (SOC) (Figure 4.4). La seconde plus grande fraction est la matière organique particulaire (POM) contenant 10 à 20 % du SOC (Figure 4.4). Les autres fractions contribuent faiblement au stockage de C et ne montrent pas de différences entre traitements. La distribution du C dans les fractions du sol est significativement différente uniquement pour le traitement G, qui montre une proportion significativement plus élevée dans les POM avec 19,9% du SOC, compensée par une proportion significativement plus faible de (S+C)-rSOC avec 65,4% du SOC. Cependant les sols de TG et de Cr ne montrent pas de différence significative de la distribution du C dans les fractions. Le carbone des fractions DOC et S+A ne montre pas de différence significative selon les traitements.

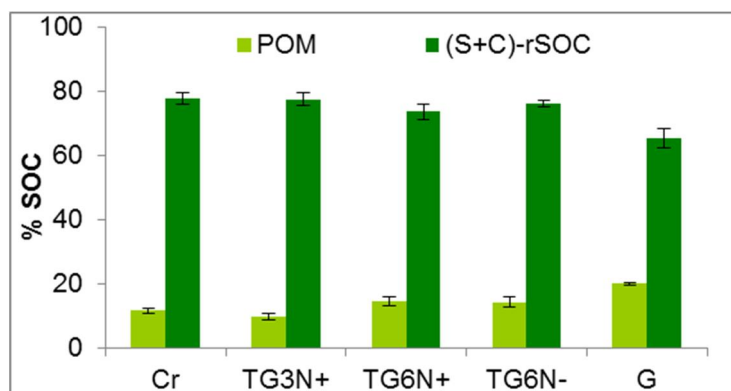


Figure 4.4 : Distribution du C dans les fractions matières organiques particulaires (POM) et limon et argiles ((S+C)-rSOC) dans les sols sous culture permanente (Cr), prairie temporaire fertilisée de 3 ans (TG3N+), de 6 ans (TG6N+) et de la prairie temporaire non-fertilisée de 6 ans (TG6N-), ainsi que de la prairie permanente de 9 ans (G). Les données présentent la moyenne de 4 répétitions.

Il n'y a pas seulement la répartition du C dans ces deux fractions qui change avec les traitements mais aussi le ratio C/N de la matière organique (Tableau 4.3). Le C/N des POM compris entre 17,8 et 22,2 est le plus élevé pour Cr et TG6N-, et le plus faible pour TG3N+ et G qui ne se différencie de aucun traitements (Tableau 6). Pour la fraction S+A, le ratio C/N est plus faible et varie de 11,1 à 15,7 avec cette fois l'inverse : Cr le plus faible et TG3N+ le plus élevé (Tableau 4.3). La fraction S+C révèle les ratios C/N les plus faibles avec des valeurs comprises entre 8,9 pour TG6N- comme Cr et 9,4 pour G (Tableau 4.3). La fraction rSOC, qui est la plus récalcitrante montre des C/N compris entre 9,1 et 13,9 et on observe deux groupes avec le plus élevé pour TG3N+ et G, et le plus faible avec TG6N-, TG6N+ et Cr (Tableau 4.3). L'effet prairie se traduit donc par une forte contribution du matériel végétale jeune, qui semble contribuer à toutes les

fractions. Cependant, il semble également que cette signature redevient rapidement similaire à celle des cultures après labour.

Tableau 4.3 : C/N ratio des fractions physiques (POM=Particulate Organic Matter; S+A=Sand+Aggregates; S+C= Silt+Clay; rSOC=residual organic carbon) pour la culture permanente (Cr), la prairie temporaire fertilisée de 3 ans (TG3N+), de 6 ans (TG6N+), de la prairie non-fertilisée de 6 ans (TG6N-) et de la prairie permanente de 9 ans (G). Les données présentent des moyennes de quatre répétitions.

	POM C/N	S+A C/N	S+C C/N	rSOC C/N
Cr	22.2 ^a	11.1 ^b	8.9 ^{bc}	10.7 ^b
TG3N+	17.8 ^b	15.7 ^a	9.2 ^{ab}	13.9 ^a
TG6N+	20.5 ^{ab}	12.5 ^{ab}	9.0 ^{bc}	10.1 ^b
TG6N-	21.7 ^a	11.9 ^{ab}	8.9 ^c	9.1 ^b
G	18.8 ^{ab}	13.2 ^{ab}	9.4 ^a	13.2 ^a

^{abc} Les différentes lettres indiquent des différences significatives entre traitements selon une Anova à deux facteurs suivie d'un test HSD de Tukey.

La distribution des hydrates de carbones parmi les différentes fractions physiques du sol est présentée dans la Tableau 4.4. La majorité des sucres sont contenus dans S+C avec 54 à 69 % des sucres totaux du sol. La seconde principale fraction est la fraction POM contenant 10 à 23% des sucres du sol, suivi par le DOC qui représente entre 6 et 25 % des sucres du sol. Les plus faibles contributions sont observées pour la fraction S+A avec 5 à 10% des sucres du sol et rSOC qui contribue à moins de 0,4% des sucres du sol. Dans rSOC, le galactose est le seul monomère de sucre détecté. Seule la fraction POM révèle des variations significatives entre traitements. Elle montre les teneurs les plus élevées dans le sol de G. Cependant la composition des monomères de sucre diffère entre les traitements.

Tableau 4.4 : Signature des sucres dans les fractions physiques des sols sous culture permanente (Cr), prairie temporaire fertilisée de 3 ans (TG3N+), de 6 ans (TG6N+), prairie temporaire non-fertilisée de 6 ans (TG6N-) et prairie permanente de 9 ans (G). Les données représentent les moyennes de 4 répétitions.

	POM			S+A			S+C		
	C6/C5	desox yC6 /C5	xylose /mann ose	C6/C5	desox yC6/C 5	xylose /mann ose	C6/C5	desox yC6 /C5	xylose /mann ose
Cr	0,40 ^b	0,02 ^a	3,44 ^{ab}	9,29 ^a	0,01 ^a	0,12 ^b	3,75 ^a	0,20 ^a	0,15 ^b
TG3N+	0,59 ^b	0,03 ^a	2,07 ^{bc}	1,45 ^b	0,01 ^a	0,36 ^{ab}	3,46 ^a	0,24 ^a	0,20 ^b
TG6N+	0,85 ^a	0,01 ^a	1,33 ^c	3,04 ^{ab}	0,09 ^a	0,33 ^b	4,68 ^a	0,26 ^a	0,16 ^b
TG6N-	0,48 ^b	0,02 ^a	2,50 ^{bc}	2,08 ^b	0,00 ^a	0,35 ^{ab}	3,45 ^a	0,08 ^a	0,21 ^b
G	0,39 ^b	0,02 ^a	4,02 ^a	1,26 ^b	0,07 ^a	0,72 ^a	2,15 ^a	0,22 ^a	0,37 ^a

^{abc} Les différentes lettres indiquent des différences significatives entre traitements selon une Anova à deux facteurs suivie d'un test HSD de Tukey.

4.2.2.4. *Analyses en composantes principales des paramètres concernant les MOS et arrière effet des prairies temporaires à Lusignan sur leurs caractéristiques*

Une analyse en composantes principales a été effectuée sur les paramètres des sols évalués dans cette étude, elle représente 45,83% de la variabilité (Figure 4.5). La dimension 1 représente 32,99% de la variabilité des échantillons et elle est fortement corrélée ($r > 0,8$) positivement aux concentrations en sucres, C, N des sols, aux ratios xylose/mannose du sol et de la fraction S+C et au C minéralisé en 56 jours lors des incubations et négativement aux ratios des sucres C6/C5 et desoxyC6/C5, à la constante de vitesse de

minéralisation du C et la teneur en C de la fraction (S+C)-rSOC. La dimension 2 représente 12,84% de la variabilité et elle est corrélée ($r > 0,6$) négativement à la concentration en P du sol, aux ratios de lignine S/V, Co/V (négativement) et (Ac/Al)S (positivement) et enfin aux ratios C/N de la fraction rSOC. D'après la dimension 1, la prairie permanente est significativement différente de l'ensemble des traitements, alors que d'après la dimension 2 (négativement) c'est la prairie temporaire fertilisée de 3 ans qui est différente des autres modalités.

Sur le plan des individus (Figure 4.5), la modalité G est nettement différenciée des autres traitements ayant subi les trois dernières années une rotation de culture. Néanmoins au sein de ce groupe, les gestions des prairies temporaires se distinguent entre elles mais seule la prairie fertilisée de 6 ans est différente de la culture avec une tendance à tendre vers la prairie permanente. En revanche, l'arrière effet de la prairie temporaire de 3 ans est complètement différent de celui de la prairie de 6 ans et ne présente pas un état intermédiaire entre la culture et la prairie de 6 ans fertilisée (Figure 4.5). Ce résultat concorde avec les analyses microbiennes et suggère, que la durée de prairie de 3 ans est insuffisante pour induire une signature prairiale des MOS persistante après trois ans de culture.

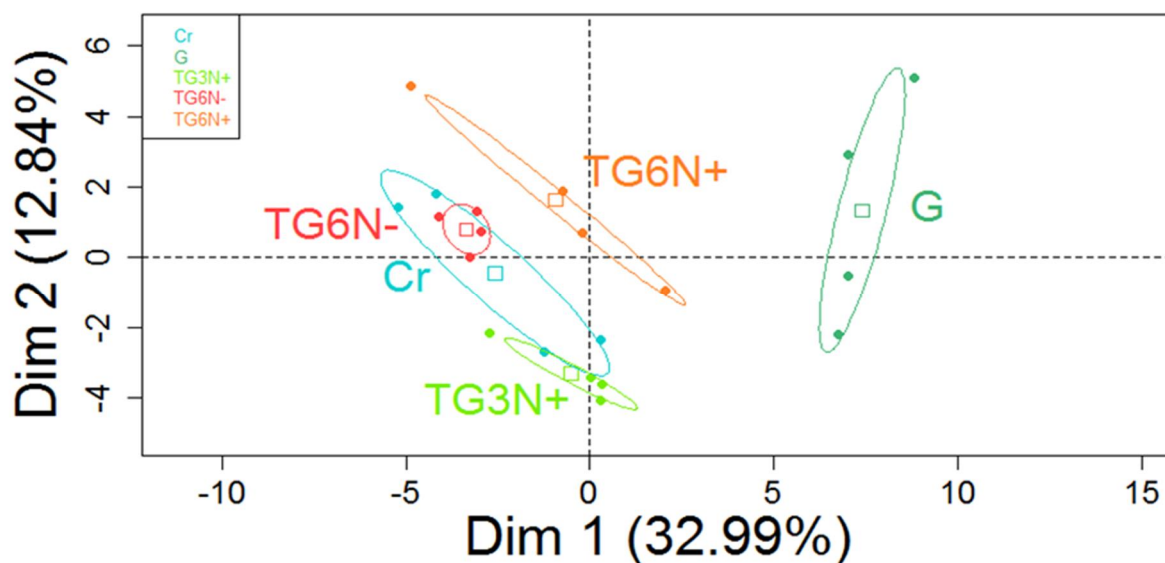


Figure 4.5 : ACP pour paramètres du sol sous culture permanente (Cr), prairie temporaire fertilisée de 3 ans (TG3N+), de 6 ans (TG6N+), de 6 prairie temporaire non-fertilisée de 6 ans (TG6N-) et de la prairie permanente (G).

A Laqueuille le même fractionnement des MOS a été effectué dans deux années différentes. Avec les données des deux sites, nous souhaitons en perspective faire de la modélisation de dynamique de C avec le modèle RothC afin de mieux appréhender l'impact des différents traitements sur la répartition des pools de MOS.

Bilan

L'installation d'une prairie change la nature des MOS par rapport à la culture permanente. Les sols sous prairie se caractérisent par une forte contribution des MOS d'origine végétale. Cette MOS est fraîche, riche en sucre et susceptible à disparaître rapidement après retournement des prairies. Cependant, nos résultats montrent, que cette signature prairiale des MOS peut être conservée et observée sous forme d'arrière effet après un cycle de cultures, si la prairie temporaire a été installée pour plus de six ans et si une fertilisation a eu lieu.

4.2.2.5. *Arrières effets sur l'abondance et activités des communautés microbiennes dans les sols sous prairies temporaire: impact de gestions contrastées*

A Lusignan, l'introduction des prairies dans la rotation culturale a fortement affectée les activités microbiennes du cycle de l'azote. En particulier, l'activité dénitrifiante varie en fonction du type d'alternance

culture/prairie et du niveau de fertilisation azotée (Figure 4.6). Plus précisément, la production brute de N_2O par le sol en anaérobiose est au moins deux fois plus forte dès que de la prairie est insérée dans la rotation (Figure 4.6). Cependant, la production nette de N_2O en anaérobiose, qui prend en compte la réduction d'une partie du N_2O en N_2 , n'est pas proportionnelle à la production brute. En fait, pour les 4 traitements fertilisés, la production nette de N_2O augmente progressivement avec la durée totale de prairie fertilisée durant l'ensemble de la période (9 ans) (Figure 4.6). On observe donc un arrière effet important sur la production nette de N_2O de l'introduction des prairies fertilisées dans les rotations. Le niveau de fertilisation des prairies influe aussi sur la production nette de N_2O , cette dernière étant plus forte quand les prairies sont fertilisées. De plus, les mesures de dénitrification en conditions potentielles (c'est à dire avec apport de carbone organique et nitrate) et semi-potentielles (juste apport de nitrate) montrent que la dénitrification est de moins en moins limitée par la disponibilité en carbone organique endogène du sol lorsque la durée totale de prairie augmente (Figure 4.7).

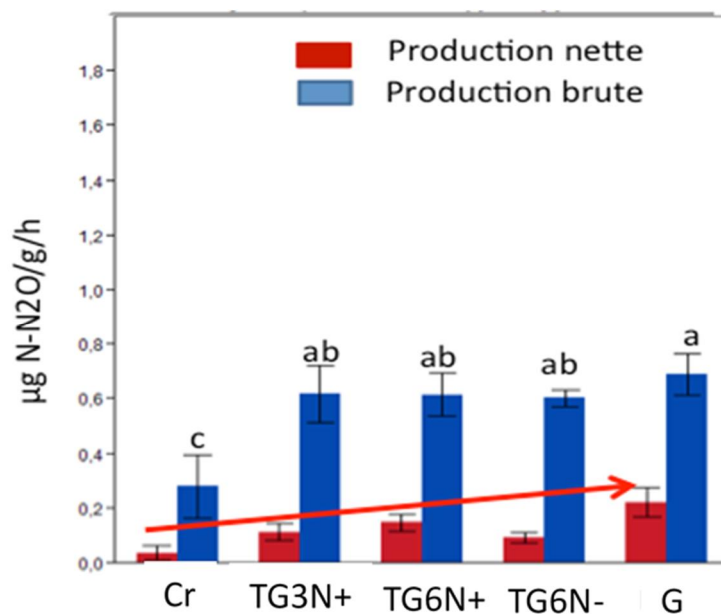


Figure 4.6 : Production brute (avec inhibition de la N_2O réductase) et nette (sans cette inhibition) de N_2O en anaérobiose par les sols soumis à 5 types de rotation culturale : culture permanente (Cr), prairie temporaire fertilisée de 3 ans (TG3N+), de 6 ans (TG6N+), prairie temporaire non-fertilisée de 6 ans (TG6N-) et prairie permanente de 9 ans (G).

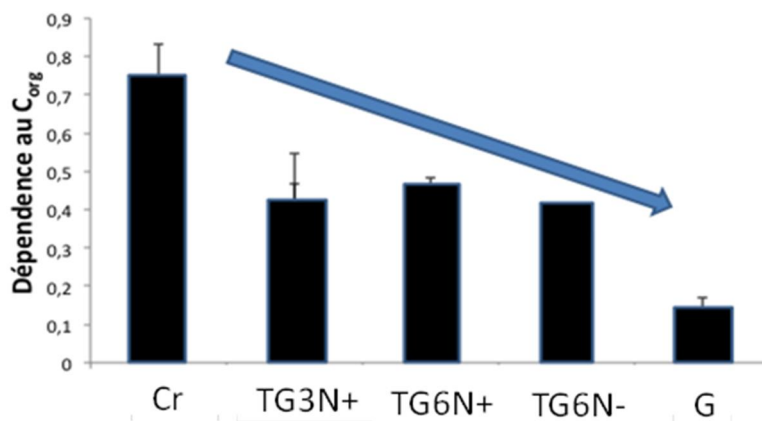


Figure 4.7 : Dépendance de l'activité dénitrifiante potentielle vis-à-vis de la disponibilité en carbone organique endogène dans les différents traitements sur le site de Lusignan.

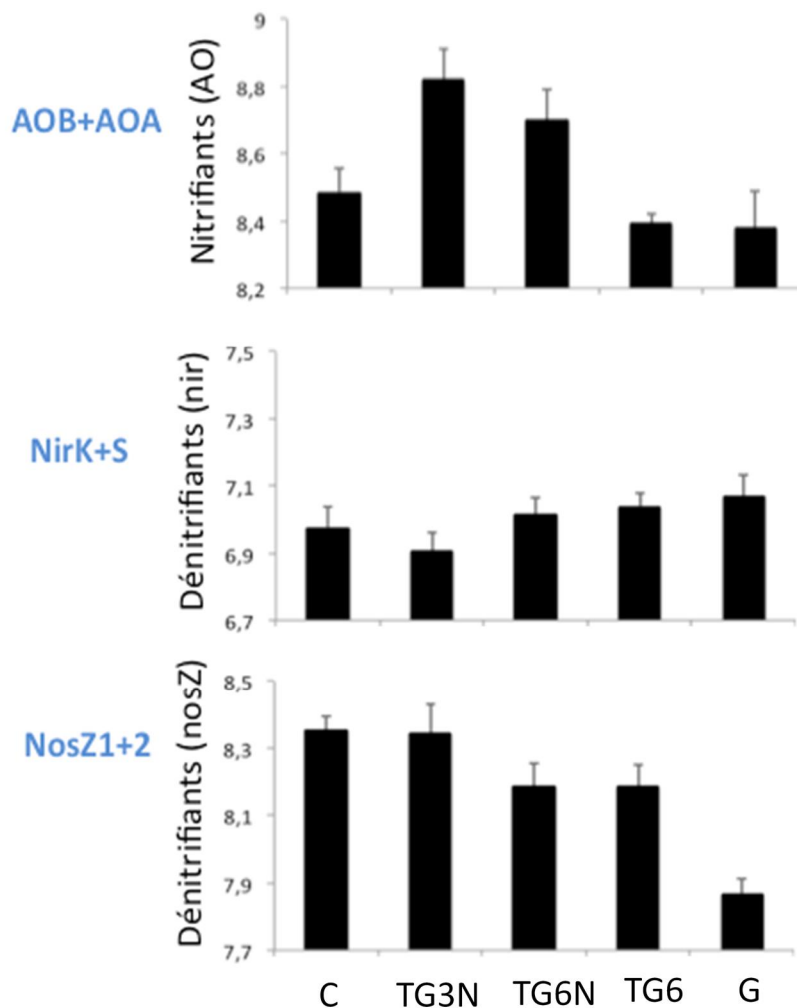


Figure 4.8 : Abondances (haut) des bactéries et archées capables d'oxyder l'ammonium AOB et AOA ; (milieu) des bactéries dénitrifiantes impliquées dans la production de N_2O et porteuses du gène nirK ou nirS ; et (bas) des bactéries dénitrifiantes impliquées dans la réduction de N_2O (porteuses du gène nosZ1 ou nosZ2) pour les différents traitements sur le site de Lusignan.

Par ailleurs, l'introduction des prairies dans la rotation culturale et la fertilisation des prairies affectent fortement les abondances des groupes fonctionnels microbiens impliqués dans le cycle de l'azote (Figure 4.8). Ainsi, les abondances des bactéries et archées capables d'oxyder l'ammonium, AOB et AOA respectivement, et qui contrôlent la première étape de la nitrification, sont maximales pour les traitements avec 3 ou 6 ans d'insertion de prairies fertilisées. Les bactéries dénitrifiantes impliquées dans la production de N_2O (porteuses du gène nirK ou nirS) sont maximales dans les prairies, alors que les bactéries dénitrifiantes impliquées dans la réduction de N_2O (porteuses du gène nosZ1 ou nosZ2) sont minimales dans les prairies (Figure 4.8).

Bilan

L'installation prairies augmente le potentiel des sols à émettre le N_2O . On observe un arrière effet de l'introduction des prairies temporaires dans les cycles des cultures en ce qui concerne l'abondance des micro-organismes impliqués dans le cycle de l'azote ainsi que de leur activité.

4.2.2.6. *Echanges de N_2O et de CO_2 mesurés sur le dispositif ACBB de Lusignan*

Les échanges de N_2O et de CO_2 des prairies temporaires sont mesurés en continu sur le dispositif SOERE ACCBB à Lusignan selon l'implantation décrite dans la Figure 3.1. Nous nous sommes particulièrement intéressés à la période pré fertilisation du printemps 2014 pendant laquelle nous avons fait des prélèvements de sol pour mesurer l'activité microbienne et la matière organique du sol. Nous présentons ici les émissions cumulées de N_2O et de CO_2 pour une période de 15 jours allant du 21 Avril 2014 au 5 Mai

2014. Pendant la période de mesure, la température quotidienne de l'air (données non rapportées ici) variait de 0,3 à 22,2 ° C, alors que les précipitations se sont produites principalement dans la période après le travail du sol (11 avril 2014).

La Figure 4.9 ci-dessous montre les flux cumulés de N₂O sur une période de 15 jours. On remarque que les prairies permanentes labourée ou non labourée ont les plus fortes émissions de N₂O sur cette période tandis que la prairie non fertilisée présente le flux le plus faible.

Concernant les flux de CO₂, la tendance est à l'inverse comme illustré dans la Figure 4.10 où les flux les plus faibles sont observés pour les prairies permanentes et les plus forts pour la prairie non fertilisée.

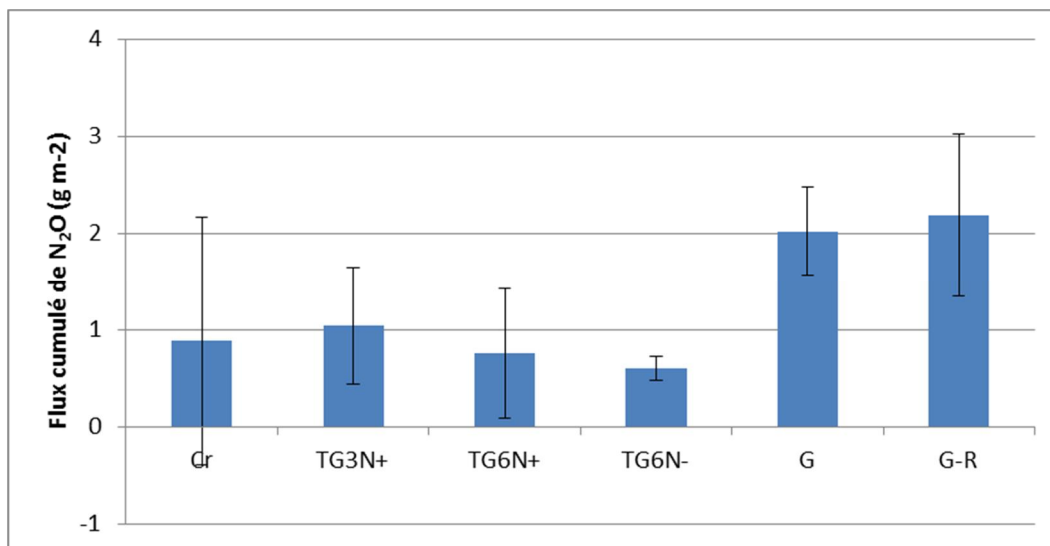


Figure 4.9: Flux cumulés de N₂O en g m⁻² sur 15 jours du 21 Avril au 5 Mai 2014 sur les 5 types de rotation culturale : à Lusignan et sur la parcelle de prairie retournée spécifique au projet AEGES. Culture permanente (Cr), prairie temporaire fertilisée de 3 ans (TG3N+), de 6 ans (TG6N+), prairie temporaire non-fertilisée de 6 ans (TG6N-), prairie permanente de plus de 9 ans (G) et prairie permanente de plus de 9 ans retournée le 11 Avril 2014 (G-R).

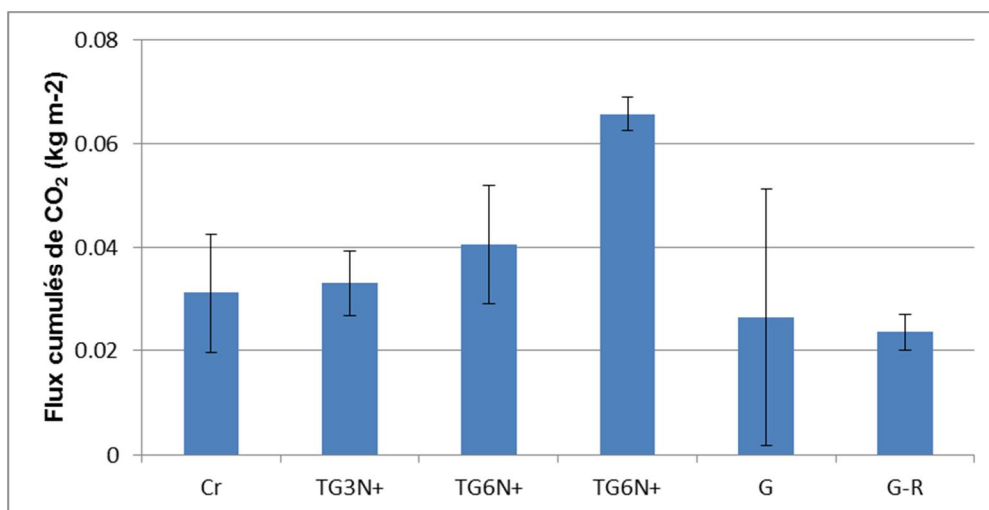


Figure 4.10: Flux cumulés de CO₂ en kg m⁻² sur 15 jours du 21 Avril au 5 Mai 2014 sur les 5 types de rotation culturale : à Lusignan et sur la parcelle de prairie retournée spécifique au projet AEGES. Culture permanente (Cr), prairie temporaire fertilisée de 3 ans (TG3N+), de 6 ans (TG6N+), prairie temporaire non-fertilisée de 6 ans (TG6N-), prairie permanente de plus de 9 ans (G) et prairie permanente de plus de 9 ans retournée le 11 Avril 2014 (G-R).

4.2.2.7. *Echanges de N₂O et de CO₂ après retournement d'une prairie*

Afin de caractériser les échanges de N₂O et de CO₂ suite à un retournement d'une prairie permanente, nous avons mis en place un dispositif particulier dans le cadre du SOERE ACBB à Lusignan. Nous nous sommes

focalisés sur les parcelles T5 du dispositif (voir Figure 3.1) (celle en prairie depuis le début du SOERE ie plus de 15 ans). Ainsi on a placé 4 chambres de mesures de flux sur la parcelle P2-T5 ou G. Cette partie de la parcelle a été retournée le 11 Avril et ressemée en prairie. Deux chambres ont été placées sur le bloc 4 parcelle 20 aussi en T5 ou G. Cette partie n'a été ni retournée ni fertilisée. Deux chambres ont été placées sur le bloc 1 parcelle 1 en T5 ou G. Cette partie n'a pas été retournée mais a été fertilisée le 13 Mai. Le Tableau 4.5 ci-dessous résume les différents traitements.

La mesure de l'azote minéral a été effectuée avec un échantillonnage de sol unique le 28 avril dans les trois parcelles.

La parcelle labourée (L) contenait en moyenne 5.2 g de N-NO₃ g⁻¹ et 3.9 g de N-NH₄ g⁻¹, alors que dans la parcelle non labourée / non fertilisée (NL(b)), les teneurs étaient de 1.9 g de N-NO₃ g⁻¹ et 2.1 g de N-NH₄ g⁻¹. Dans la parcelle non labourée / fertilisée (NL (a)) le contenu a été de 21.31 g N-NO₃ g⁻¹ et 14.65 µg N-NH₄ g⁻¹.

Tableau 4.5 : Résumé des différents traitements pour les parcelles en T5 ou G

Parcelles	Traitement	Nombre de chambre	Nomenclature
P2-T5	Labourée le 11 Avril	4	L
Bloc 1 plot 1 T5	Non labourée fertilisée le 12 Mai	2	NL(b)
Bloc 4 plot 20 T5	Non labourée . non fertilisée	2	NL(b)

Avant la période du travail du sol les flux de N₂O sont faibles et du même ordre de grandeur dans les 3 traitements. Ils varient entre -2.92 ng N₂O m⁻² s⁻¹ et 1.63 ng N₂O m⁻² s⁻¹ avec une moyenne de -0.08 ng N₂O m⁻² s⁻¹. Les flux de CO₂ ont une dynamique circadienne, allant de 0.81 ng de CO₂ m⁻² s⁻¹ à 13.6 ng de CO₂ m⁻² s⁻¹ avec une moyenne de 3.98 ng de CO₂ m⁻² s⁻¹.

La période de mesure après le labour est plus contrastée. Les flux de N₂O sont plus élevés par rapport à la période précédente. La parcelle labourée (L) a une augmentation des émissions à partir du 27 avril avec une série de pics plus élevés atteignant 69 ng N₂O m⁻² s⁻¹ jusqu'au 4 mai. Du 21 mai au 25 mai, un nouveau pic est mesuré, alors que dans les périodes antérieures, entre et après ces pics, l'émission était sensiblement basse mais supérieure aux autres parcelles. Au cours des mêmes pics, les parcelles non labourées (NL(a) et NL(b)) ont également montré une augmentation des émissions de N₂O, cependant plus faible par rapport à la parcelle labourée (L).

La parcelle NL(a), qui a reçu une fertilisation de 50 kg N ha⁻¹ le 13 mai, a présenté un pic élevé de N₂O huit jours après la fertilisation atteignant des émissions de 54 ng N₂O m⁻² s⁻¹. Les émissions de CO₂ étaient semblables dans les parcelles non labourées (NL(a) et NL(b)) et inférieures dans la parcelle labourée (L), surtout après le travail du sol.

La Figure 4.11 présente les moyennes quotidiennes de N₂O et de CO₂ pour les différents traitements au cours de la deuxième période de mesure (après labour) ainsi que le cumul sur cette même période. La parcelle labourée (L) a émis plus de N₂O que les deux autres parcelles, soit 37,28 mg N m⁻² contre 25,68 mg N m⁻² et 3,27 mg N m⁻² pour les parcelles NL(a) et NL(b) respectivement. Les échanges de CO₂ cumulées provenant de la parcelle labourée (L) ont été inférieurs aux deux autres traitements non labourés (NL (a et b), qui ont suivi une tendance similaire et ont atteint le même niveau à la fin de la période de mesure.

L'humidité du sol et la pluie ont produit comme prévu une augmentation des flux de N₂O avec un seuil se situant aux alentours d'une teneur en eau du sol supérieure à 27%. Nous avons ainsi réparties les mesures en 6 groupes pour estimer l'influence des trois traitements (L: travail du sol, NL(a): non labourée / fertilisée et NL(b) non labourée / fertilisée) avec une teneur en eau du sol supérieure ou inférieure à 27%.

Comme le montre la Figure 4.12, globalement on observe un flux de N₂O significativement (P<0.001) plus important pour les systèmes avec labour que sans labour. Le flux moyen de N₂O observé pour ces systèmes est 11 fois (resp. 18 fois) supérieur au système sans labour (b) et 2 fois (resp. 33%) supérieur au système sans labour (a) pour les jours avec une humidité du sol inférieure à 27% (resp. supérieur à 27%). Pour tous les systèmes on observe une augmentation significative (P<0.001) du flux de N₂O lorsque l'humidité du sol dépasse les 27% à 10 cm de profondeur. Cette augmentation est cependant plus importante pour le système avec labour (augmentation d'un facteur 3 du flux moyen 3 fois) et sans labour fertilisé (a) (facteur 6) que pour le système sans labour non fertilisé (b) (facteur 2).

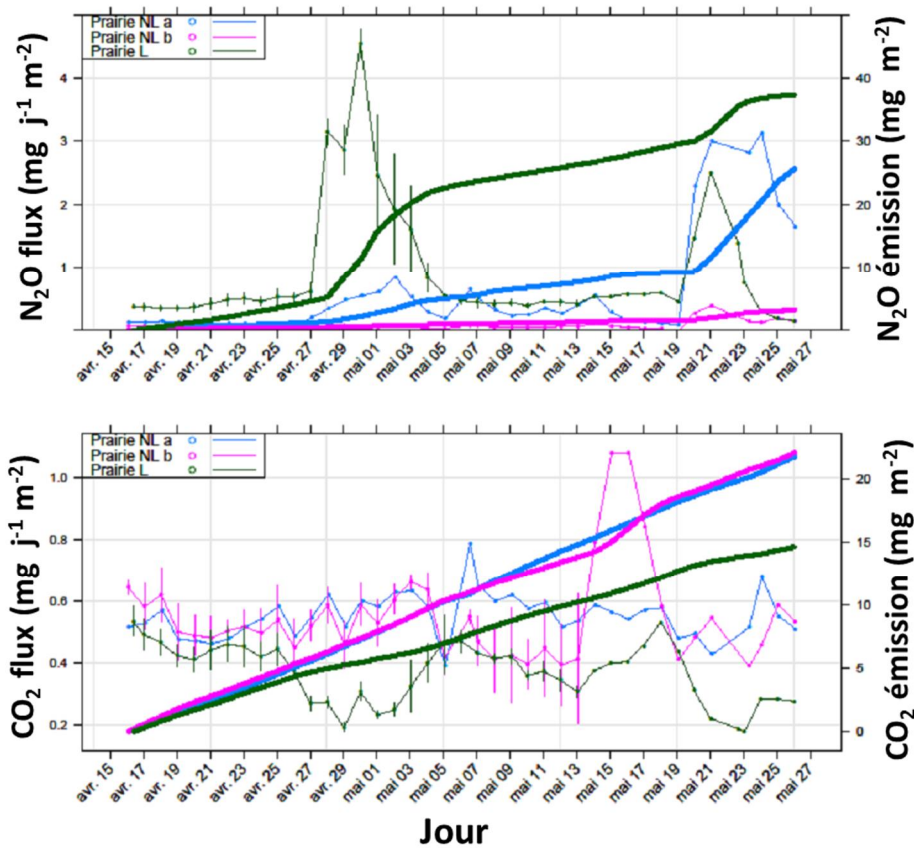


Figure 4.11 Moyennes et cumuls des flux quotidiens de N₂O et de CO₂ dans les trois traitements. Les lignes épaisses correspondent aux flux cumulés en 42 jours du 16 avril au 27 mai 2014. Les lignes avec barres d'erreurs représentent les flux moyennés sur la journée et les écarts-types. Prairie L est la prairie labourée, prairie NL(a) est la prairie non labourée mais fertilisée le 13 Mai et la prairie NL(b) est la prairie non labourée non fertilisée.

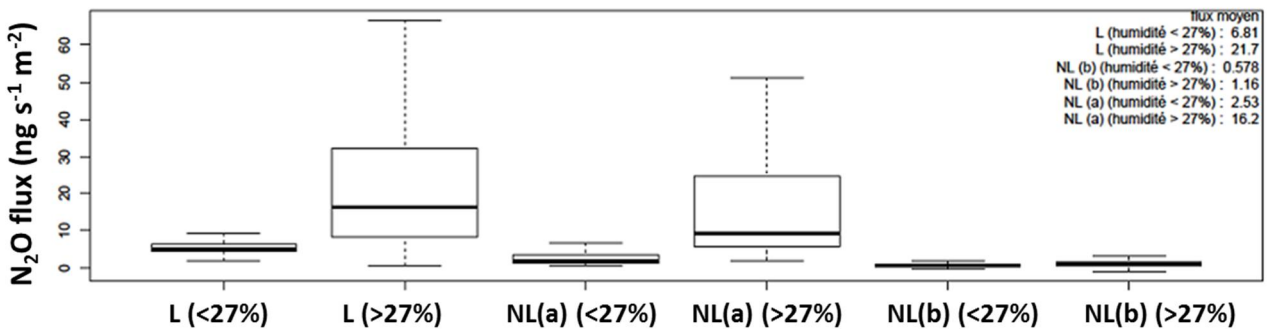


Figure 4.12 : Distribution des flux de N₂O pour 6 différentes conditions : Prairie labourée (L), non-labourée fertilisée NL(a), non-labourée non fertilisée NL(b), chacune pour les jours avec un taux d'humidité du sol supérieur ou inférieur à 27% à 10 cm de profondeur. La différence entre les moyennes indiquées dans l'écart est significatif avec $P < 0.001$ obtenu par un test de Student

A l'inverse on observe un flux de CO₂ significativement ($P < 0.001$) plus faible pour les systèmes labourés que pour les systèmes non labourés (diminution du flux moyen de 25 à 48% suivant l'humidité du sol) (Figure 4.13). Lorsque l'humidité du sol est supérieur à 27% on observe également une diminution significative ($P < 0.001$) du flux de CO₂ pour les systèmes labourés, de l'ordre de 30% du flux moyen. Cette influence de l'humidité du sol sur le flux de CO₂ n'est pas retrouvé pour les systèmes non labourés ou les différences observées ne sont pas significatives ($P > 0.35$).

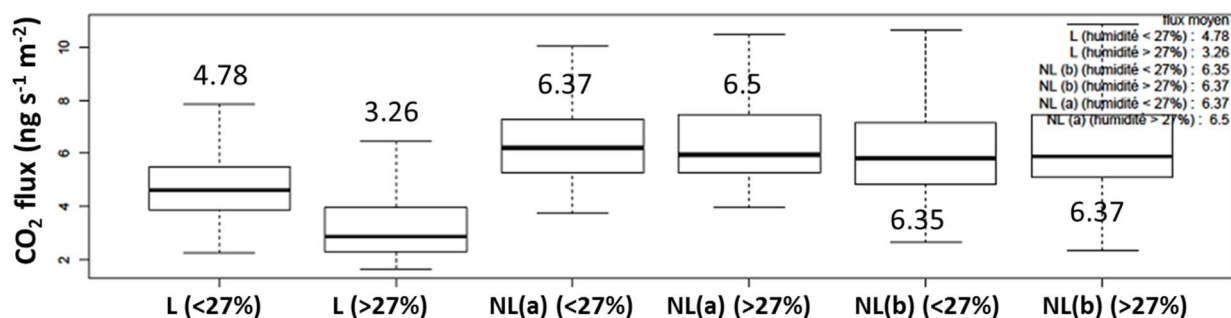


Figure 4.13 : Distribution des flux de CO₂ pour 6 différentes conditions : Prairie labourée (L), non-labourée fertilisée NL(a), non-labourée non fertilisée NL(b), chacune pour les jours avec un taux de humidité du sol supérieur ou inférieur à 27% à 10 cm de profondeur. La différence entre les moyennes indiquées dans l'encart est significatif avec P<0.001 obtenu par un test de Student

Nous avons finalement tenté de calculer les émissions cumulatives de gaz à effet de serre provenant des trois parcelles pour voir l'effet du travail du sol sur les émissions totales. Le Tableau 4.6 indique les émissions cumulées de CO₂ et de N₂O ainsi que l'équivalent carbone de ces émissions. On constate que la parcelle labourée (L) présente les émissions cumulées les plus élevées fortement influencées par les flux de N₂O, surtout après l'événement de labour suivi de la parcelle non labourée et fertilisée (NL(a)) tandis que la parcelle non labourée non fertilisée (NL(b)) a les émissions les plus faibles. Ces conclusions doivent cependant être examinées avec précaution car elles ne couvrent qu'une courte période de temps et les résultats annuels des émissions cumulées doivent être calculés à partir d'autres mesures ou à partir de l'exercice de modélisation pour pouvoir tirer une conclusion solide sur les effets du travail du sol sur les émissions de GES.

Tableau 4.6 : Quantités de CO₂ et N₂O émises sur 42 jours du 16 avril au 27 mai 2014 et les quantités totales émises en équivalents CO₂ (éq.CO₂) pour les trois parcelles : labourée (L), non labourée fertilisée (NL(a)) et non labourée non fertilisée (NL(b)).

Traitement	Gaz	Emission (mg m ⁻²)	Emission CO ₂ eq. (mg CO ₂ m ⁻²)	Totale CO ₂ eq. (mg CO ₂ m ⁻²)
L	CO ₂	14.65	14.65	11 124.09
	N ₂ O	37.28	11 109.44	
NL(a)	CO ₂	21.78	21.78	7 674.42
	N ₂ O	25.68	7 652.64	
NL(b)	CO ₂	22.09	22.09	996.55
	N ₂ O	3.27	974.46	

Bilan

Le labour a limité les émissions de CO₂ et favorisé les émissions de N₂O dans les conditions de l'expérimentation. L'augmentation des émissions de N₂O est probablement causée par une plus grande disponibilité en azote et en carbone organique provenant des résidus des plantes. Des fortes émissions de N₂O peuvent continuer à se produire longtemps après le labour étant donné la lente minéralisation des composés organiques apportés par le labour. On peut donc conclure que la réduction de cette pratique agricole avec l'allongement de la durée de vie des prairies temporaires contribuerait considérablement à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. Par contre ces observations restent limitées étant donné le faible nombre des chambres de mesure utilisés dans cette étude et la durée limitée de l'expérimentation. Il faudrait un nombre plus important de chambres afin de minimiser l'effet d'hétérogénéité spatial et une durée de mesure d'au moins un an afin d'obtenir de résultats plus représentatifs. Il serait important de considérer également les flux de méthane (CH₄) dans le bilan d'émission de GES.

4.2.2.8. **Vers une explicitation des couplages entre MOS, acteurs microbiens et émissions de N₂O à intégrer dans les modèles**

Un objectif d'AEGES a été d'analyser les couplages entre caractéristiques du sol, y compris caractéristiques des matières organiques, abondances et activités des communautés microbiennes du sol et émissions de N₂O sous l'effet des usages des sols (Figure 4.14).



Figure 4.14: Schéma résumant la démarche AEGES visant à analyser les couplages entre caractéristiques du sol, abondances et activités des communautés microbiennes du sol, et émissions de N₂O sous l'effet des usages des sols.

Nos données nous permettent actuellement d'analyser les principaux couplages observés entre (i) les caractéristiques physico-chimiques du sol, notamment la quantité et qualité des matières organiques, (ii) les abondances des principaux groupes fonctionnels microbiens du sol impliqués dans le cycle de l'azote, (iii) les activités de production brute et nette de N₂O en anaérobiose comme en microaérophilie, et (iv) les émissions de N₂O mesurées in situ.

Sur les sites de Theix et de Lacqueille, les analyses ne permettent pas encore d'identifier les déterminants des niveaux d'émission de N₂O mesurés in situ. Cette difficulté vient entre autre de l'importante variabilité spatiale qui existe sur le dispositif.

Pour le site de Lusignan, la démarche actuellement suivie (Figure 4.15) est d'identifier, par approches de type path analysis, les relations entre les caractéristiques du sol et l'abondance de chacun des 6 groupes microbiens étudiés, comment ces abondances (et rapports entre abondances de différents groupes) contrôlent les productions brute et nette de N₂O et in fine les émissions de N₂O in situ.

Ainsi, nous avons observé, que la teneur en eau du sol et les caractéristiques des matières organiques, notamment la nature des lignines, pilotent fortement l'abondance totale des nitrifiants et des réducteurs de nitrite, qui déterminent à leur tour l'abondance des réducteurs de N₂O. Le pH étant similaire dans les traitements ne pas contrôlé ces paramètres. La production nette de N₂O en anaérobiose apparaît d'une part liée à la production brute (elle-même dépendant de la disponibilité en nitrate) mais aussi du rapport entre l'abondance de 2 groupes clés : les réducteurs de nitrite et les réducteurs de N₂O. De tels résultats montrent comment l'équilibre entre différents groupes de dénitrifiants influence la production nette de N₂O. Ils fournissent aussi une piste concrète pour mieux prendre en compte la composante microbienne dans des modèles d'émission de N₂O.

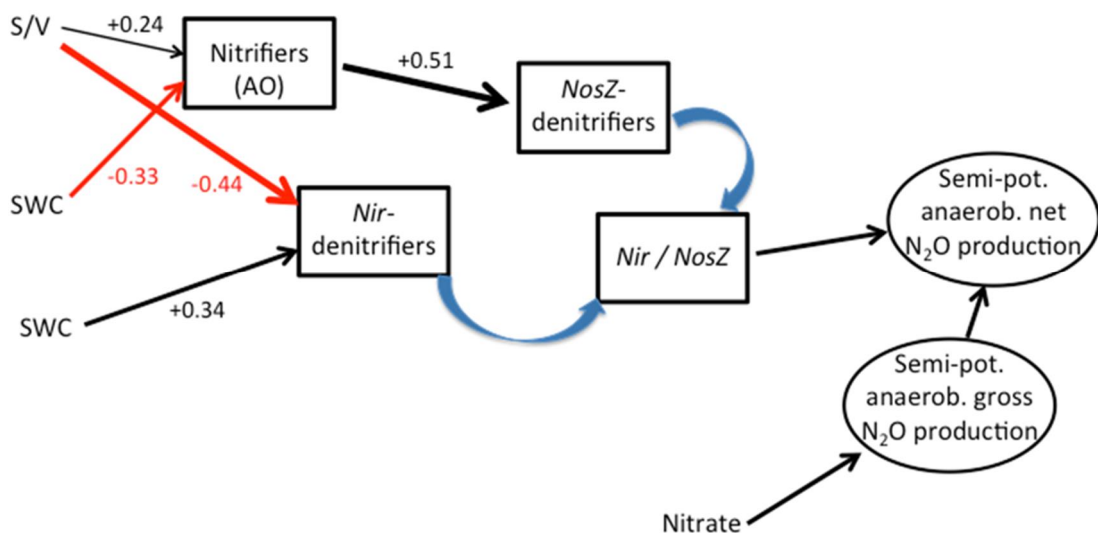


Figure 4.15 : Type de résultats obtenus par path analysis et présentant les relations entre les caractéristiques physico-chimiques du sol, et notamment la teneur moyenne en eau du sol SWC et la qualité des matières organiques (indice de type de lignines syringyl/vanillyl S/V), et les abondances des nitrifiants (oxydant ammonium, AO), des réducteurs de nitrite (Nir) et des réducteurs de N₂O (NosZ). Le modèle explicite aussi comment la production nette de N₂O en anaérobiose est reliée (i) à la production brute, elle-même sous dépendance de la disponibilité en nitrate, et (ii) au rapport entre l'abondance des réducteurs de nitrite et des réducteurs de N₂O (Nir/NosZ).

Il faut noter que les analyses réalisées visent à expliquer les données obtenues à travers des traitements contrastés (culture ; prairies ; et alternances prairies/cultures fertilisées ou non) ; l'obtention de modèles statistiques significatifs traduit donc une bonne robustesse des éléments explicatifs. Les travaux vont se poursuivre et les pistes de types de couplage à prendre en compte dans les modèles de mission de flux de N₂O seront proposées et testées dans les mois, qui viennent par des collaborations informelles initié dans le cadre du projet AEGES.

Bilan

Un workshop entre les modélisateurs et les expérimentateurs a eu lieu dans le cadre du projet AEGES (voir le compte rendu en annexe) afin d'explorer des pistes pour introduire ces résultats de couplage dans des approches de modélisation plus mécanistes notamment en ce qui concerne les relations entre les MOS, les émissions de N₂O et via les différents effets sur la nitrification et la dénitrification.

4.3. Tâche 3 : Evaluation critique de la capacité des modèles à reproduire les effets des différents types de forçage anthropiques sur les stocks de matières organiques du sol et des émissions de GES

Les activités de cette tâche consistaient à (1) simuler à l'aide des trois modèles (PaSIM, CERES-EGC, ORCHIDEE) l'effet des différentes pratiques agricoles et des scénarios d'atténuation (par exemple utilisation de la terre et fertilisation) sur les émissions de gaz à effet de serre et les stocks de carbone et d'azote des sols, (2) coupler deux modèles (PaSIM et CERES-EGC), afin de pouvoir modéliser l'introduction de prairies temporaires dans le cycle de culture, (3) comparer les simulations de différents modèles avec les données existantes afin de quantifier l'incertitude à l'échelle du champ, et (4) mieux prendre en compte les résultats expérimentaux et inclure une nouvelle compréhension mécaniste dans les modèles.

4.3.1. Evaluation critique des modèles

4.3.1.1. CERES-EGC

Le modèle CERES - EGC a été évalué à l'aide de données d'un essai de terrain agricole à l'INRA Versailles-Grignon (Loubet et al. 2011 ; Jeuffroy et al. 2012). Les données observées et modélisées concernant la date de récolte et les rendements sont présentées respectivement dans les Figure 4.16 et Figure 4.17 respectivement. Le modèle CERES-EGC a présenté une bonne prédiction pour le cycle de la durée de la culture du blé d'hiver et du colza, tandis que la durée du cycle du pois n'est pas bien simulée avec une sous-estimation du jour de la récolte en 2008 et une surestimation en 2009 et 2010. Les données de la Figure 4.17 sont rapportées par la charge d'azote à l'hectare. Les simulations du blé d'hiver ont montré une bonne réponse à la quantité croissante de N, où des charges de 150 à 220 kg correspondaient à des biais de rendement inférieurs à ceux des productions observées. Le colza n'a pas montré la même tendance avec les charges d'azote. Les rendements grain simulés des cultures de blé d'hiver et de colza dans toutes les rotations ont été surestimés, surtout lorsque ceux observés étaient faibles (de 2,5 à 5,2 t DM ha⁻¹ pour le blé d'hiver et de 1,5 à 2,5 t DM ha⁻¹ pour le colza). Lorsque les productions étaient supérieures à 1 t DM ha⁻¹ pour le blé d'hiver et le colza, il y avait un bon accord entre les observations et les données modélisées. Les productions de pois d'hiver ont été sous-estimées ou sur-estimées avec des biais allant de 1,4 à 5 t DM ha⁻¹.

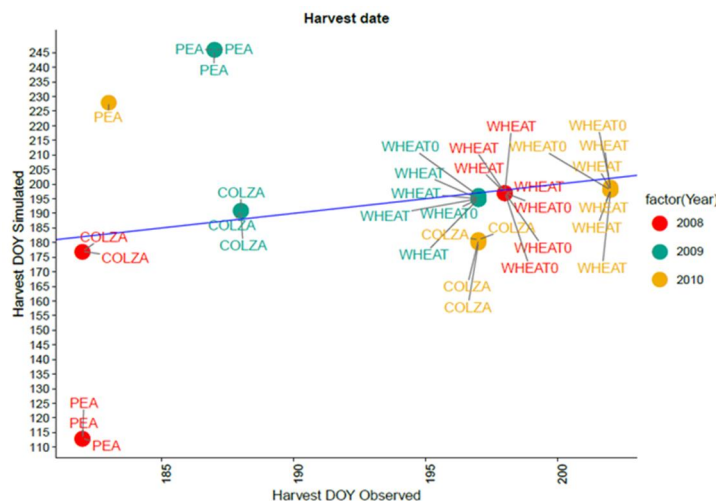


Figure 4.16 : Date de récolte (en DOY= jour de l'année) des différentes cultures pour les années 2008 à 2010. La ligne bleu est la première bissectrice. PEA = pois d'hiver; COLZA = colza; WHEAT = blé d'hiver fertilisé; WHEAT0 blé d'hiver non fertilisé.

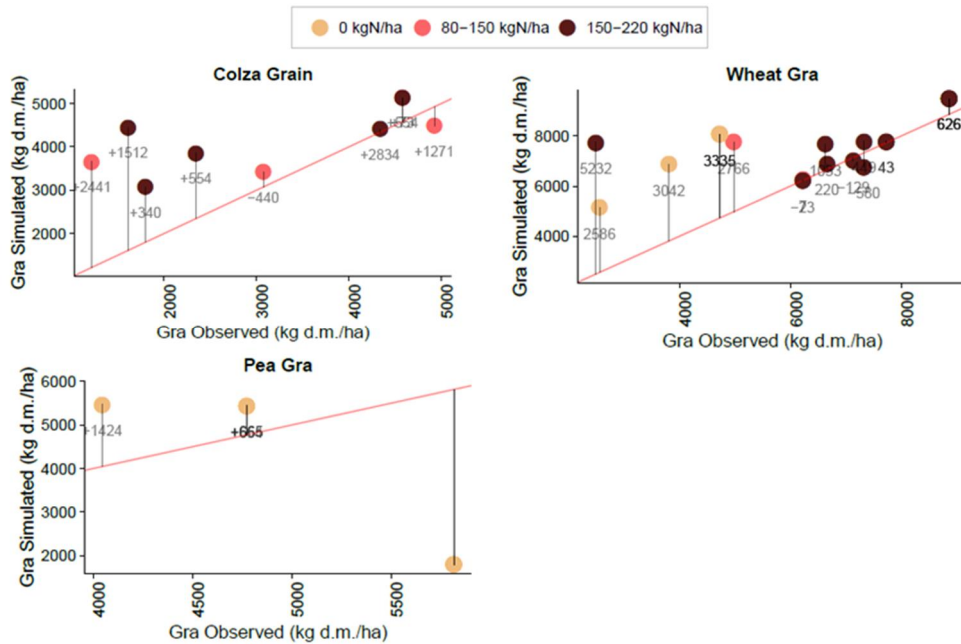


Figure 4.17 : Rendement des différentes cultures en kg DM ha⁻¹. Données sont subdivisée selon la quantité de fertilisation apportée. La ligne rouge est la première bissectrice. PEA = pois d'hiver; COLZA = colza; WHEAT = blé d'hiver. DM = dry matter ou matière sèche.

Les données observées vs données simulées pour chaque rotation de cultures concernant l'azote minéral cumulé du sol en tant que somme d'ammoniac et d'azote nitrique, le facteur d'émission pour le N₂O (exprimé en émissions cumulées de N₂O dans les rotations divisées par l'azote appliqué en pourcentage) et également pour l'azote minéral du sol (exprimé sous forme d'émissions cumulées de N₂O dans les rotations divisées par l'azote appliqué plus l'azote minéral en pourcentage) sont présentés dans la Figure 4.18. Les résultats ont montré que le facteur d'émission pour le N₂O (Figure 4.18 c et d) était inférieur à la valeur par défaut du GIEC (1%). Le biais le plus important entre les données observées et simulées a été observé lorsqu'il n'y avait pas fertilisation pour certaines cultures. Concernant les émissions de N₂O cumulées par rotation le modèle CERES-EGC arrive à reproduire les émissions cumulées de N₂O, en particulier pour le blé. Bien que visuellement l'amplitude et les tendances semblent bien reproduites, l'indice statistique utilisé pour comprendre les différences par rapport aux données observées et simulées a révélé que les résultats ne sont pas toujours satisfaisants. En fait, le coefficient de corrélation (R²) variait de 0 à 0,2; L'efficacité de modélisation (FE) variait de -4,7 à 0,1 et l'erreur quadratique moyenne de la racine (RRMSE) variait de 155 à 750. Le score le plus faible a été obtenu pour la parcelle non fertilisée. Pour ce cas, les données ont montré une surestimation générale des flux simulés. Les données de teneur en eau du sol et d'azote minéral dans les 30 premiers centimètres de sol ont montré de meilleurs scores d'indice (teneur en eau du sol: R² de 0,25 à 0,9, EF de -3 à -0,24, RRMSE de 22,8 à 35, R² de 0,1 à 0,7, EF de -4,6 à -0,15, RRMSE de 70 à 155) et une légère surestimation des valeurs mesurées. Ces résultats doivent également être rapportés en fonction du nombre d'observations qui, pour certaines rotations, en particulier les rotations sans azote, étaient très faibles.

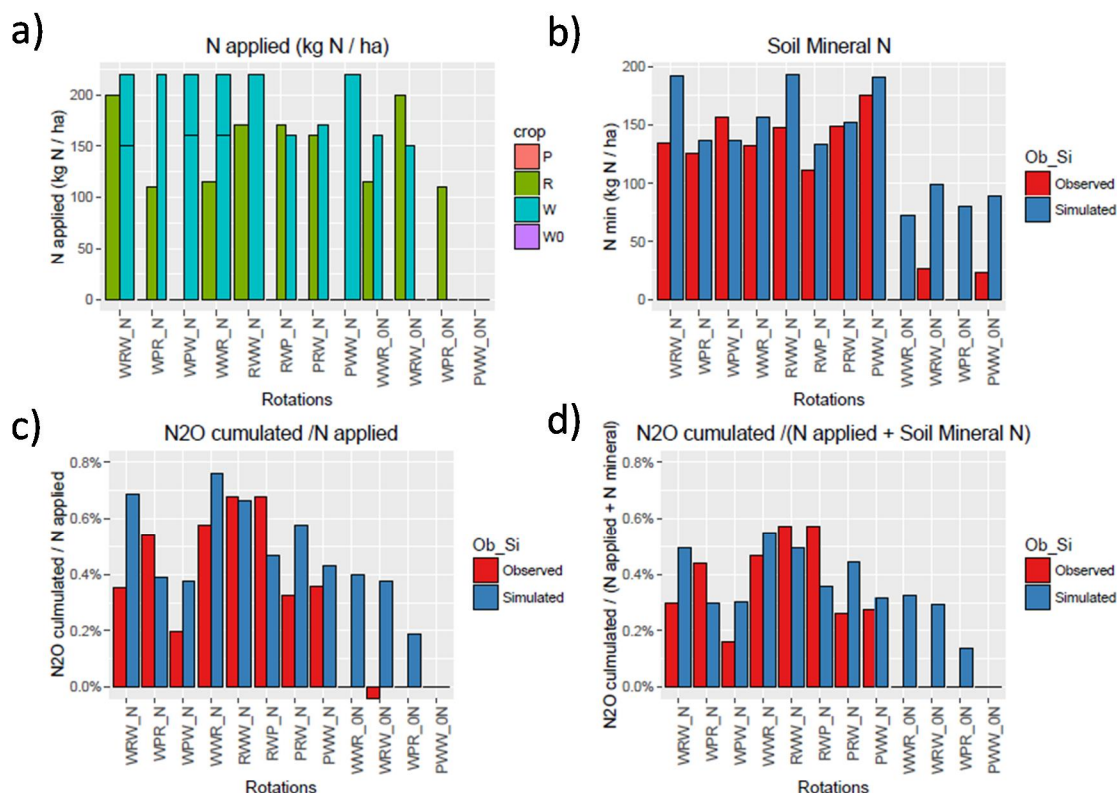


Figure 4.18: a) Quantité d'azote appliquée dans les rotations (kg N ha^{-1}); et données observées et simulées pour b) azote minéral du sol ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) dans les rotations (kg N ha^{-1}); c) Émissions cumulées de N_2O dans les rotations (kg N ha^{-1}) divisé par la quantité d'N appliqué (kg N ha^{-1}); et d) Émissions cumulées de N_2O dans les rotations (kg N ha^{-1}) divisé par l'azote appliqué plus l'azote minéral du sol (kg N ha^{-1}). P = pois d'hiver; R = colza; W = blé d'hiver; "_N" et "_ON" sont respectivement rotation avec l'application d'engrais et sans engrais.

4.3.1.2. PaSIM

Le modèle PaSIM a été évalué en utilisant les données enregistrées pour les parcelles de prairies permanentes à l'ACBB SOERE, site de Lusignan (parcelle P2 de la Figure 3.1 ou G). Nous évaluons quelques résultats sur la production de biomasse, les flux de carbone, la teneur en eau du sol et la teneur en azote minéral. Le Tableau 4.7 indique les indices statistiques issus de l'évaluation des simulations face aux observations.

Tableau 4.7 Indices statistiques utilisés pour comparer les données modélisées et mesurées concernant la biomasse, la GPP (production primaire brute), la NEE (production primaire nette), la respiration des écosystèmes (RECO), la teneur en eau du sol à 30 cm de profondeur, l'azote ammoniacal à 30 cm de profondeur (NH_4^+), teneur en nitrate à 30 cm (NO_3^-) et les émissions d'oxyde nitreux (N_2O). La description des index est indiquée dans le texte.

Type	MAE	RRMSE	EF	CRM	Slope	R2
Biomass	0.19 (kg DM m^{-2})	0.24 (kg DM m^{-2})	-0.74	-0.39	0.48	0.17
GPP	1.89 (g C m^{-2})	2.64 (g C m^{-2})	0.34	0.11	0.94	0.58
NEE	1.48 (g C m^{-2})	1.97 (g C m^{-2})	0.23	0.10	0.69	0.41
RECO	1.02 (g C m^{-2})	1.37 (g C m^{-2})	0.41	0.12	0.78	0.55
SWC	0.08 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	0.08 ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$)	-1.87	-0.49	0.92	0.71
NH4	2.2×10^{-4} (kg N m^{-2})	2.4×10^{-4} (kg N m^{-2})	-6.17	0.82	-0.06	0.05
NO3	6.8×10^{-4} (kg N m^{-2})	$8.5\text{E} \times 10^{-4}$ (kg N m^{-2})	-1.36	0.83	0.04	0.04
N2O	3.42 ($\text{g N ha}^{-1} \text{d}^{-1}$)	16.50 ($\text{g N ha}^{-1} \text{d}^{-1}$)	0.01	0.64	0.02	0.03

Les biomasses simulées sont surestimées par rapport aux observations observées (CRM = -0,38) et l'efficacité de la modélisation est négative, ce qui indique que le modèle n'est pas un bon prédicteur de la

biomasse (EF = -0,74). L'erreur absolue et la RMSE sont respectivement de 0,18 kg DM m⁻² et de 0,24 kg DM m⁻², ce qui indique une grande variance des erreurs individuelles dans les échantillons. La GPP simulée et la RECO ont obtenu les meilleures performances en comparaison aux mesures. En effet, l'EF était positif (0,34 et 0,41 respectivement) et le MAE et la RMSE étaient relativement faibles à la fois pour la GPP (1,89 g C m⁻² et 2,64 g C m⁻², respectivement) et la RECO (1,97 g C m⁻² et 2,61 g C m⁻², respectivement). La NEE simulé est en ligne avec la moyenne mesuré, alors que l'écart-type des mesures suppose des valeurs 100 fois plus élevées. Le FE obtient un bon score (0,23) et la MAE et RMSE (1,48 g C m⁻² et 1,97 g C m⁻², respectivement) sont en ligne avec le GPP et RECO. Tous les flux de carbone simulés ont une légère tendance à sous-estimer les flux (voir indice CRM dans le tableau 4.7) et supposent un bon score pour le R².

La teneur en eau simulée à 30 cm de profondeur est surestimée (CRM = -0,49) par rapport aux mesures. L'azote ammoniacal (NH₄) et la teneur en nitrate (NO₃) dans les 30 premiers cm de sol étaient les variables les moins bien simulées. En effet, la FE était négative, avec une sous-estimation surtout pour les faibles valeurs. Les émissions de N₂O ont marqué des valeurs pas très différentes de celles de NH₄ et de NO₃. Le résultat EF est positif, mais proche de zéro, alors que le CRM dénote une forte sous-estimation des flux. Enfin, le carbone total du sol est présenté à la Figure 4.19 avec seulement deux mesures en 2005 et 2014. La tendance décrite par les simulations a été très proche de la valeur obtenue neuf ans après la première mesure de 2005. La courbe décrite dans le graphique indique un gain estival de Carbone par le sol avec une tendance hivernale stable ou décroissante.

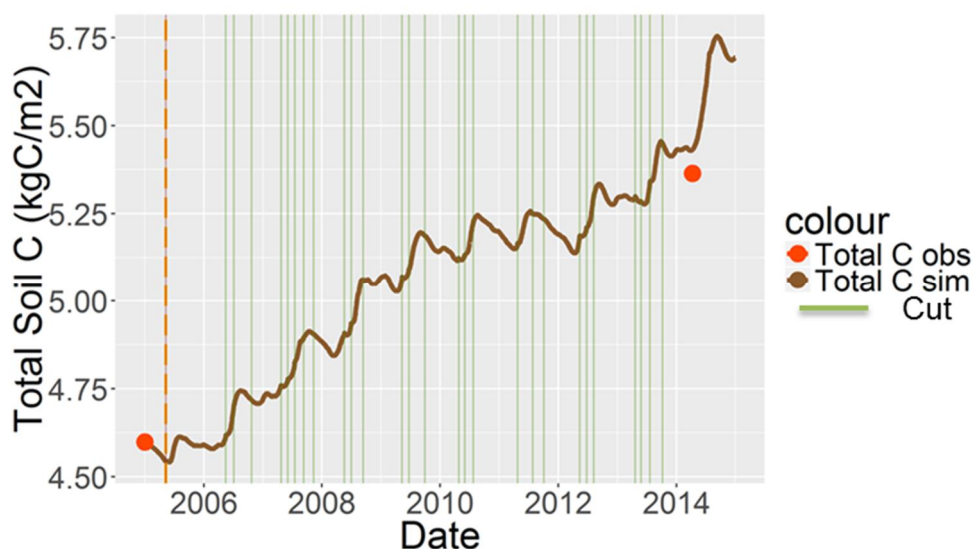


Figure 4.19 : Le carbone total du sol à 300 cm de profondeur simulé et mesuré en Lusignan dans le traitement P2. Les données sont exprimées en g C m⁻². Dans le graphique, les événements de coupe sont signalés sous la forme de lignes verticales vertes.

4.3.1.3. ORCHIDEE

Le modèle ORCHIDEE-GM intègre les modules « gestion » et « animal » du modèle PaSim afin de prendre en compte les évènements de fauches et les périodes de pâturage et leur impact sur la productivité carbonée des écosystèmes, sur le devenir de la biomasse produite (export ou retour au sol) et les émissions de méthane par fermentation entérique. Le modèle ORCHIDEE-GM a été développé puis testé dans le cadre de travail de thèse de Jinfeng Chang. Une première évaluation sur un ensemble de prairies européennes (Chang et al., 2013), où des mesures des flux de carbone étaient réalisées en continu montre que la prise en compte de la gestion améliore l'accord modèle/donnée sur la majeure partie des sites pour le flux brut de productivité primaire (GPP), la respiration totale de l'écosystème (TER) et le bilan net en terme de bilan carboné à l'échelle de l'écosystème (NEE= GPP-TER) (Figure 4.20).

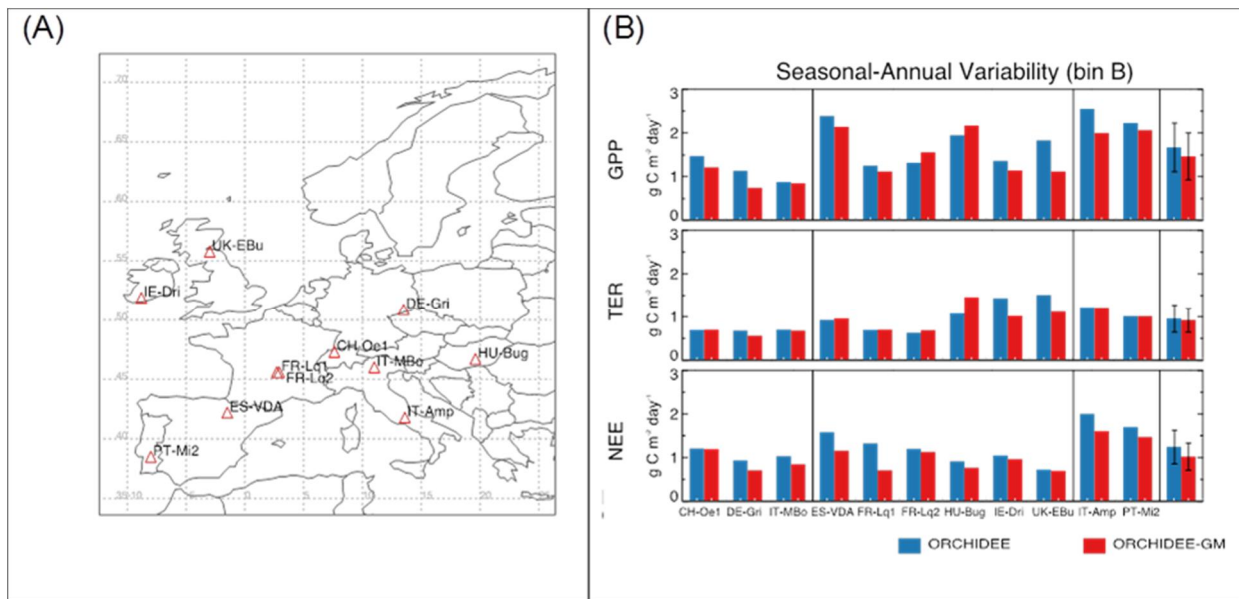


Figure 4.20 : (A) Localisation des sites sur lesquelles le modèle ORCHIDEE-GM a été évalué et (B) Erreur quadratique moyenne (RMSE) du modèle ORCHIDEE-GM pour les flux de GPP, de TER, et de NEE à l'échelle saisonnière. Les sites CH-Oe1, DE-Gri et IT-MBs étaient exclusivement fauchés ; les sites ES-VDA, FR-Lq1, FR-Lq2, HU-Bug, IE-Dri et UK-EBU exclusivement pâturés et les sites IT-Amp et PT-Mi2 fauchés et pâturés.

Dans le cadre du projet AEGES, le modèle ORCHIDEE-GM a été testé sur les prairies du site de Lusignan. Les résultats obtenus en terme de simulation de l'évolution du bilan net de Carbone à l'échelle de l'écosystème (NEE) sont représentés Figure 47-A et 47-B pour la prairie pâturée et fauchée, respectivement. On constate que la prise en compte de la gestion de la prairie permet de significativement améliorer l'évolution de la NEE au cours de la saison. En particulier, les variations abruptes de la NEE associées aux coupes ou aux périodes de pâturage sont bien simulées par ORCHIDEE-GM. Il est également intéressant de noter le meilleur accord entre les observations et les flux simulés par ORCHIDEE-GM durant la période hivernale, période pendant laquelle ORCHIDEE avait tendance à surestimer le flux de NEE (surestimation du flux de carbone vers l'atmosphère). Ce meilleur accord obtenu pour la NEE est à attribuer au premier ordre à un meilleur accord pour la productivité primaire brute (GPP).

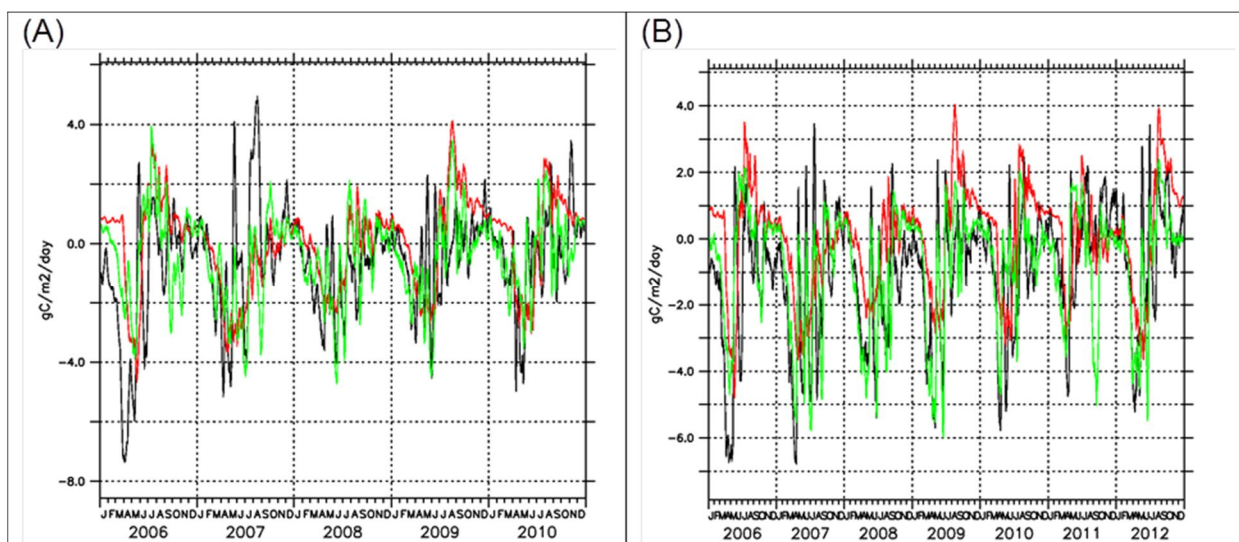


Figure 4.21 : Evolution de la NEE sur la prairie pâturée (A) et la prairie fauchée (B) du site de Lusignan simulée par ORCHIDEE (en rouge), ORCHIDEE-GM (en vert) et observé (en noir)

Une version du modèle ORCHIDEE intégrant le cycle de l'azote a été développée ces dernières années, en se basant sur le travail initié par Soenke Zahle (Zaehle and Friend, 2010; Zaehle et al., 2010). Cette version nommée ORCHIDEE-CN permet maintenant de rendre compte de l'effet des dépôts azotés et de la

fertilisation sur la productivité carbonée des écosystèmes, et de simuler les émissions de composés azotés, en particulier d'oxyde nitreux (N_2O). Cette nouvelle version du modèle qui devrait être intégrée dans les prochaines simulations CMIP6 réalisées avec le modèle IPSL-CM6, est en phase de test. Une première étude à l'aide de cette nouvelle version du modèle, en cours de rédaction, vise à évaluer la capacité du modèle à reproduire les différents flux d'intérêts sur un ensemble (70) de sites naturels de différent type (Forêt tropicales sempervirentes de feuillus, TrEBF ; forêts tempérées sempervirentes de feuillus, TeENF ; forêts tempérées sempervirentes de feuillus, TeEBF ; forêts tempérées décidues de feuillus, TeDBF ; forêts boréales sempervirentes de feuillus, BoENF). Dans l'ensemble, le modèle est à même de rendre de la variabilité saisonnière du flux de GPP (figure 4.22A). Le désaccord modèle/donnée provient le plus souvent d'un biais systématique ou d'une mauvaise corrélation, l'amplitude observée étant bien reproduite par le modèle (Figure 4.22B).

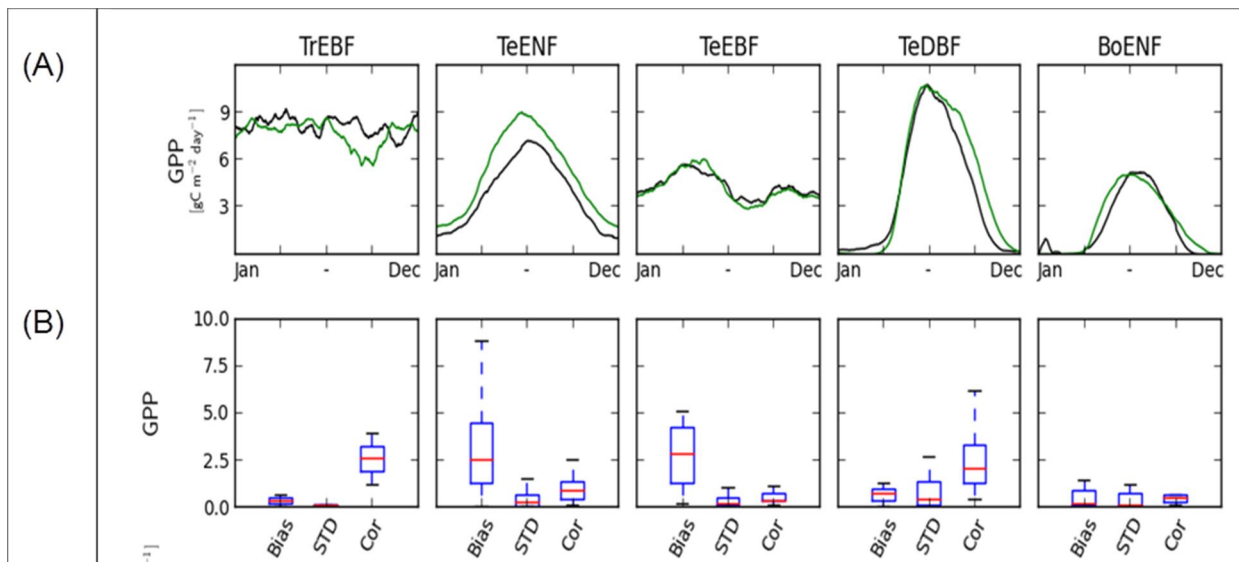


Figure 4.22 : (A) Cycle saisonnier moyen de la GPP sur un ensemble de sites et (B) répartition de l'erreur associée (biais, amplitude, corrélation)

Le couplage ou fusion des versions ORCHIDEE-GM et ORCHIDEE-CN ne pu être réalisé dans le cadre du projet AEGES, comme initialement prévu. Cette version aurait permis de bénéficier à la fois des fonctionnalités liées à l'intégration du cycle de l'azote et de celles liées à la gestion de la prairie. Cependant, pour aller dans cette direction, nous avons à étudier le flux de N_2O émis par les sols sur le site de Laqueuille à l'aide du modèle ORCHIDEE-CN ;

Une simulation de l'ORCHIDEE-CN a été réalisée sur le site de Laqueuille extensif, site sur lequel le chargement animal est faible. Dans ces conditions, le modèle ORCHIDEE-CN qui ne considère pas la gestion des prairies peut être utilisé. Le modèle a été forcé par les données météorologiques in-situ sur la période 2004-2006. Les variations de l'humidité du sol sont bien représentées par le modèle (Figure 4.23 B). Le flux de N_2O simulé par ORCHIDEE-CN (Figure 4.23 A) a une dynamique saisonnière forte, principalement pilotée par l'humidité et la température.

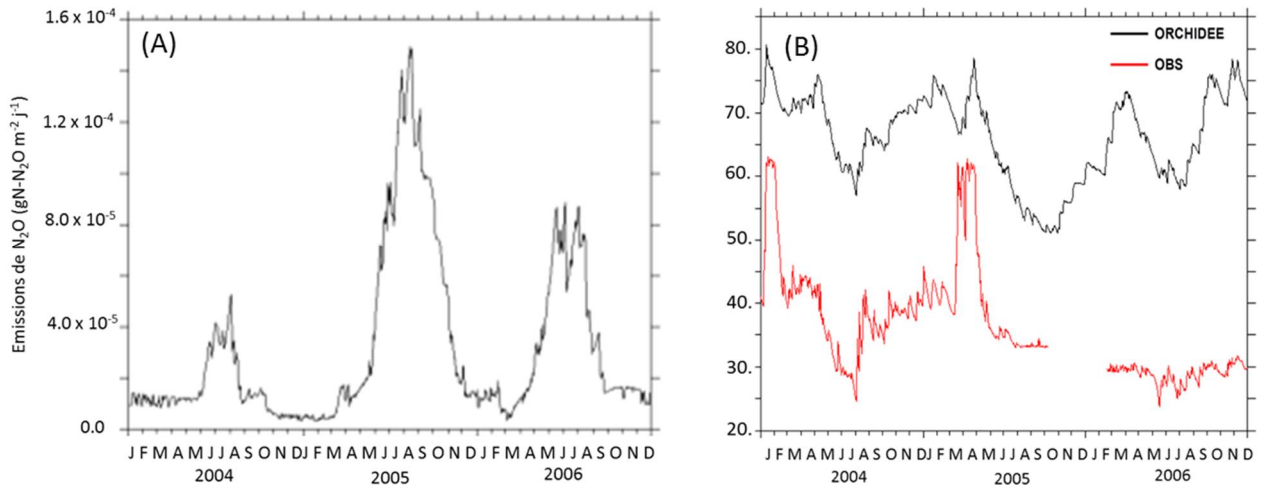


Figure 4.23 : (A) Flux de N₂O simulé par ORCHIDEE-CN sur le site de Laqueuille extensif et (B) dynamique de l'humidité relative simulée et observée

4.3.2. Nouvel outil pour simuler les rotations prairies & cultures (modèle FarmSim)

FarmSim est un modèle de simulation permettant de décrire un système mixtes de cultures, de prairies et de ruminants et de calculer les pertes résultant des cycles biogéochimiques aux différentes échelles allant de la parcelle à la région. Le modèle est issu du couplage de CERES-EGC et de PaSIM. FarmSIM est l'un des livrables d'AEGES.

4.3.2.1. Description du modèle

Dans ce modèle, les prairies et les pâturages sont simulés intérieurement par le modèle pâturages-élevage PaSim, tandis qu'une paramétrisation ultérieure et automatique du modèle de culture CERES-EGC permet de simuler la croissance des cultures, le travail du sol, l'incorporation de la biomasse et les émissions des terres arables. FarmSim a été conçu pour décrire les flux de C et d'N et pour calculer le bilan net des émissions de GES (Salètes et al., 2004) en décrivant de façon cohérente les caractéristiques et les pratiques de la ferme. La dernière version du modèle a nécessité un couplage entre les deux modèles mentionnés au niveau des paramètres internes: pools endogènes et exogènes de carbone et d'azote, état chimique et physique du sol, structure végétale et nutrition. De plus, les processus internes des deux modèles n'ont pas été modifiés car le modèle lui-même a été conçu et validé pour reproduire des environnements spécifiques. Le seul changement a été produit dans le modèle CERES-EGC afin d'homogénéiser autant que possible la dynamique des pools de carbone entre les deux modèles. En fait, selon Noirot-Cosson et al. (2016), la lignine a été directement incorporée dans le pool d'humus actif et le taux de décomposition du pool a été modifié pour prendre en compte cela. Cette modification a permis de maintenir la taille du pool d'humus actif, afin d'éviter l'accumulation de lignine et de s'aligner avec le pool lent de PaSim. On a identifié trois cas où il faut passer d'un modèle à un autre dans le cadre de FarmSim: (i) des prairies aux prairies (rénovation); ii) des prairies aux terres cultivées; (iii) des terres cultivées aux prairies. Concernant le cas de rénovation des prairies, ceci implique la simulation de la phase de prairie par PaSim, puis la main est donnée au modèle de CERES-EGC qui lui simule le retournement et le semis de la nouvelle prairie jusqu'à atteindre un LAI de 0.9 m² m⁻² pour repasser ensuite à PaSIM. Chaque passage de PaSim et CERES-EGC et vice-versa, est raité par un paramétrage interne appelé "redémarrage", comme indiqué dans la Figure 4.24.

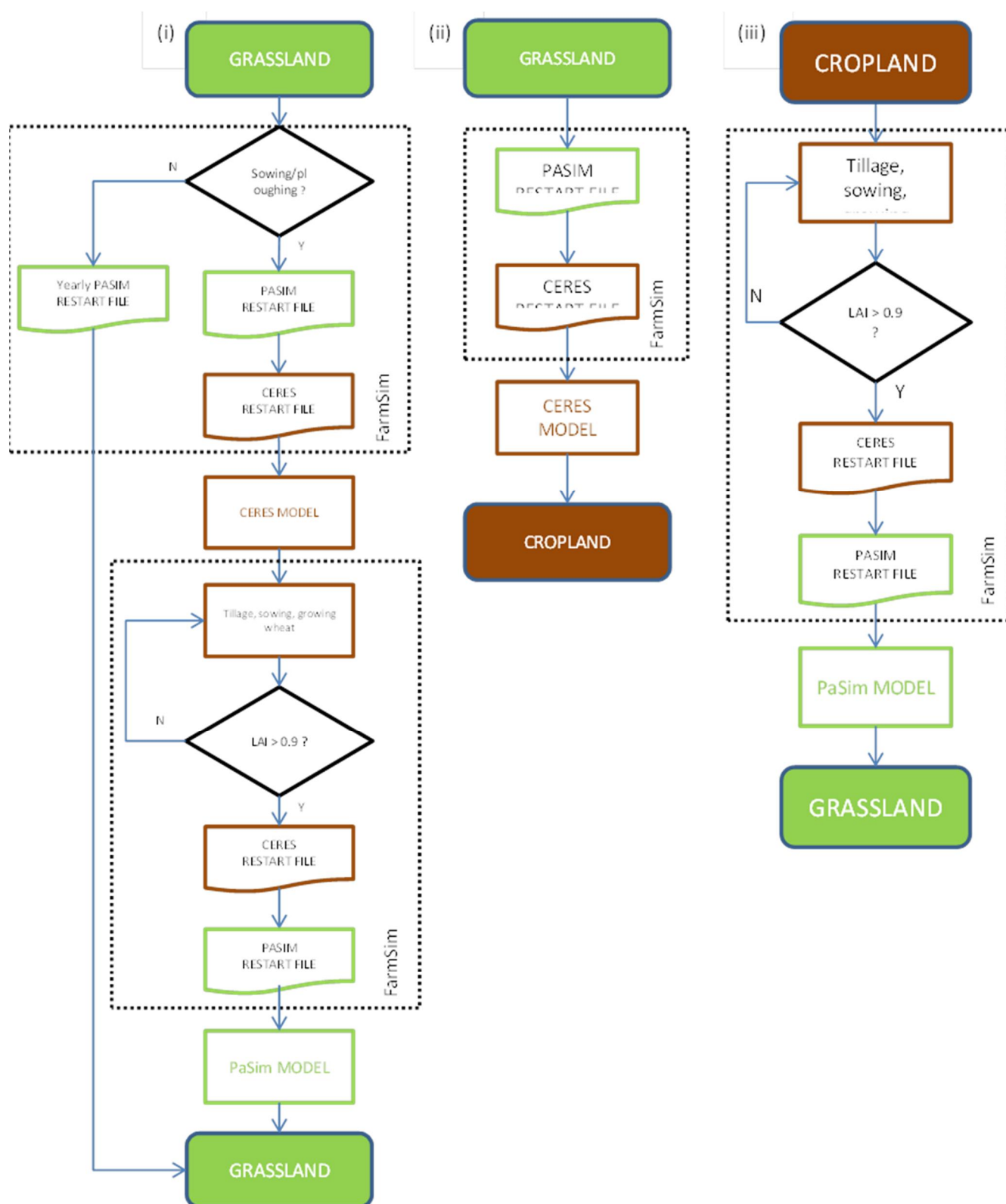


Figure 4.24 : Diagrammes de fonctionnement suivis dans le modèle FarmSim: (i) des prairies aux prairies (rénovation); (ii) des prairies aux terres cultivées; (iii) des terres cultivées aux prairies.

4.3.2.2. *Application du modèle*

Le modèle FarmSim a été appliqué et testé aux échelles locale et spatiale.

4.3.2.2.1. *Application locale*

L'application locale a été réalisée à partir des données du site expérimental situé à Lusignan (46 ° 25 'N, 0 ° 07' E, 130 m a.s.l.), Poitou-Charentes, France. Deux parcelles expérimentales de 3 ha ont été sélectionnées

pour comparer les données mesurées avec les données simulées, les prairies temporaires converties en terres cultivées (P1) et les semis de prairies temporaires (P2 ou parcelle G dans les parties précédentes voir Figure 3.1). Ces deux parcelles ont été choisies en raison de la disponibilité des mesures par chambre de N₂O et de CO₂. Comme cela est également précisé dans Senapati et al. (2014), une parcelle (P1) a été convertie en culture en mars 2011, avec une rotation de maïs d'été (*Zea mays* L.), de blé d'hiver (*Triticum* spp.) et d'orge d'hiver (*Hordeum vulgare* L.) jusqu'en février 2014. La parcelle de pâturage temporaire (P2) a été semée en 2005 et a continué avec le même traitement de tonte en herbe jusqu'en février 2014. La teneur en carbone a été évaluée en 2005 et 2014, certains échantillons d'azote minéral ont été réalisés au cours de la période 2005-2014, tandis que les échanges de CO₂ et de N₂O ont été mesurés en continu au moyen de chambres automatiques de mars 2011 à février 2014. Le rendement et la production d'herbe ont été mesurés après chaque coupe ou récolte.

La comparaison entre les données modélisées et mesurées pour la production de biomasse est présentée dans la Figure 4.25. Les quantités modélisées de biomasse sont légèrement inférieures à la fois pour les prairies et pour les cultures. Cependant, les dates de récolte, en fonction du cycle spécifique de chaque culture, étaient souvent similaires entre les données simulées et mesurées. Les émissions de protoxyde d'azote, mesurées au moyen de chambres automatiques, ont été très bien reproduites par le modèle, en particulier pour les données mesurées en 2011 (voir Figure 4.26). Cependant, pour l'année 2012, les simulations ont sous-estimé les mesures, qui présentaient en moyenne des émissions de N₂O plus élevées. Il est intéressant de noter que le modèle a été capable de reproduire avec précision les émissions de N₂O quelques semaines après les transitions herbe-culture par contre il n'a pas réussi à reproduire les émissions de N₂O induites par le renouvellement des prairies ainsi que les événements de fertilisation que nous soupçonnons être induit par l'absence de prise en compte du SOC sur les émissions de N₂O. L'effet important de la fertilisation sur les émissions de N₂O est bien connu (Munch et al., 2001, Chen et al 2008) et selon nos résultats, il semble être le principal facteur responsable des émissions de N₂O dans notre système. Il est possible d'améliorer la modélisation des émissions de N₂O en incluant certaines des caractéristiques du sol et des microbes, qui sont les principaux contrôles. En ce qui concerne le carbone organique dans le sol, nous n'avons que deux points de mesures, le premier en 2005 avant l'implantation de la prairie et le deuxième en 2014 à la fin du cycle de culture (Figure 4.27). Le modèle Farmsim semble bien pouvoir reproduire la tendance attendu en terme d'accumulation de MOS pendant le cycle prairie et la perte progressive de MOS pendant la période de culture.

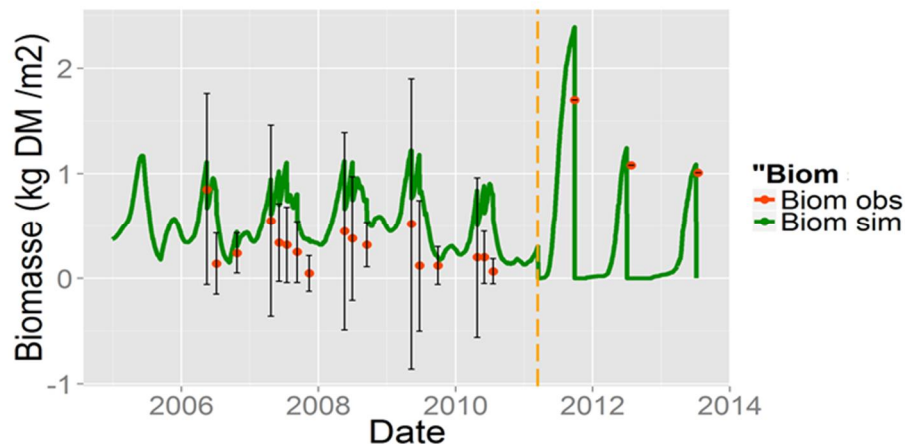


Figure 4.25 : Production de biomasses (kg DM m⁻²) dans la parcelle de Lusignan P1, données mesurées et simulées. Une barre verticale pointillée définit le passage du modèle PaSim (à gauche) au modèle CERES-EGC (à droite)

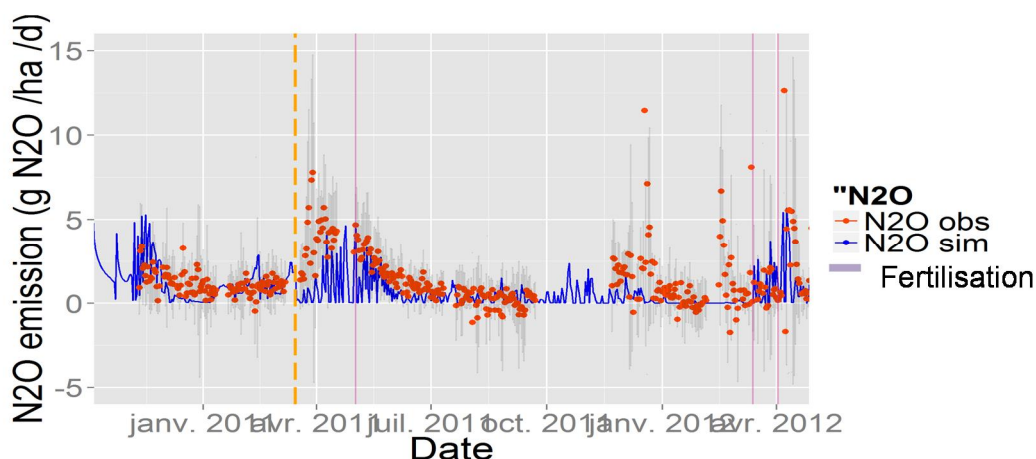


Figure 4.26 : Émissions de N₂O (g N₂O ha⁻¹ d) dans la parcelle Lusignan P1, données mesurées et simulées. Dans le tableau sont indiqués l'index statistique; Voir le texte pour plus de détails. La barre verticale orange pointillée définit le passage du modèle PaSim (gauche) et du modèle CERES-EGC (à droite)

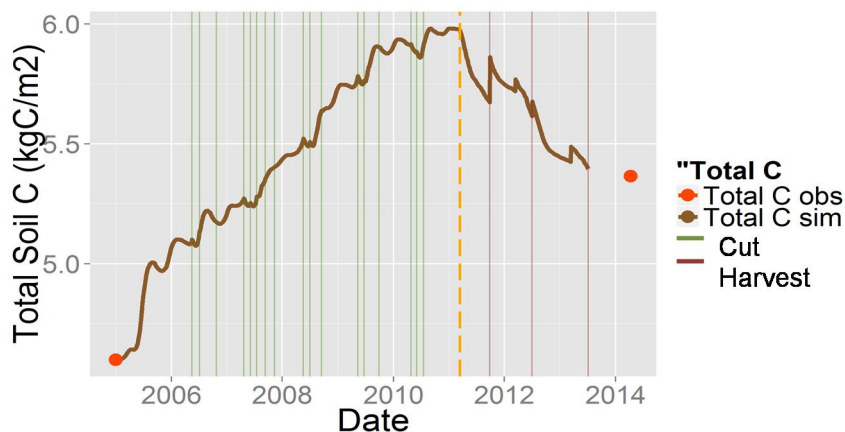


Figure 4.27 : Teneur totale en carbone du sol à 30 cm (kg C m⁻²) dans la parcelle P1 de Lusignan. Les coupes d'herbe et la date de récolte sont indiquées comme des barres verticales. Une barre verticale pointillée définit le passage du modèle PaSim (à gauche) au modèle CERES-EGC (à droite)

4.3.2.2.2. Application spatiale

L'application spatiale de FarmSim a été réalisée dans le bassin versant de Plaisir Fontaine sur le bassin de la Loue (Bourgogne Franche-Comté) tel que rapporté par Veielle, (2016). La surface était d'environ 10 km² et la carte est présentée sur la Figure 4.28. Les données météorologiques ont été obtenues pour les années de simulation 2011-2015 par interpolation entre la station météorologique standard proche de la zone d'étude, car la zone était dépourvue de sa propre station. Les caractéristiques des sols ont été obtenues à partir de la carte des sols de Besançon (Gaiffe et al., 2002) et de quelques mesures sur le terrain, décrivant cinq types de sols. Enfin, l'utilisation et la gestion des terres ont été définies sur la base d'enquêtes locales détaillées

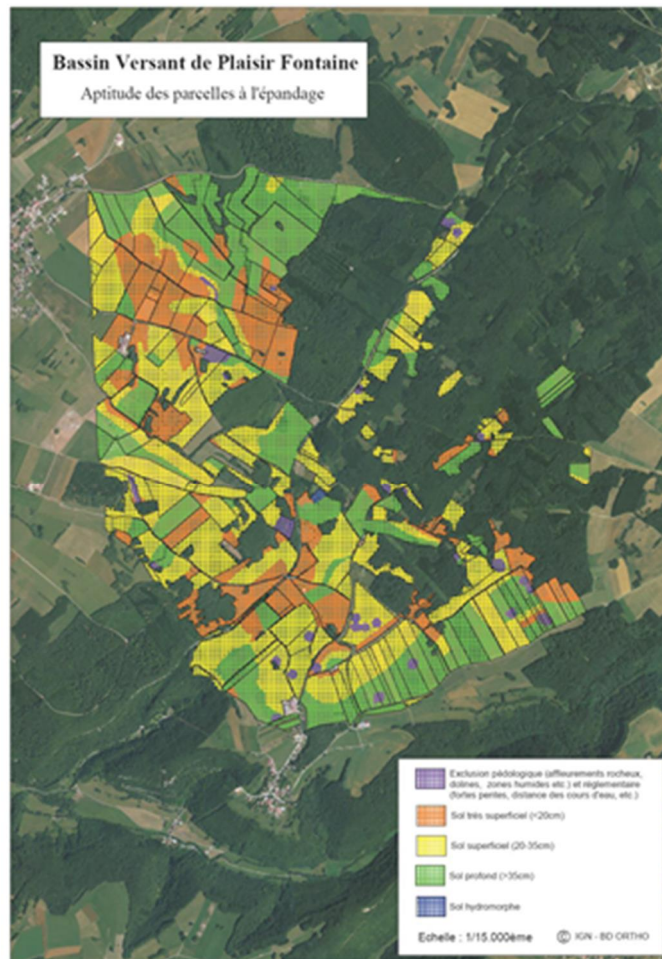


Figure 4.28 : Investigated Plots of the river basin of Plaisir Fontaine in the Loue river basin.

Le premier objectif de l'application spatiale du modèle sur le bassin versant de Plaisir Fontaine était d'évaluer la performance du modèle concernant la simulation de l'azote minéral dans les sols de cette zone. L'évaluation du modèle a été effectuée en utilisant 14 parcelles et 52 mesures sur 4 ans. Le modèle sous-estime généralement l'azote minéral à la fois sous forme de nitrates et d'ammonium. Spécifiquement pour les nitrates, le modèle sous-estime de 17% les données moyennes mesurées, avec un RMSE de $60.26 \text{ kg N ha}^{-1}$. Les performances du modèle étaient variables sur les 14 parcelles, parfois bonnes et parfois moins conformes aux données modélisées (Figure 4.29). La sous-estimation de la teneur en nitrates des sols par le modèle est une grande préoccupation, car le nitrate est un facteur majeur de contrôle des activités microbiennes responsables des émissions de N_2O . Le biais entre données simulées et observées pour cet exercice de modélisation est présenté à la Figure 4.30. En général, il est prouvé que le comportement du modèle est fonction de la couverture du sol, des paramètres spécifiques à la parcelle concernant le module NOE et de l'année de simulation. Il est intéressant de noter que le type de sol et la période de mesure ont eu une importance mineure. Par conséquent, nous suggérons que le biais de la performance du modèle est principalement lié aux différences dans les composés de la matière organique du sol, qui sont déterminés par type de végétation et les paramètres microbiens, qui peuvent être affectés par le climat variant d'année en année. La prise en compte des caractéristiques de la matière organique du sol ainsi que des communautés microbiennes responsables des émissions de N_2O dans le modèle peut donc être d'une importance majeure car elles seront représentatives des conditions environnementales.

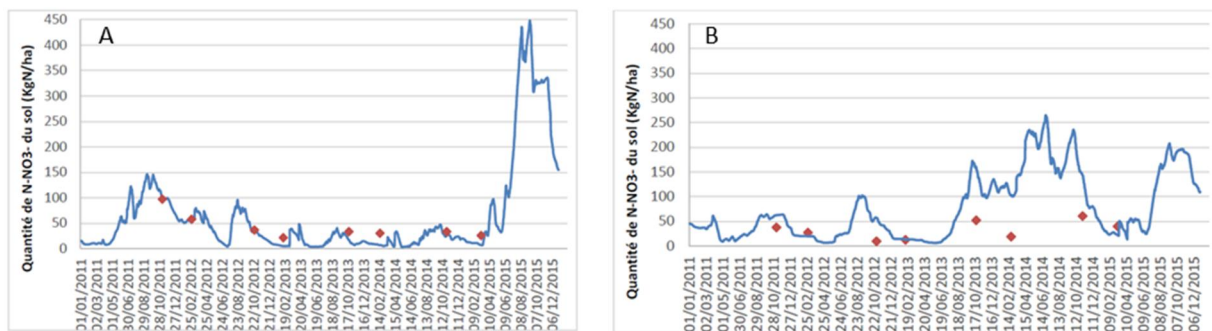


Figure 4.29 : Concentration de nitrates dans les premiers 30 cm (N-NO₃ kg N ha⁻¹) dans le bassin versant de Plaisir Fontaine durant la période 2011-2014 et relative aux parcelles avec rotation des cultures (A) et des prairies (B). En rouge sont représentées les données observées, en bleu les données simulées avec le modèle FarmSim.

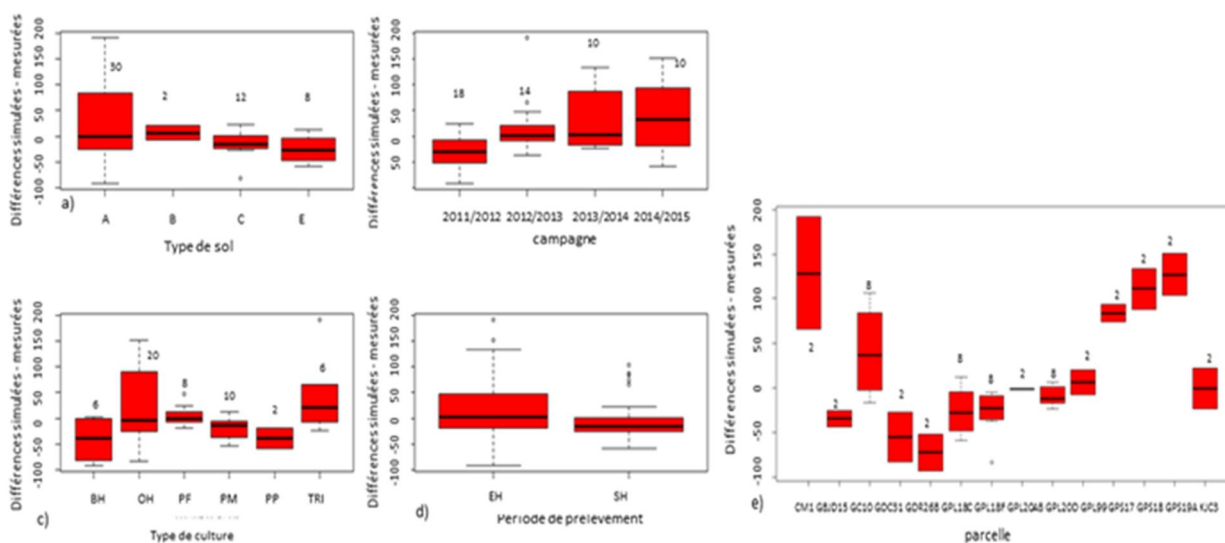


Figure 4.30 : Biais entre données simulées et observées dans les parcelles du bassin du Plaisir Fontaine qui sont en rotation entre les prairies temporaires et les cultures, selon: a) le type de sol, b) la saison de croissance des cultures, c) le type de culture ou de prairie, d) la période de prélèvement et e) les parcelles: PF est prairie fauchée, PM: prairie mixte, PP: pâturage, HE: entrée d'hiver. SH: sortie hivernale, BH: blé d'hiver, OH: orge d'hiver, TRI: triticales. Le nombre d'échantillons est indiqué au-dessus des boîtes.

Bilan

Les trois modèles utilisés dans le cadre de ce projet (PaSIM, CERES-EGC et ORCHIDEE) reproduisent bien les grandes tendances en ce qui concerne les émissions de N₂O et les cumuls annuels. Quand on regarde par contre la dynamique des flux, les simulations sont moins bonnes. Ceci est due d'une part à la sous-estimation des concentrations en nitrate dans les sols par les modèles et notamment (CERES-EGC et PaSIM) et d'autre part à la non prise en compte de l'effet des MOS sur les émissions de N₂O.

Un modèle (FarmSim) qui permet de simuler les rotations prairie-culture a été développé à partir des deux modèles CERES-EGC et PaSIM. Les premiers résultats de test de ce modèle sont assez prometteurs surtout en ce qui concerne les flux de GES et la simulation de la dynamique de la MOS du sol dans le cas d'un retournement d'une prairie de 6 ans et suite à un cycle de 3 ans de cultures. Le couplage entre la dynamique de l'azote et la matière organique du sol est aussi à améliorer dans le modèle FarmSim comme le montre la simulation sur la prairie labourée

4.4. Tâche 4 : Estimation des émissions de gaz à effet de serre par les surfaces agricoles en France

Les activités menées dans le cadre de cette tâche étaient les suivantes: 1) utiliser la spatialisation des modèles (CERES-EGC-PaSIM et ORCHIDEE) pour produire des simulations des émissions de N₂O des sols agricoles à l'échelle de la France. Cela comprend une homogénéisation des bases de données modèles, (2) la génération de cartes des émissions de gaz à effet de serre, des stocks de carbone du sol et de la production agricole pour la France, (3) proposer des recommandations aux acteurs en prenant en compte les différentes pratiques agricoles avec les différents modèles.

4.4.1. Résultats des modèles CERES-EGC et PaSIM

4.4.1.1. Emissions de N₂O par les cultures

Le modèle de culture CERES-EGC a été utilisé sur la France et les pays voisins, avec les scénarios décrits dans la section 3.4.2. Les cartes des émissions de N₂O par les cultures sont présentées dans la Figure 4.31. Les données représentent les émissions de N₂O survenues entre 2010 et 2019 et entre 2060 et 2069 en prenant en compte le changement climatique en utilisant deux scénarios climatiques du GIEC (RCP 4.5 et RCP 8.5). Les résultats des émissions par les cultures sont présentés pour la rotation principale des cultures, modélisée avec les deux scénarios climatiques, et pour le scénario irrigué et non irrigué.

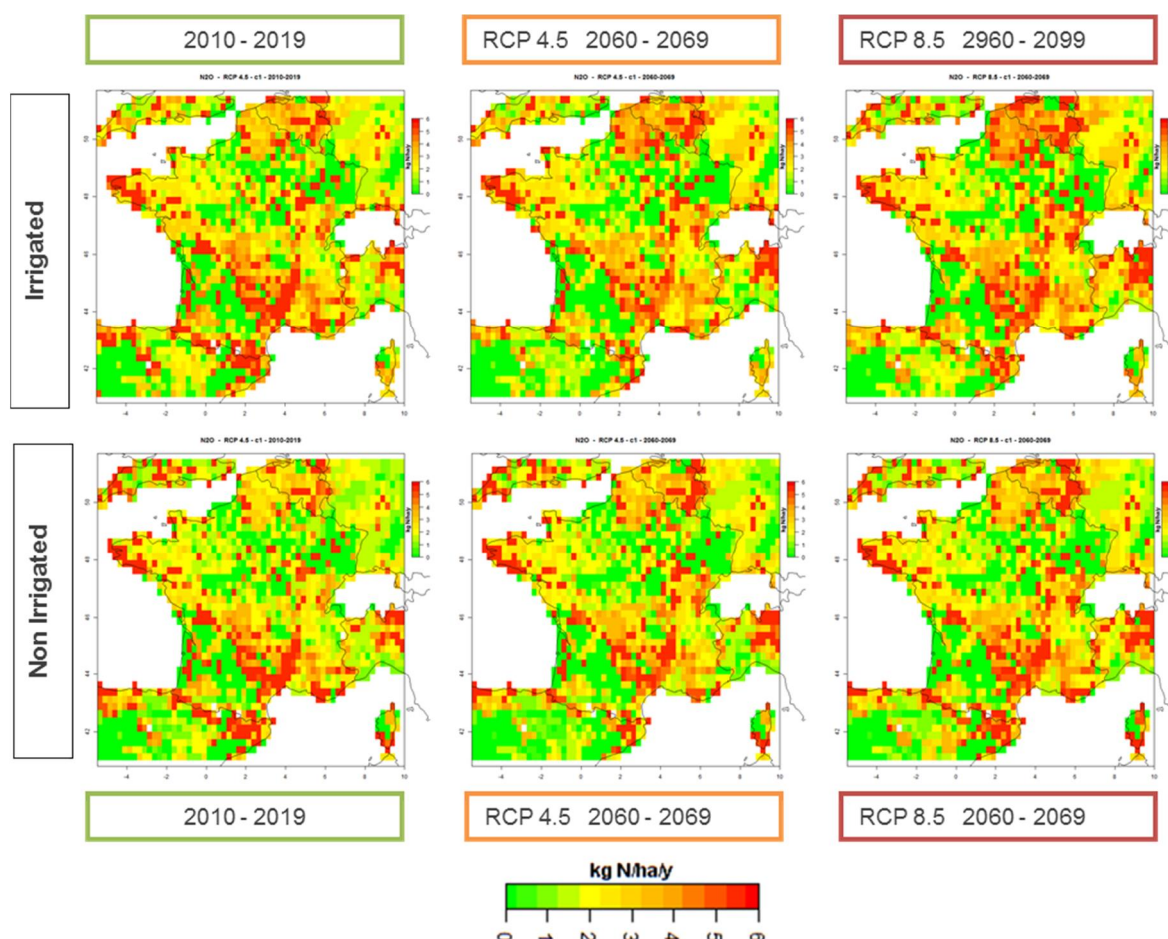


Figure 4.31: Emissions de N₂O (kg N ha⁻¹ an⁻¹) des grandes cultures en France pour les périodes 2010-2019 et 2060-2069, avec deux scénarios climatiques (RCP 4.5 et RCP 8.5) et deux scénarios de gestion (irrigués et non irrigués). En utilisant le modèle CERES-EGC; Chaque pixel représente 770 km²

Les émissions moyennes annuelles de N₂O pour les terres cultivées ont montré des différences significatives entre les deux périodes (2010-2019 et 2060-2069) et entre les deux scénarios climatiques (voir

Figure 4.32). Les résultats pour les émissions de N₂O modélisées dans les deux scénarios climatologiques de la période 2010-2019 diffèrent de 0,01% dans le scénario irrigué, avec une moyenne de 3,58 kg N ha⁻¹ y⁻¹, tandis que diffèrent de 2,2% dans le scénario non irrigué. Scénario, avec une moyenne de 3,41 kg N ha⁻¹ y⁻¹. La faible différence des émissions de N₂O entre les scénarios climatiques dans la gestion irriguée provient des données météorologiques similaires au début des scénarios climatiques et de l'irrigation automatique qui comble le déficit hydrique du sol, en fait la gestion non irriguée met en évidence un écart. Principalement en raison des différences de température entre les scénarios climatiques; La figure 62 présente les données du RCP 4.5 pour la période 2010-2019. Pour le scénario non irrigué, les deux périodes (2010-2019 et 2060-2069) ont montré en moyenne un niveau constant d'émissions de N₂O pour le scénario RCP 4.5 et une augmentation de 10% pour le scénario RCP 8.5. Dans le scénario irrigué, une augmentation des émissions de N₂O a été notée pour le RCP 8.5 pendant 2060-2069 (4,1% de plus), alors qu'une réduction de -0,6% était évidente lors de l'utilisation du scénario RCP 4.5. Un autre facteur à considérer est la rotation des cultures qui a montré que pour la deuxième rotation dominante des cultures d'émission de N₂O supérieures au RCP 8.5 par rapport à la rotation principale des cultures (42% de plus pour le scénario non irrigué et 57% pour l'irrigation). Ce fait ne semble pas lié aux charges d'azote, qui n'étaient pas différentes au cours des deux périodes et pour les deux cultures (112 et 115 kg N ha⁻¹ pour les deux rotations en 2010-2019 et 114 et 117 kg N ha⁻¹ pour les deux rotations en 2060-2069). La projection climatique jusqu'en 2099 a montré une nouvelle réduction des émissions dans le scénario RCP 4.5 pour les scénarios irrigués et non irrigués (-5% et -4% pour la rotation principale et la deuxième rotation dominante dans le scénario irrigué, -3,3% et -4% pour la rotation principale et la seconde rotation dominante dans le scénario non irrigué) et une augmentation des émissions d'environ 11% et 12% dans les scénarios irrigués et non irrigués pour le RCP 8.5. Les différences entre les rotations de cultures étaient d'environ 20-30% de la rotation principale à la deuxième rotation dominante. La Figure 4.32 indique des moyennes annuelles de N₂O pour les scénarii considérés.

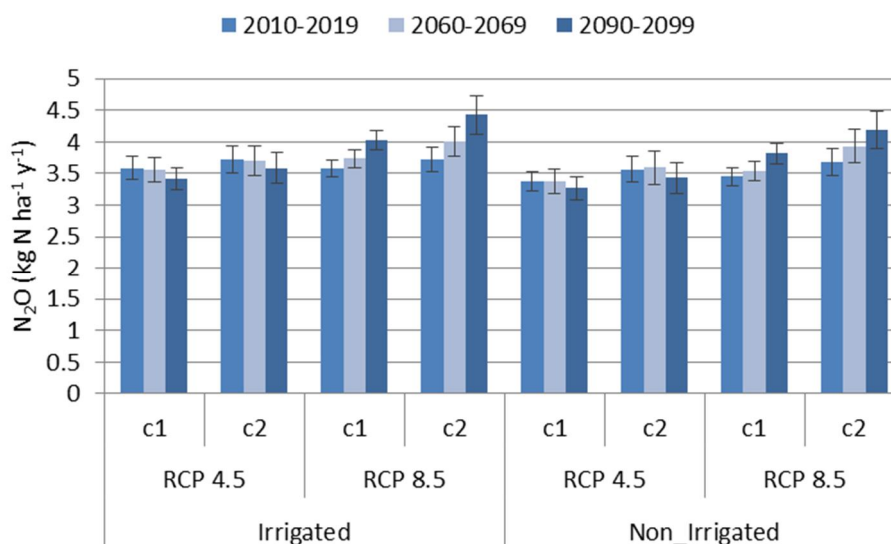


Figure 4.32 : Émissions annuelles moyennes de N₂O pour les terres cultivées au cours des périodes 2010-2019, 2060-2069, 2090-2099. Les émissions de N₂O obtenues avec les deux scénarios climatiques (RCP 4.5 et RCP 8.5), les scénarii de gestion (irrigués et non irrigués), ainsi que la rotation principale et la deuxième rotation dominante (c1 et c2, respectivement) sont rapportées. Les barres d'erreur expriment l'écart type.

Les émissions moyennes annuelles de N₂O pour les prairies ont montré des différences considérables entre la période 2010-2019 et les deux scénarios climatiques pour la période 2060-2069. Les émissions de N₂O ont été, en moyenne sur l'ensemble de la France, de 9% et 18% supérieures pour la période 2060-2069 pour les scénarii RCP 4.5 et RCP 8.5, atteignant des émissions moyennes annuelles de 18 et 19 kg N ha⁻¹ y⁻¹.

Les facteurs d'émission calculés sur les principales rotations de cultures en France sont de l'ordre de 3,4% pour la période 2010-2019, atteignant 3,7% et 3,9% pour les scénarios RCP 4,5 et 8,5 respectivement pour la période 2060- 2069.

4.4.1.2. Echange net de l'écosystème (NEE Net ecosystem exchange)

Les Figure 4.33 et Figure 4.34, représentent les cartes d'échange net des écosystèmes (NEE), respectivement pour les terres cultivées et les prairies, pour la période actuelle (2010-2019) et les années futures (2060-2069) avec les deux scénarios de changements climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5. La NEE est la différence entre le taux de production de matière organique vivante et le taux de décomposition de la matière organique morte (respiration hétérotrophe, RH).

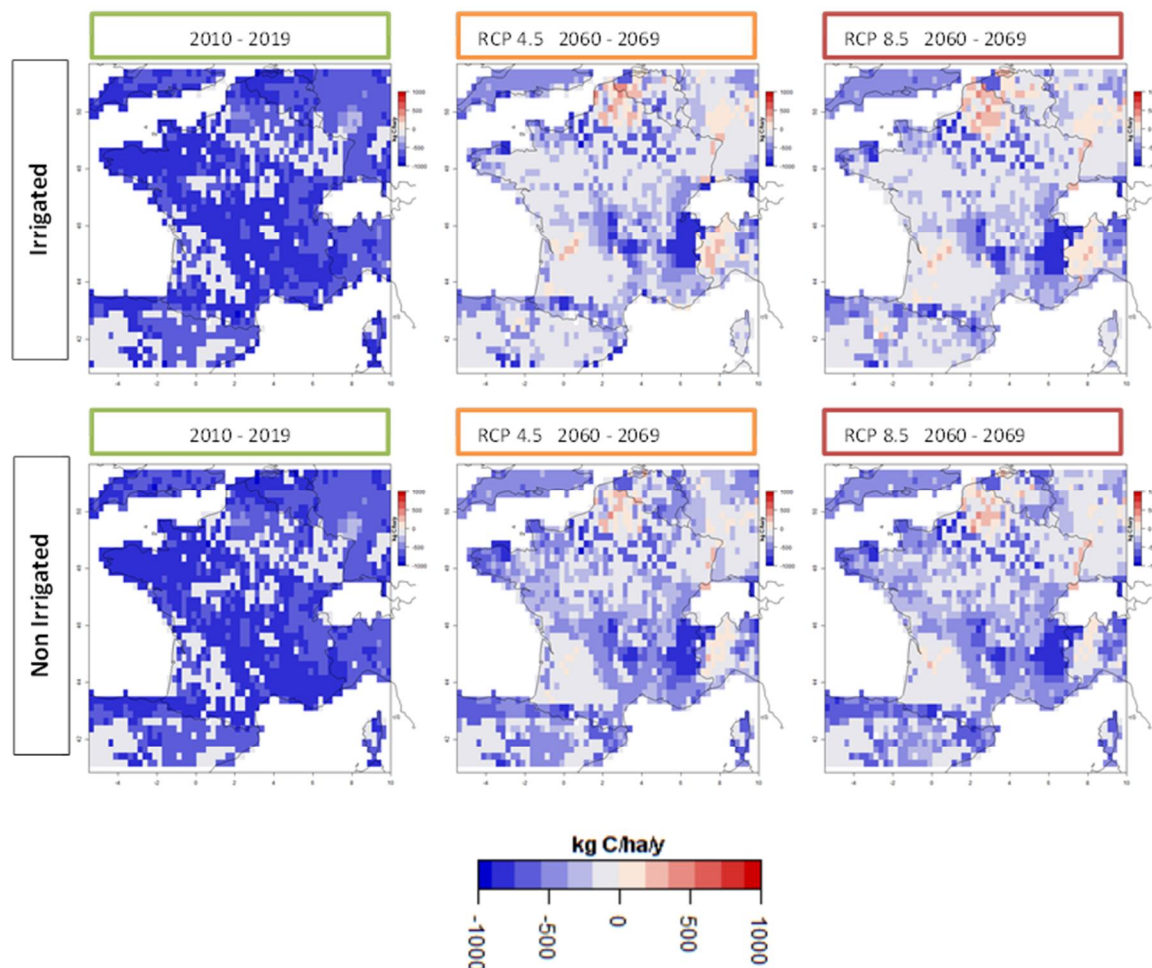


Figure 4.33 : Echange net de l'écosystème (NEE) en $\text{kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour les grandes cultures en France pour les périodes 2010-2019 et 2060-2069, avec deux scénarios climatiques (RCP 4.5 et RCP 8.5) et deux scénarios de gestion (irrigués et non Irrigué); Chaque pixel est de 770 km^2 . Les valeurs négatives indiquent un stockage de carbone.

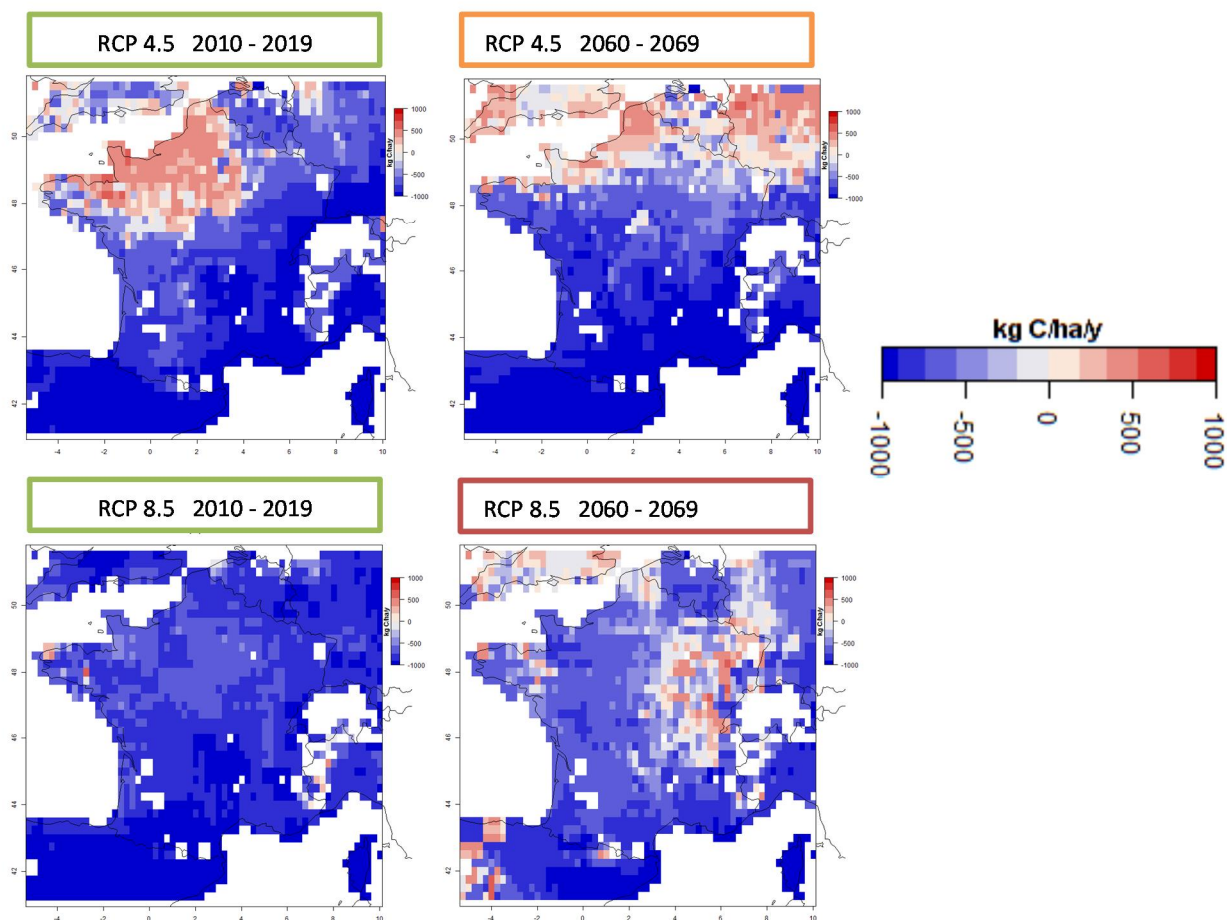


Figure 4.34 : Echange net de l'écosystème (NEE) en $\text{kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ pour les prairies en France pour les périodes 2010-2019 et 2060-2069, avec deux scénarios climatiques (RCP 4.5 et RCP 8.5); Chaque pixel est de 770 km^2 . Les valeurs négatives indiquent un stockage de carbone.

La moyenne annuelle de NEE ($\text{kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$) pour les terres cultivées pendant la période 2010-2019 a été similaire sur les deux scénarios de climat et d'irrigation, ainsi qu'entre les deux périodes de rotation (allant de -230 à $-220 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$). Pendant la période de 2060-2069, la NEE a augmenté d'environ 70% (de -71 à $-52 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$), tandis qu'on a simulé moins de stockage de carbone pour la période 2090-2099 (80% en moyenne). Aucune différence significative n'a été observée au cours de ces périodes entre les deux rotations considérées, tandis que le scénario climatique RCP 4.5 rapporte 10% de plus de NEE pour la période 2090-2099, comparé au RCP 8.5. Aucune variation significative n'a été observée pour le scénario d'irrigation, même si les cultures irriguées se sont révélées légèrement moins efficaces pour stocker le carbone dans l'écosystème probablement due au fait que l'irrigation a favorisé la minéralisation sans que cela soit totalement compensé par le maintien de rapports de résidus végétaux. La Figure 4.35 présente la NEE moyenne annuelle pour le scénario considéré sur trois périodes.

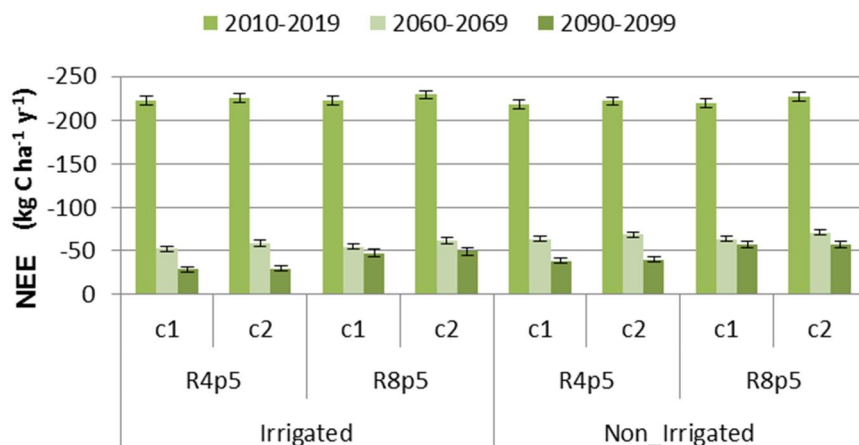


Figure 4.35 : Moyenne annuelle du NEE pour les terres cultivées au cours des périodes 2010-2019, 2060-2069 et 2090-2099 pour les deux scénarios climatiques (RCP 4.5 et RCP 8.5), le scénario de gestion (irrigué et non irrigué), ainsi que la rotation principale et la deuxième rotation dominante (c1 et c2, respectivement).

La NEE moyenne annuelle pour les prairies est dans les mêmes ordres de grandeurs que pour les cultures (Figure 4.34). Il y a des différences significatives entre les différentes périodes de simulations de plus de 30% pour le scénario RCP 8.5, comme le montre la Figure 4.36. Au cours de la période observée suivante, 2060-2069, il y a un soit une augmentation de 32% de la NEE pour le scénario RCP 4.5, alors qu'une réduction de 60% est survenue dans le scénario RCP 8.5. La décennie 2090-2099 a montré une réduction substantielle pour les deux scénarios climatiques (60% dans le PCR 4.5 et 85% dans le PCR 8.5). On réduit donc le puits de carbone, ceci d'autant plus que le scénario de réchauffement est fort.

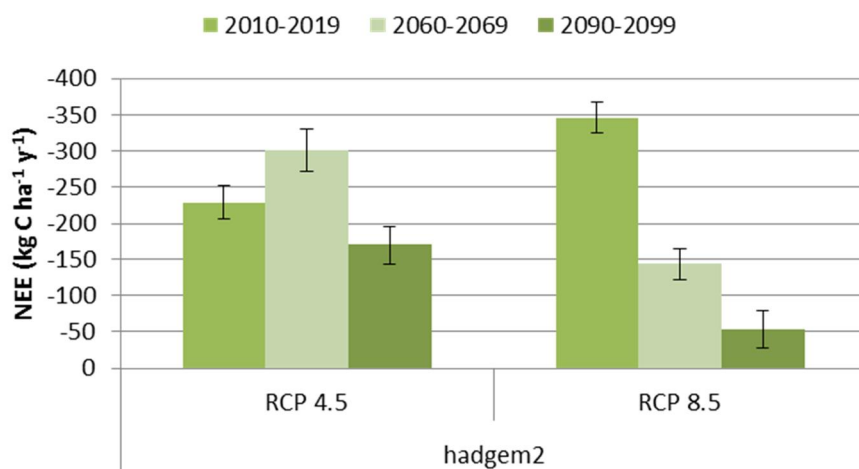


Figure 4.36 : Moyenne annuelle du NEE pour les prairies en France au cours des périodes 2010-2019, 2060-2069 et 2090-2099 pour les deux scénarios climatiques (RCP 4.5 et RCP 8.5),

4.4.1.3. Effets sur la croissance de cultures et la productivité des prairies

Les effets des scénarios climatiques et de gestion sur les rendements des cultures et la biomasse des prairies sont présentés respectivement dans les Figure 4.37 et Figure 4.38. A partir de ces chiffres, une réduction substantielle des productions est perceptible à partir de 2050, en particulier pour le scénario RCP 8.5, à la fois pour les prairies et les terres cultivées, tandis que pour le scénario RCP 4.5 le changement est modéré, en particulier pour les terres cultivées. En ce qui concerne les cultures, avant le seuil de 2050, il y a une augmentation sensible des productions, beaucoup plus évident pour le scénario irrigué que le non irrigué. Le scénario RCP 4.5 souligne également une légère augmentation de la production à partir de 2050 dans les prairies.

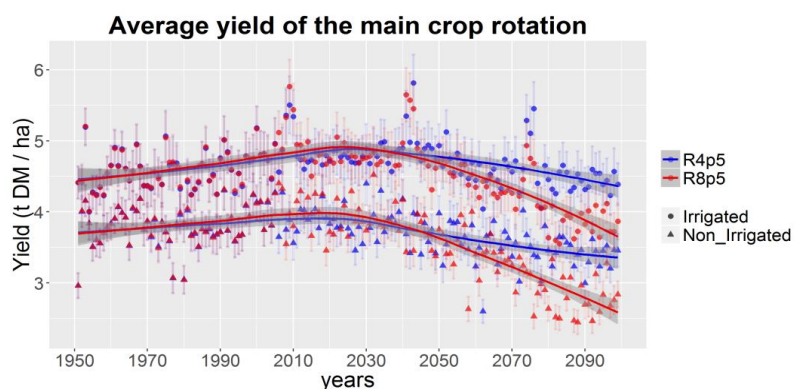


Figure 4.37 : Rendement moyen (t DM ha⁻¹) des principales rotations de cultures en France sur deux scénarios climatiques (RCP 4.5 et RCP 8.5) et scénarios d'irrigation. L'ombre grise est l'intervalle de confiance, tandis que les lignes représentent la moyenne; L'écart-type est indiqué pour toutes les données annuelles

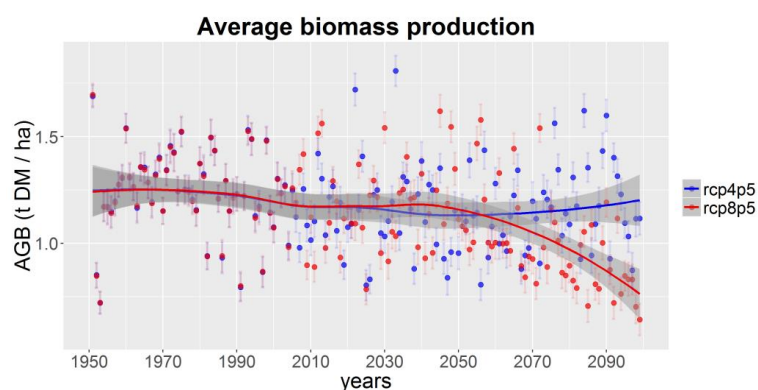


Figure 4.38 : Production moyenne de biomasse (t DM ha⁻¹) pour les prairies en France avec deux scénarios climatiques (RCP 4.5 et RCP 8.5). L'ombre grise est l'intervalle de confiance, tandis que les lignes représentent la moyenne; L'écart-type est indiqué pour toutes les données annuelles

Un effet spécifique très intéressant sur la variation des rendements des cultures est évident sur la modification de la date de récolte dans le temps et sur le besoin d'irrigation pour soutenir les cultures. Dans la Figure 4.39, on présente le cas du maïs-grain, où les conditions décrites ci-dessus concernant la tendance des rendements sont les mêmes, tandis que la date de récolte indique une réduction substantielle du cycle végétal, plus évidente dans le scénario RCP 8.5. Le besoin d'irrigation des cultures, en ce qui concerne le territoire national français, apporte ses bénéfices surtout à partir de 2050, en maintenant fortement les rendements. Ce résultat suggère que les variétés utilisées doivent être améliorées pour des saisons de croissance plus longues et une meilleure résistance à la sécheresse.

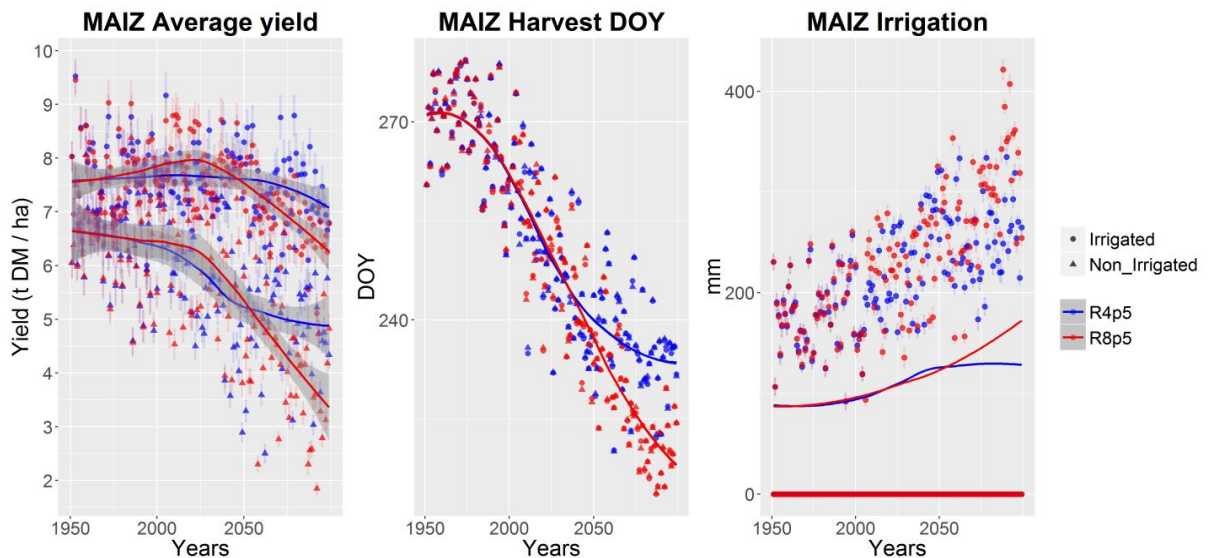


Figure 4.39 : Le rendement moyen du maïs en France (t DM ha⁻¹), la date de récolte (DOY est le jour julien) et le besoin d'irrigation sur deux scénarios climatiques (RCP 4.5 et RCP 8.5) et scénario de gestion (irrigué et non irrigué). L'ombre grise est l'intervalle de confiance, tandis que les lignes représentent la moyenne; L'écart-type est indiqué pour toutes les données annuelles.

4.4.2. Résultats du modèle ORCHIDEE

On a utilisé le modèle ORCHIDEE-GM et une paramétrisation type-IPCC des émissions de N₂O afin de quantifier le bilan de GES (CO₂+CH₄+N₂O) des prairies européennes, à l'aide du.

Le bilan des gaz à effet de serre (CO₂, CH₄ et N₂O) des prairies européennes a été estimé au moyen du nouveau modèle biogéochimique ORCHIDEE-GM sur la période 1961-2010 (Chang et al., 2015). Le modèle comprend: (1) une information spatiale du type et de l'intensité de la gestion; (2) la simulation du bilan carbone à l'échelle des écosystèmes et des exploitations; et (3) la simulation des émissions de N₂O et de CH₄ par les sols et les ruminants respectivement. Le modèle est forcé par le changement du chargement animal, la fertilisation et le dépôt d'azote, le changement d'affectation des terres, l'évolution de la concentration atmosphérique en CO₂ et du climat. À l'aide de cette simulation, on estime que le bilan carbone des prairies européennes (NEP) est un puits net de 15±7 g C m⁻² an⁻¹ sur la période 1961-2010. À l'échelle de la ferme, qui comprend à la fois les flux de CO₂ des écosystèmes et les émissions de CO₂ provenant de la digestion du fourrage récolté, le bilan de C net (NBP) est divisé par deux, pour atteindre une valeur de 8 g C m⁻². En ajoutant les émissions de CH₄ et de N₂O aux échanges nets des écosystèmes pour définir l'équilibre des GES à l'échelle de l'écosystème, nous avons constaté que les prairies demeurent un puits net de GHG de 19 g C-CO₂ équivalent m⁻² an⁻¹, parce que le puits de CO₂ compense les émissions de N₂O et de CH₄. Toutefois, lorsque l'on considère l'échelle de la ferme, le bilan des GES (NGB) devient une source nette de GES de 50 g d'équivalent C-CO₂ m⁻² an⁻¹. ORCHIDEE-GM simule une augmentation de la NBP des prairies européennes au cours des cinq dernières décennies, augmentation qui reflète l'augmentation de la production primaire nette due au CO₂, au climat et à la fertilisation azotée et la diminution de la demande de fourrages liée à la réduction du cheptel animal en Europe (Figure 4.40).

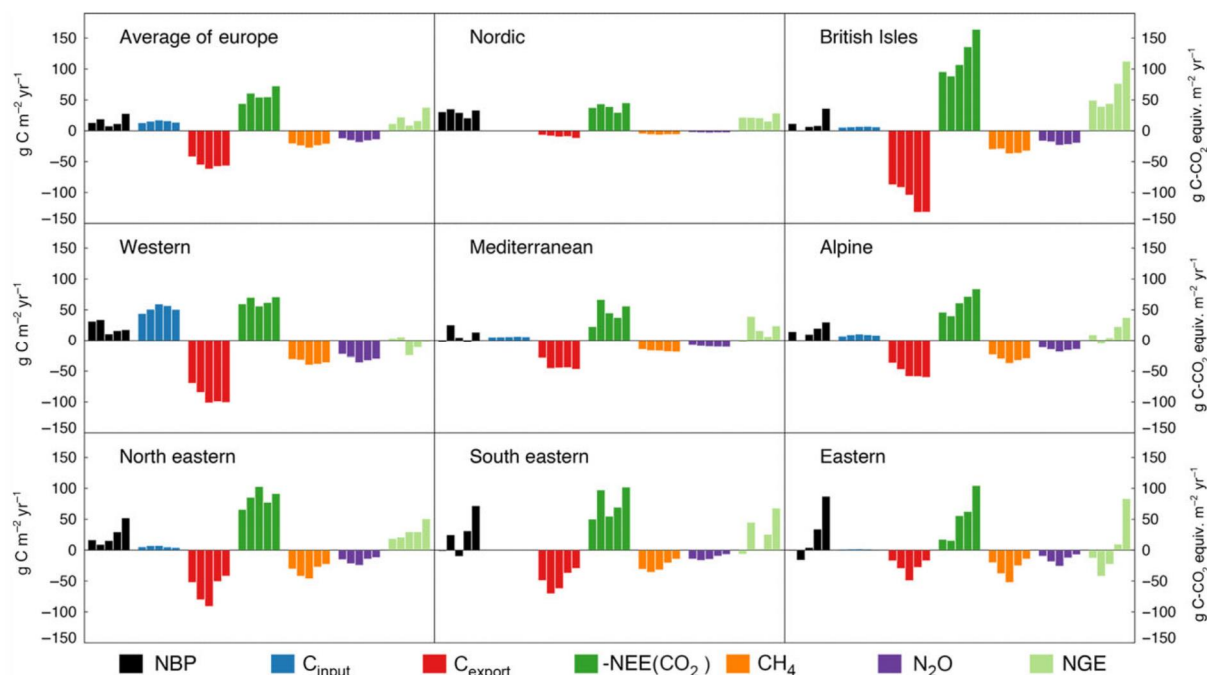


Figure 4.40 : NBP, NGE et leurs composantes par grandes régions agricoles au cours des cinq dernières décennies. Les valeurs de chaque composante sont des moyennes sur 10 ans pour, de gauche à droite, 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000 et 2001-2010. NBP: Net Biome Productivity ($\text{g C m}^{-2} \text{an}^{-1}$); Cinput (bleu): le C entrant dans le système par application de lisier ($\text{g C m}^{-2} \text{an}^{-1}$); Cexport (rouge): le C perdu par le système à travers la biomasse récoltée, et l'émission de CH_4 par les animaux au pâturage ($\text{g C m}^{-2} \text{an}^{-1}$); NGE: l'échange net de GES de l'écosystème prairial exprimé comme potentiel de réchauffement global ($\text{g C-CO}_2 \text{équivalent m}^{-2} \text{an}^{-1}$), y compris les flux de CO_2 (vert foncé), CH_4 (orange) et N_2O (pourpre). Les valeurs de NBP et NGE positives indiquent des puits nets de C et de GHG, respectivement. Les valeurs négatives des flux de CH_4 et de N_2O indiquent que l'écosystème prairial est une source de CH_4 et de N_2O .

Bilan

Nous avons produit à l'aide des modèles CERES-EGC, PaSIM et ORCHIDEE des cartes d'émissions de GES pour la France. Les ordres de grandeurs simulés sont satisfaisants et les facteurs d'émissions calculés sont de l'ordre de 1 à 3 % selon les scénarios étudiés.

Nous constatons une augmentation des émissions de N_2O avec les scénarios climatiques futurs tandis que pour les échanges de carbone, nous remarquons que pour les cultures on est sur une tendance à une diminution forte du puits de carbone en lien avec l'augmentation des températures, tendance qui serait renforcée par un développement de l'irrigation. Cela peut complexifier l'objectif 4 pour mille. Tandis que pour les prairies, elles pourraient bénéficier d'un stockage de carbone accru pour un réchauffement modéré (RCP 4.5 à horizon 2060) mais en ce qui concerne les autres scénarios et horizons on est aussi dans une tendance à la réduction du puits.

5. Recommandations

Les prairies sont des systèmes d'utilisation des terres, favorisant le stockage du C dans les sols sous forme des MOS. La capacité à stocker du C dans les sols prairiaux dépend des modes de gestion : pâturage, fauche, durée, fertilisation. Toutefois l'effet des pratiques sur les matières organiques du sol est assez long à observer avec les méthodes actuelles. Les résultats de ce projet nous amènent à formuler plusieurs recommandations adressées d'une part à la recherche et d'autre part aux acteurs.

5.1. Recherche

La première recommandation qui se dégage de nos résultats est la nécessité de travailler sur des expérimentations de longue durée afin de déterminer l'effet des pratiques agricoles sur le fonctionnement des agroécosystèmes. Les résultats de notre projet suggèrent :

- que les modes de gestion de prairies impactent le stockage de C, la nature des MOS et l'activité des micro-organismes dans l'horizon A du sol.
- L'effet de l'implantation des prairies perdure pour un minimum de trois ans après une mise en culture.
- On observe des arrières effets positifs sur les rendements des cultures.

Il faut continuer à améliorer la modélisation des émissions de N_2O , notamment en ce qui concerne la prise en compte par ceux-ci de la diversité des matières organiques et du fonctionnement des micro-organismes du sol, car les modèles sont peu fiables à présent. Nos résultats suggèrent qu'il est nécessaire de prendre en compte les micro-organismes impliqués dans le cycle de l'azote ainsi que les caractéristiques des MOS.

Nous avons également besoin de réfléchir sur l'adaptation de la gestion des prairies au changement climatique, qui aura, au vu de nos résultats, un effet sur leur répartition, ainsi que leur fonctionnement.

Il est nécessaire de valoriser les prairies, car elles rendent une multitude des services écosystémiques. Toutefois, leur gestion nécessite d'être optimisée. Plus de travaux sont nécessaires pour comprendre en détail ces interactions. Il est également nécessaire d'associer la modélisation à l'expérimentation afin d'arriver à bien expliquer le fonctionnement des écosystèmes et leur trajectoire.

5.2. Acteurs

Les prairies temporaires ont le potentiel de répondre à un certain nombre de problématiques environnementales et cela sans réduire la productivité agricole des systèmes. Nous recommandons donc, qu'une prairie temporaire soit installée au moins 6 ans pour profiter de ces arrières effets positifs en ce qui concerne le stockage des MOS ainsi que sur leur qualité. Toutefois, les sols de prairie sont également plus susceptibles à émettre du N_2O comparée aux sols sous culture. La gestion des prairies temporaires induit des arrières effets sur ce potentiel.

Dans les prairies fauchées la fertilisation azotée est nécessaire pour assurer les rendements, le stockage du C. Ce stockage se fera dans les prairies temporaires de courte durée essentiellement dans les premiers centimètres des sols. Cette fertilisation a néanmoins un coût financier et environnemental, car elle induit des émissions de N_2O . Nous recommandons d'optimiser la gestion des prairies afin de trouver un compromis entre émissions de GES, rendements et stockage du C. De plus, l'utilisation des légumineuses pourrait être une possibilité de contrebalancer ces effets négatifs.

Le changement climatique affecte les émissions des GES. La modélisation montre, que celles-ci s'intensifieront selon le scénario climatique choisi. L'effet des changements climatiques sur plusieurs paramètres est observable dès maintenant. Une adaptation des pratiques agricoles et le recours à certain moyen productif (systèmes d'irrigation) et/ou une amélioration génétique des cultures et/ou le déplacement géographique des filières devrait être envisagé.

6. Conclusions et Perspectives

Le projet AEGES avait pour objectif d'étudier l'impact des différents modes de gestion de prairies sur les émissions de gaz à effet de serre et le stockage du C dans les sols sous prairies permanentes et temporaires. En particulier, nous avons pour objectif de comprendre l'effet de l'introduction des prairies temporaires dans le cycle des cultures. Nous avons abordé ces objectifs par la combinaison originale de méthodes expérimentales et de la modélisation. Ainsi, nous avons couplé les analyses (1) des MOS et (2) des micro-organismes avec celles (3) des flux de GES. Nos résultats montrent qu'il y a des arrière effets des modes de gestion des prairies temporaires sur ces trois paramètres. A partir de ces mesures, nous avons pu proposer un modèle conceptuel suggérant que les nitrifiants jouent un rôle non négligeable dans l'émission du N₂O sous certaines conditions climatiques et que leur activité est influencée par la disponibilité d'une MOS fraîche ainsi que par la teneur en eau des sols.

Nous avons tenté de faire un bilan de GES à partir des différents résultats du projet AEGES pour les modalités du SOERE ACBB à Lusignan afin de pouvoir formuler des recommandations sur la gestion des rotations prairies . cultures et leurs durées. Le calcul des bilans cumulés de GES en équivalent CO₂ par m² de surface et moyennés sur une année sont données dans le Tableau 6.1. On remarque une disparité dans les résultats entre les différentes méthodes utilisées. Une explication partielle de cette différence peut être les différentes échelles spatiales à laquelle les mesures ont été effectuées. Toutefois, concernant le stockage du C, il semble, que les tendances générales (G>TG6>TG3) soit les mêmes, indiquant, que la durée de prairie temporaire a une influence sur le stockage du C et la fertilisation sur l'émission des GES.

Tableau 6.1 : Bilans moyennés annuels en g équivalent CO₂ des différentes rotations du site SOERE ACBB de Lusignan selon les différentes méthodes de mesures ou de calculs utilisées dans le cadre du projet AEGES

g C m-2	Bilan annuelle à partir de la modélisation (2005-2014)	Bilan annuelle à partir de l'extrapolation des mesures de chambres (42 jours de mesures) (2014)	Bilan annuelle à partir des mesures de tour a flux (2005 - 2013)	Bilan annuelle à partir des mesures de C du sol (2005 – 2014) 0-30cm	Bilan annuelle à partir de la modélisation des stocks de C dans le sol (2005 – 2014)
	Emissions de N ₂ O		Stockage de carbone		
G convertie en Cr	-	122.1	-	-	-
G	605.9	109.6	142.3 ¹	1930.1	402.6
TG6N-		32.0	-	1654.4	-
TG3N+	439.3	113.6	-	1066.2	51.8
TG6N+	721.7	111.4	128.0 ¹	1654.4	251.1
Cr	-	48	--	514.7	-

¹ Senapati et al. 2014

Nos résultats montrent qu'afin de choisir le mode de gestion de prairie le plus adapté, il faut prendre en compte tous les services écosystémiques des prairies. Ainsi, nous avons quantifié les autres services et disservices que peuvent engendrer les rotations de prairies . cultures en fonction de leur durée. Les résultats sont présentés dans le tableau 6.2. Notamment, l'introduction des prairies augmente le stockage du C dans les sols, mais également l'émission de N₂O du a une fertilisation importante et aussi à la présence des MOS facilement dégradables, qui favorise une activité microbienne. Ainsi, il est nécessaire de formuler des recommandations en se basant sur la connaissance de tous les services et disservices du mode de gestion appliqué. Un compromis sera nécessaire afin d'optimiser la gestion des prairie en ce qui concerne les services écosystémiques qu'elles peuvent fournir.

Tableau 6.2 : Analyse qualitatif des avantages et inconvénients des différentes durées de prairies et cultures

	G	TG3N+	TG6N+	TG6N-	Cr	Reference
Biodiversité	+++	+	++	++	-	
Stockage de C dans les sols (0-15 cm)	+++	++	+	-	-	AEGES
Stockage additionnel de C dans les sols (0-30 cm)	++++	++	+++	+++	+	AEGES
Emissions de N₂O	+++	++	++	+	+	AEGES (voir Tableau 6.1)
Lessivage de NO₃	-	++	+	-	+++	Kunrath et al. 2014
Rendements	+	+	++	-	+	AEGES

L'évaluation des modèles montre que ces derniers ne sont pas encore en mesure de reproduire correctement les émissions de N₂O. Nous avons développé un modèle couplé pour pouvoir modéliser le fonctionnement des prairies temporaires. Le modèle couplé arrive à reproduire correctement une grande partie des paramètres du sol (e.g. humidité, stockage du C, émissions de CO₂). La modélisation fiable des émissions de N₂O nécessitera (1) une amélioration des résultats de mesures et (2) une amélioration de la compréhension des processus régissant ces flux surtout en ce qui concerne la prise en compte des effets du carbone du sol. En perspective nous continuerons à travailler sur l'incorporation de certains paramètres concernant les caractéristiques des micro-organismes et des MOS dans les modèles pour améliorer leur capacité prédictive concernant les flux de N₂O. Le modèle conceptuel, que nous avons proposé pourrait aussi être appliqué à terme sur d'autres pratiques agricoles, où on pourrait proposer des solutions d'atténuation des émissions de GES tel que la gestion des résidus en grandes cultures.

Références bibliographiques

- Baudoin, E., Couillerot, O., Spaepen, S., Moenne-Loccoz, Y. and Nazaret, S. (2009) Applicability of the 16S-23S rDNA internal spacer for PCR detection of the phytostimulatory PGPR inoculant *Azospirillum lipoferum* CRT1 in field soil. *J Appl Microbiol.* 108, 25. 38.
- Brookes PC, Landman A, Pruden G, Jenkinson DS (1985) Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biol Biochem* 17:837. 842. doi: 10.1016/0038-0717(85)90144-0
- Calanca, P., Vuichard, N., Campbell, C., Viovy, N., Cozic, A., Fuhrera, J., Soussana, J.-F., 2007. Simulating the fluxes of CO₂ and N₂O in European grasslands with the Pasture Simulation Model (PaSim). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121, 164. 174.
- Chang, J., Ciais, P., Viovy, N., Vuichard, N., Sultan, B., Soussana, J.F., 2015. The greenhouse gas balance of European grasslands. *Glob. Chang. Biol.* 21, 3748. 3761. doi:10.1111/gcb.12998
- Chang, J., Viovy, N., Vuichard, N., Ciais, P., Wang, T., Cozic, a., Lardy, R., Graux, A., Klumpp, K., Martin, R., Soussana, J.-F., 2013. Incorporating grassland management in a global vegetation model: model description and evaluation at 11 eddy-covariance sites in Europe. *Geosci. Model Dev. Discuss.* 6, 2769. 2812. doi:10.5194/gmdd-6-2769-2013
- Chen, D., Li, Y., Grace, P., Mosier, A.R., 2008. N₂O emissions from agricultural lands: a synthesis of simulation approaches. *Plant and Soil*, 309, 169. 189.
- Gabrielle, B., Denoroy, P., Gosse, G., Justes, E., Andersen, M.N., 1998. Development and evaluation of CERES-type model for winter oilseed rape. *Field Crops Research*, 57, 95-111.
- Gabrielle, B, Da-Silveira, J., Houot, S., Michelin, J., 2005. Field-scale modelling of carbon and nitrogen dynamics in soils amended with urban waste composts. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 110, 289-299.
- Gervois, S., de Noblet-Ducoudré, N., Viovy, N., Ciais, P., Brisson, N., Seguin, B., Perrier, A., 2004. Including Croplands in a Global Biosphere Model: Methodology and Evaluation at Specific Sites. *Earth Interact.* 8, 1. 25. doi:10.1175/1087-3562(2004)8<1:ICIAGB>2.0.CO;2
- GIEC (2007) Climate Change, the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.: in: , edited by: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 996.
- Graux, A.-I., Lardy, R., Bellocchi, G., Soussana, J.-F., Global warming potential of French grassland-based dairy livestock systems under climate change. *Regional and Environmental Change*, doi:10.1007/s10113-012-0289-2, 2012
- Hedges JI, Ertel JR (1982) Characterization of lignin by gas capillary chromatography of cupric oxide oxidation products. *Anal Chem* 54:174. 178. doi: 10.1021/ac00239a007
- Henault, C., Bizouard, F., Laville, P., Gabrielle, B., Nicoulaud, B., Germon, J.C., Cellier, P. (2005). Predicting in situ soil N₂O emission using NOE algorithm and soil database. *Global Change Biology* 11, 115-127
- Ivanoff DB, Reddy KR, Robinson S (1998) chemical fractionation of organic phosphorus in selected histosols1. *Soil Sci* 163:36. 45.
- Jeuffroy, M.H., Baranger, E., Carrou, B., de Chezelles, E., Gosme, M., Henault, C., Schneider, A., and Cellier, P., 2013. Nitrous oxide emissions from crop rotations including wheat, oilseed rape and dry peas. *Biogeosciences*, 10, 10, 1787. 1797.
- Jones, C.A., Kiniry, J.R., (1986). *Ceres-N Maize: a simulation model of maize growth and development*. Temple, TX.
- Kogel I, Bochter R (1985) Characterization of lignin in forest humus layers by high-performance liquid chromatography of cupric oxide oxidation products. *Soil Biol Biochem* 17:637. 640. doi: 10.1016/0038-0717(85)90040-9
- Kögel-Knabner I (2002) The macromolecular organic composition of plant and microbial residues as inputs to soil organic matter. *Soil Biol Biochem* 34:139. 162.
- Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudré, N., Ogée, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., Prentice, I.C., 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochem. Cycles* 19, 1. 33. doi:10.1029/2003GB002199
- Lal, R. (2004) Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security, *Science*, 304, 1623 -1627.
- Laville, P., Henault, C., Gabrielle, B., Serca, D., 2005. Measurement and modelling of NO fluxes on maize and wheat crops during their growing seasons: effect of crop management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 72, 159-171.
- Loubet, B., Laville, P., Lehuger, S., Larmanou, E., Fléchar, C., Mascher, N., Genermont, S., Roche, R., Ferrara, R.M., Stella, P., Personne, E., Durand, B., Decuq, C., Flura, D., Masson, S., Fanucci,

- O., Rampon, J.-N., Siemens, J., Kindler, R., Gabrielle, B., Schrumpf, M., Cellier, P., 2011. Carbon, nitrogen and Greenhouse gases budgets over a four years crop rotation in northern France. *Plant and Soil* 343, 109. 137. doi:10.1007/s11104-011-0751-9
- Murphy J, Riley JP (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal Chim Acta* 27:31. 36. doi: 10.1016/S0003-2670(00)88444-5
 - Nemoto, R., 2013. Soil organic carbon (SOC) now and in the future. Effect of soil characteristics and agricultural management on SOC and model initialisation methods using recent SOC data. *Agricultural sciences*. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.
 - Nicolardot, B; Molina, JAE; Allard, MR, 1994. C and N fluxes between pools of soil organic matter . *Model Calibration with long-term field experimental data. Soil Biology and Biochemistry*, 26, 245-251.
 - Noirot-Cosson P.E., Vaudour E., Gilliot J.M., Gabrielle B., Houot S. (2016) Modelling the long-term effect of urban waste compost applications on carbon and nitrogen dynamics in temperate cropland. *Soil Biol. Biochem.* 94: 138-153.
 - Oades JM (1984) Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant Soil* 76:319. 337. doi: 10.1007/BF02205590
 - Parton, W.J., J.W.B. Stewart, C.V. Cole. 1988. Dynamics of C, N, P, and S in grassland soils: A model. *Biogeochemistry* 5:109-131
 - Poeplau C, Don A, Dondini M, et al (2013) Reproducibility of a soil organic carbon fractionation method to derive RothC carbon pools. *Eur J Soil Sci* 64:735. 746. doi: 10.1111/ejss.12088
 - Riedo M, Grub A, Rosset M and Fuhrer J 1998 A pasture simulation model for dry matter production, and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. *Ecological Modelling* 105, 141. 183.
 - Riedo M, Gyalistras D, Fuhrer J (2000) Net primary production and carbon stocks in differently managed grasslands: Simulation of site-specific sensitivity to an increase in atmospheric CO₂ and to climate change. *Ecological Modelling* 134:207. 227.
 - Rumpel C, Dignac M-F (2006) Gas chromatographic analysis of monosaccharides in a forest soil profile: Analysis by gas chromatography after trifluoroacetic acid hydrolysis and reduction. acetylation. *Soil Biol Biochem* 38:1478. 1481. doi: 10.1016/j.soilbio.2005.09.017
 - Salètes, S., Fiorelli, J.L., Vuichard, N., Cambou, J., Olesen, J.E., Hacala, S., Sutton, M., Fuhrer, J. & Soussana, J.F., 2004. Greenhouse gas balance of cattle breeding farms and assessment of mitigation option. In *Greenhouse Gas Emissions from Agriculture Conference*. Leipzig, Germany 203. 208 (10-12 February 2004)
 - Senapati, N, Chabbi, A, Giostri, AF, Yeluripati, JB, Smith, P, 2016. Modelling nitrous oxide emissions from mown-grass and grain-cropping systems: Testing and sensitivity analysis of DailyDayCent using high frequency measurements. *The Science of the Total Environment*, 572, 955-977.
 - Simonin M, et al. 2015. Coupling Between and Among Ammonia Oxidizers and Nitrite Oxidizers in Grassland Mesocosms Submitted to Elevated CO₂ and Nitrogen Supply. *Microbial Ecology*. 70:809-818. doi: 10.1007/s00248-015-0604-9
 - Smith, P.C., Ciais, P., Peylin, P., De Noblet-Ducoudr, N., Viovy, N., Meurdesoif, Y., Bondeau, a., 2010a. European-wide simulations of croplands using an improved terrestrial biosphere model: 2. Interannual yields and anomalous CO₂ fluxes in 2003. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* 115, 1. 14. doi:10.1029/2009JG001041
 - Smith, P.C., De Noblet-Ducoudré, N., Ciais, P., Peylin, P., Viovy, N., Meurdesoif, Y., Bondeau, a., 2010b. European-wide simulations of croplands using an improved terrestrial biosphere model: Phenology and productivity. *J. Geophys. Res.* 115, 1. 14. doi:10.1029/2008JG000800
 - Soussana, J. F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T., and Arrouays, D.(2004). Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management* 20, 219-230.
 - Steinfeld, H., Gerber, P., Wasenaar, T., Castel, V., Rosales, M., de Haan C., (2006). *Livestock's long shadow*. Environmental Issues and Options. Food and Agriculture Organisation (FAO) of United Nations.
 - Vance ED, Brookes PC, Jenkinson DS (1987) An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biol Biochem* 19:703. 707. doi: 10.1016/0038-0717(87)90052-6
 - Vuichard, N., Ciais, P., Viovy, N., Calanca, P., Soussana, J.-F., (2007). Estimating the greenhouse gas fluxes of European grasslands with a process-based model: 2. Simulations at the continental level. *Global Biogeochem. Cycles* 21, GB1005.
 - Walker TW, Adams AFR (1958) Studies on soil organic matter: i. Influence of phosphorus content of parent materials on accumulations of carbon, nitrogen, sulfur, and organic phosphorus in grassland soils. *Soil Sci* 85:307. 318. doi: 10.1097/00010694-195806000-00004

- Zaehle, S., Friend, a. D., 2010. Carbon and nitrogen cycle dynamics in the O-CN land surface model: 1. Model description, site-scale evaluation, and sensitivity to parameter estimates. *Global Biogeochem. Cycles* 24. doi:10.1029/2009GB003521
- Zaehle, S., Friend, a. D., Friedlingstein, P., Dentener, F., Peylin, P., Schulz, M., 2010. Carbon and nitrogen cycle dynamics in the O-CN land surface model: 2. Role of the nitrogen cycle in the historical terrestrial carbon balance. *Global Biogeochem. Cycles* 24, 1. 14. doi:10.1029/2009GB003522
- Zimmermann M, Leifeld J, Schmidt MWI, et al (2007) Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. *Eur J Soil Sci* 58:658. 667. doi: 10.1111/j.1365-2389.2006.00855.x

Index des tableaux et figures

Tableaux

TABLEAU 3.1 : MESURES DISPONIBLES SUR LES SITES EXPERIMENTAUX ET MESURES EFFECTUEES DANS LE CADRE D' AEGES	11
TABLEAU 3.2 : PLAN EXPERIMENTALE DU SOERE ACBB.....	12
TABLEAU 3.3: CULTURES SIMULEES PAR CERES-EGC: CRITERES UTILISEES POUR DEFINIR LES DATES DE SEMI S, DENSITES ET VARIETES.....	21
TABLEAU 4.1 : CARACTERISTIQUES DU SOL POUR LA CULTURE PERMANENTE (CR), LA PRAIRIE TEMPORAIRE FERTILISEE DE 3 ANS (TG3N+), DE 6 ANS (TG6N+) ET DE LA PRAIRIE TEMPORAIRE NON-FERTILISEE DE 6 ANS (TG6N-), AINSI QUE DE LA PRAIRIE PERMANENTE DE 9 ANS (G). LES DONNEES PRESENTENT LA MOYENNE DE 4 REPLICAS.	26
TABLEAU 4.2 : SIGNATURE DES LIGNINES DES SOLS SOUS CULTURE PERMANENTE (CR), PRAIRIE TEMPORAIRE FERTILISEE DE 3 ANS (TG3N+), DE 6 ANS (TG6N+) ET DE LA PRAIRIE TEMPORAIRE NON-FERTILISEE DE 6 ANS (TG6N-), AINSI QUE DE LA PRAIRIE PERMANENTE DE 9 ANS (G). LES DONNEES PRESENTENT LA MOYENNE DE 4 REPLICAS.	28
TABLEAU 4.3 : C/N RATIO DES FRACTIONS PHYSIAUES (POM=PARTICULATE ORGANIC MATTER; S+A=SAND+AGGREGATES; S+C= SILT+CLAY; RSOC=RESIDUAL ORGANIC CARBON) POUR LA CULTURE PERMANENTE (CR), LA PRAIRIE TEMPORAIRE FERTILISEE DE 3 ANS (TG3N+), DE 6 ANS (TG6N+), DE LA PRAIRIE NON-FERTILISEE DE 6 ANS (TG6N-) ET DE LA PRAIRIE PERMANENTE DE 9 ANS (G). LES DONNEES PRESENTENT DES MOYENNES DE QUATRE REPETITIONS.....	29
TABLEAU 4.4 : SIGNATURE DES SUCRES DANS LES FRACTIONS PHYSIQUES DES SOLS SOUS CULTURE PERMANENTE (CR), PRAIRIE TEMPORAIRE FERTILISEE DE 3 ANS (TG3N+), DE 6 ANS (TG6N+), PRAIRIE TEMPORAIRE NON-FERTILISEE DE 6 ANS (TG6N-) ET PRAIRIE PERMANENTE DE 9 ANS (G). LES DONNEES REPRESENTENT LES MOYENNES DE 4 REPETITIONS.	29
TABLEAU 4.5 : RESUME DES DIFFERENTS TRAITEMENTS POUR LES PARCELLES EN T5 OU G.....	34
TABLEAU 4.6 : QUANTITES DE CO ₂ ET N ₂ O EMISES SUR 42 JOURS DU 16 AVRIL AU 27 MAI 2014 ET LES QUANTITES TOTALES EMISES EN EQUIVALENTS CO ₂ (EQ.CO2) POUR LES TROIS PARCELLES : LABOUREE (L), NON LABOUREE FERTILISEE (NL(A)) ET NON LABOUREE NON FERTILISEE (NL(B)).	36
TABLEAU 4.7 INDICES STATISTIQUES UTILISES POUR COMPARER LES DONNEES MODELISEES ET MESUREES CONCERNANT LA BIOMASSE, LA GPP (PRODUCTION PRIMAIRE BRUTE), LA NEE (PRODUCTION PRIMAIRE NETTE), LA RESPIRATION DES ECOSYSTEMES (RECO), LA TENEUR EN EAU DU SOL A 30 CM DE PROFONDEUR, L'AZOTE AMMONIACAL A 30 CM DE PROFONDEUR (NH ₄ ⁺), TENEUR EN NITRATE A 30 CM (NO ₃ ⁻) ET LES EMISSIONS D'OXYDE NITREUX (N ₂ O). LA DESCRIPTION DES INDEX EST INDIQUEE DANS LE TEXTE.....	41

Figures

FIGURE 2.1: ETAT DE L'ART, ETAPES DU PROJET ET PRODUITS FINAUX EN LIEN AVEC NOS QUATRE OBJECTIFS.....	9
FIGURE 3.1: SITE EXPERIMENTALE DE LUSIGNAN ET L'EMPLACEMENT DES CHAMBRES DE MESURES DE GES DANS LE CADRE DU PROJET AEGES. SE REFERER AU TABLEAU 2 CI-DESSUS POUR UNE DESCRIPTION DES DIFFERENTS TRAITEMENTS.	13
FIGURE 3.2 : CHAMBRES DE MESURES GES SUR TERRAIN ET ECHANTILLONNAGE DES SOLS EN PRINTEMPS 2014.....	15
FIGURE 3.3 : SCHEMA CONCEPTUEL DU MODELE CERES-EGC.....	19
FIGURE 3.4 : SCHEMA CONCEPTUEL DU MODELE PASIM	19
FIGURE 3.5 : SCENARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE EN EUROPE RELATIF AU DERNIER RAPPORT DE L'IPCC, RCP 4.5 ET RCP 8.5. LES GRAPHIQUES MONTRENT LES MOYENNES ANNUELLES DE PLUVIOMETRIE CUMULEES, MOYENNES DE RAYONNEMENT SOLAIRE, MOYENNES DES TEMPERATURES MINIMALES ET MAXIMALES RESPECTIVEMENT.	20
FIGURE 3.6 REPRESENTATION DE L'AGREGATION SPATIALE DES DONNEES. DONNEES METEOROLOGIQUES EN ROUGE, CULTURE ET SOL ET VERT ET UNITE DE SIMULATION EN BLEU (0.25° X 0.25°).	21
FIGURE 4.1: STOCKAGE DU CARBONE ORGANIQUE DANS LES PREMIERES 10 CMS DES PRAIRIES PERMANENTES ET TEMPORAIRES SOUS GESTION DIFFERENTE. (SITES DE CLERMONT-FERRAND ET SITE DE LUSIGNAN). LES SOLS SOUS PRAIRIES TEMPORAIRES ONT ETE ECHANTILLONNES EN 2014 APRES TROIS ANNEES DE CULTURE. LES TRAITEMENTS CORRESPONDENT A CR=9 ANNEES DE CULTURE PERMANENTE, TG3N+=TROIS ANNEES DE PRAIRIES TEMPORAIRES FERTILISEES, TG6N+= SIX ANNEES DE PRAIRIES TEMPORAIRES FERTILISEES, TG6N-= SIX ANNEES DE PRAIRIES TEMPORAIRES NON-FERTILISEES G=9 ANS DE PRAIRIE PERMANENTE.....	24
FIGURE 4.2: DISTRIBUTION DE LA DIFFERENCE DES STOCKS DE CARBONE (0-30 CM) SUR LE SITE DE LUSIGNAN DETERMINE EN 2005 ET 2014 ET VARIATION MOYENNE DES STOCKS EN 9 ANS.	25
FIGURE 4.3: RAPPORT XYLOSE/MANNOSE, AINSI QUE LE RAPPORT C6/C5 INDIQUANT L'ETAT DE DEGRADATION ET L'ORIGINE DES SUCRES DANS LES SOLS DE PRAIRIE SOUS DIFFERENT GESTION	27
FIGURE 4.4 : DISTRIBUTION DU C DANS LES FRACTIONS 'MATIERES ORGANIQUES PARTICULAIRES (POM) ET LIMON ET ARGILES ((S+C)-RSOC) DANS LES SOLS SOUS CULTURE PERMANENTE (CR), PRAIRIE TEMPORAIRE FERTILISEE DE 3 ANS (TG3N+), DE 6 ANS (TG6N+) ET DE LA PRAIRIE TEMPORAIRE NON- FERTILISEE DE 6 ANS (TG6N-), AINSI QUE DE LA PRAIRIE PERMANENTE DE 9 ANS (G). LES DONNEES PRESENTENT LA MOYENNE DE 4 REPETITIONS.	28
FIGURE 4.5 : ACP POUR PARAMETRES DU SOL SOUS CULTURE PERMANENTE (CR), PRAIRIE TEMPORAIRE FERTILISEE DE 3 ANS (TG3N+), DE 6 ANS (TG6N+), DE 6 PRAIRIE TEMPORAIRE NON-FERTILISEE DE 6 ANS (TG6N-) ET DE LA PRAIRIE PERMANENTE (G).	30
FIGURE 4.6 : PRODUCTION BRUTE (AVEC INHIBITION DE LA N ₂ O REDUCTASE) ET NETTE (SANS CETTE INHIBITION) DE N ₂ O EN ANAEROBIOSE PAR LES SOLS SOUMIS A 5 TYPES DE ROTATION CULTURALE : CULTURE PERMANENTE (CR), PRAIRIE TEMPORAIRE FERTILISEE DE 3 ANS (TG3N+), DE 6 ANS (TG6N+), PRAIRIE TEMPORAIRE NON-FERTILISEE DE 6 ANS (TG6N-) ET PRAIRIE PERMANENTE DE 9 ANS (G).....	31
FIGURE 4.7 : DEPENDANCE DE L'ACTIVITE DENITRIFIANTE POTENTIELLE VIS A VIS DE LA DISPONIBILITE EN CARBONE ORGANIQUE ENDOGENE DANS LES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LE SITE DE LUSIGNAN.	31
FIGURE 4.8 : ABONDANCES (HAUT) DES BACTERIES ET ARCHEES CAPABLES D'OXYDER L'AMMONIUM AOB ET AOA ; (MILIEU) DES BACTERIES DENITRIFIANTES IMPLIQUEES DANS LA PRODUCTION DE N ₂ O ET PORTEUSES DU GENE NIRK OU NIRS ; ET (BAS) DES BACTERIES DENITRIFIANTES IMPLIQUEES DANS LA REDUCTION DE N ₂ O (PORTEUSES DU GENE NOSZ1 OU NOSZ2) POUR LES DIFFERENTS TRAITEMENTS SUR LE SITE DE LUSIGNAN.....	32
FIGURE 4.9: FLUX CUMULES DE N ₂ O EN G M ⁻² SUR 15 JOURS DU 21 AVRIL AU 5 MAI 2014 SUR LES 5 TYPES DE ROTATION CULTURALE : A LUSIGNAN ET SUR LA PARCELLE DE PRAIRIE RETOURNEE SPECIFIQUE AU PROJET AEGES. CULTURE PERMANENTE (CR), PRAIRIE TEMPORAIRE FERTILISEE DE 3 ANS (TG3N+), DE 6 ANS (TG6N+), PRAIRIE TEMPORAIRE NON-FERTILISEE DE 6 ANS (TG6N-), PRAIRIE PERMANENTE DE PLUS DE 9 ANS (G) ET PRAIRIE PERMANENTE DE PLUS DE 9 ANS RETOURNEE LE 11 AVRIL 2014 (G-R).	33
FIGURE 4.10: FLUX CUMULES DE CO ₂ EN KG M ⁻² SUR 15 JOURS DU 21 AVRIL AU 5 MAI 2014 SUR LES 5 TYPES DE ROTATION CULTURALE : A LUSIGNAN ET SUR LA PARCELLE DE PRAIRIE RETOURNEE SPECIFIQUE AU PROJET AEGES. CULTURE PERMANENTE (CR), PRAIRIE TEMPORAIRE FERTILISEE DE 3 ANS (TG3N+), DE 6 ANS (TG6N+), PRAIRIE TEMPORAIRE NON-FERTILISEE DE 6 ANS (TG6N-), PRAIRIE PERMANENTE DE PLUS DE 9 ANS (G) ET PRAIRIE PERMANENTE DE PLUS DE 9 ANS RETOURNEE LE 11 AVRIL 2014 (G-R).	33
FIGURE 4.11 MOYENNES ET CUMULS DES FLUX QUOTIDIENS DE N ₂ O ET DE CO ₂ DANS LES TROIS TRAITEMENTS. LES LIGNES EPAISSES CORRESPONDENT AUX FLUX CUMULES EN 42 JOURS DU 16 AVRIL AU 27 MAI 2014.	

LES LIGNES AVEC BARRES D'ERREURS REPRESENTENT LES FLUX MOYENNEES SUR LA JOURNEE ET LES ECART-TYPE. PRAIRIE L EST LA PRAIRIE LABOUREE, PRAIRIE NL(A) EST LA PRAIRIE NON LABOUREE MAIS FERTILISEE LE 13 MAI ET LA PRAIRIE NL(B) EST LA PRAIRIE NON LABOUREE NON FERTILISEE.....	35
FIGURE 4.12 : DISTRIBUTION DES FLUX DE N ₂ O POUR 6 DIFFERENTES CONDITIONS : PRAIRIE LABOUREE (L), NON-LABOUREE FERTILISEE NL(A), NON-LABOUREE NON FERTILISEE NL(B), CHACUNE POUR LES JOURS AVEC UN TAUX D'HUMIDITE DU SOL SUPERIEUR OU INFERIEUR A 27% A 10 CM DE PROFONDEUR. LA DIFFERENCE ENTRE LES MOYENNES INDIQUEES DANS L'ENCART EST SIGNIFICATIF AVEC P<0.001 OBTENU PAR UN TEST DE STUDENT	35
FIGURE 4.13 : DISTRIBUTION DES FLUX DE CO ₂ POUR 6 DIFFERENTES CONDITIONS : PRAIRIE LABOUREE (L), NON-LABOUREE FERTILISEE NL(A), NON-LABOUREE NON FERTILISEE NL(B), CHACUNE POUR LES JOURS AVEC UN TAUX D'HUMIDITE DU SOL SUPERIEUR OU INFERIEUR A 27% A 10 CM DE PROFONDEUR. LA DIFFERENCE ENTRE LES MOYENNES INDIQUEES DANS L'ENCART EST SIGNIFICATIF AVEC P<0.001 OBTENU PAR UN TEST DE STUDENT	36
FIGURE 4.14: SCHEMA RESUMANT LA DEMARCHE AEGES VISANT A ANALYSER LES COUPLAGES ENTRE CARACTERISTIQUES DU SOL, ABONDANCES ET ACTIVITES DES COMMUNAUTES MICROBIENNES DU SOL, ET EMISSIONS DE N ₂ O SOUS L'EFFET DES USAGES DES SOLS.	37
FIGURE 4.15 : TYPE DE RESULTATS OBTENUS PAR 'PATH ANALYSIS' ET PRESENTANT LES RELATIONS ENTRE LES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU SOL, ET NOTAMMENT LA TENEUR MOYENNE EN EAU DU SOL SWC ET LA QUALITE DES MATIERES ORGANIQUES (INDICE DE TYPE DE LIGNINES SYRINGYL/VANILLYL S/V), ET LES ABONDANCES DES NITRIFIANTS (OXYDANT L'AMMOINIUM, AO), DES REDUCTEURS DE NITRITE (NIR) ET DES REDUCTEURS DE N ₂ O (NOSZ). LE MODELE EXPLICITE AUSSI COMMENT LA PRODUCTION NETTE DE N ₂ O EN ANAEROBIOSE EST RELIEE (I) A LA PRODUCTION BRUTE, ELLE-MEME DOUS DEPENDANCE DE LA DISPONIBILITE EN NITRATE, ET (II) AU RAPPORT ENTRE L'ABONDANCE DES REDUCTEURS DE NITRITE ET DES REDUCTEURS DE N ₂ O (NIR/NOSZ).....	38
FIGURE 4.16 : DATE DE RECOLTE (EN DOY= JOUR DE L'ANNEE) DES DIFFERENTES CULTURES POUR LES ANNEES 2008 A 2010. LA LIGNE BLEU EST LA PREMIERE BISSECTIRCE. PEA = POIS D'HIVER; COLZA = COLZA; WHEAT = BLE D'HIVER FERTILISE; WHEATO BLE D'HIVER NON FERTILISE.....	39
FIGURE 4.17 : RENDEMENT DES DIFFERENTES CULTURES EN KG DM HA ⁻¹ . DONNEES SONT SUBDIVISEE SELON LA QUANTITE DE FERTILISATION APPORTEE. LA LIGNE ROUGE EST LA PREMIERE BISSECTRICE. PEA = POIS D'HIVER; COLZA = COLZA; WHEAT = BLE D'HIVER.	40
FIGURE 4.18: A) QUANTITE D'AZOTE APPLIQUEE DANS LES ROTATIONS (KG N HA ⁻¹); ET DONNEES OBSERVEES ET SIMULEES POUR B) AZOTE MINERAL DU SOL (NH ₄ ⁺ + NO ₃ ⁻) DANS LES ROTATIONS (KG N HA ⁻¹); C) ÉMISSIONS CUMULEES DE N ₂ O DANS LES ROTATIONS (KG N HA ⁻¹) DIVISE PAR LA QUANTITE D'N APPLIQUE (KG N HA ⁻¹); ET D) ÉMISSIONS CUMULEES DE N ₂ O DANS LES ROTATIONS (KG N HA ⁻¹) DIVISE PAR L'AZOTE APPLIQUE PLUS L'AZOTE MINERAL DU SOL (KG N HA ⁻¹). P = POIS D'HIVER; R = COLZA; W = BLE D'HIVER; "_N" ET "_ON" SONT RESPECTIVEMENT ROTATION AVEC L'APPLICATION D'ENGRAIS ET SANS ENGRAIS.....	41
FIGURE 4.19 : LE CARBONE TOTAL DU SOL A 300 CM DE PROFONDEUR SIMULE ET MESURE EN LUSIGNAN DANS LE TRAITEMENT P2. LES DONNEES SONT EXPRIMEES EN G C M ⁻² . DANS LE GRAPHIQUE, LES EVENEMENTS DE COUPE SONT SIGNALES SOUS LA FORME DE LIGNES VERTICALES VERTES.	42
FIGURE 4.20 : (A) LOCALISATION DES SITES SUR LESQUELLES LE MODELE ORCHIDEE-GM A ETE EVALUE ET (B) ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE (RMSE) DU MODELE ORCHIDEE-GM POUR LES FLUX DE GPP, DE TER, ET DE NEE A L'ECHELLE SAISONNIERE. LES SITES CH-OE1, DE-GRI ET IT-MBS ETAIENT EXCLUSIVEMENT FAUCHES ; LES SITES ES-VDA, FR-LQ1, FR-LQ2, HU-BUG, IE-DRI ET UK-EBU EXCLUSIVEMENT PATURES ET LES SITES IT-AMP ET PT-MI2 FAUCHES ET PATURES.	43
FIGURE 4.21 : EVOLUTION DE LA NEE SUR LA PRAIRIE PATUREE (A) ET LA PRAIRIE FAUCHEE (B) DU SITE DE LUSIGNAN SIMULEE PAR ORCHIDEE (EN ROUGE), ORCHIDEE-GM (EN VERT) ET OBSERVE (EN NOIR).....	43
FIGURE 4.22 : (A) CYCLE SAISONNIER MOYEN DE LA GPP SUR UN ENSEMBLE DE SITES ET (B) REPARTITION DE L'ERREUR ASSOCIEE (BIAS, AMPLITUDE, CORRELATION).....	44
FIGURE 4.23 : (A) FLUX DE N ₂ O SIMULE PAR ORCHIDEE-CN SUR LE SITE DE LAQUEUILLE EXTENSIF ET (B) DYNAMIQUE DE L'HUMIDITE RELATIVE SIMULEE ET OBSERVEE	45
FIGURE 4.24 : DIAGRAMMES DE FONCTIONNEMENT SUIVIS DANS LE MODELE FARMSIM: (I) DES PRAIRIES AUX PRAIRIES (RENOVATION); II) DES PRAIRIES AUX TERRES CULTIVEES; (III) DES TERRES CULTIVEES AUX PRAIRIES.....	46
FIGURE 4.25 : PRODUCTION DE BIOMASSES (KG DM M ⁻²) DANS LA PARCELLE DE LUSIGNAN P1, DONNEES MESUREES ET SIMULEES. UNE BARRE VERTICALE POINTILLEE DEFINIT LE PASSAGE DU MODELE PASIM (A GAUCHE) AU MODELE CERES-EGC (A DROITE).....	47

FIGURE 4.26 : ÉMISSIONS DE N ₂ O (G N ₂ O HA ⁻¹ D) DANS LA PARCELLE LUSIGNAN P1, DONNEES MESUREES ET SIMULEES. DANS LE TABLEAU SONT INDICUES L'INDEX STATISTIQUE; VOIR LE TEXTE POUR PLUS DE DETAILS. LA BARRE VERTICALE ORANGE POINTILLEE DEFINIT LE PASSAGE DU MODELE PASIM (GAUCHE) ET DU MODELE CERES-EGC (A DROITE).....	48
FIGURE 4.27 : TENEUR TOTALE EN CARBONE DU SOL A 30 CM (KG C M ⁻²) DANS LA PARCELLE P1 DE LUSIGNAN. LES COUPES D'HERBE ET LA DATE DE RECOLTE SONT INDICUES COMME DES BARRES VERTICALES. UNE BARRE VERTICALE POINTILLEE DEFINIT LE PASSAGE DU MODELE PASIM (A GAUCHE) AU MODELE CERES-EGC (A DROITE).....	48
FIGURE 4.28 : INVESTIGATED PLOTS OF THE RIVER BASIN OF PLAISIR FONTAINE IN THE LOUE'S RIVER BASIN.	49
FIGURE 4.29 : CONCENTRATION DE NITRATES DANS LES PREMIERS 30 CM (N-NO ₃ KG N HA ⁻¹) DANS LE BASSIN VERSANT DE PLAISIR FONTAINE DURANT LA PERIODE 2011-2014 ET RELATIVE AUX PARCELLES AVEC ROTATION DES CULTURES (A) ET DES PRAIRIES (B). EN ROUGE SONT REPRESENTEES LES DONNEES OBSERVEES, EN BLEU LES DONNEES SIMULEES AVEC LE MODELE FARMSIM.	50
FIGURE 4.30 : BIAS A PARTIR DE DONNEES SIMULEES ET OBSERVEES DANS LES PARCELLES DU BASSIN DU PLAISIR FONTAINE QUI SONT EN ROTATION ENTRE LES PRAIRIES TEMPORAIRES ET LES CULTURES, SELON: A) LE TYPE DE BUTIN, B) LA SAISON DE CROISSANCE DES CULTURES, C) LE TYPE DE CULTURE OU DE PRAIRIE, D) LA PERIODE DE PRELEVEMENT ET E) LES PARCELLES: PF EST PRAIRIE TONDUE, PM: PRAIRIE MIXTE, PP: PATURAGE, HE: ENTREE D'HIVER. SH: SORTIE HIVERNALE, BH: BLE D'HIVER, OH: ORGE D'HIVER, TRI: TRITICALE. LE NOMBRE D'ECHANTILLONS EST INDICUE EN TANT QUE CARACTERE SUR LE HAUT DES BOITES.....	50
FIGURE 4.31: EMISSIONS DE N ₂ O (KG N HA ⁻¹ AN ⁻¹) DES GRANDES CULTURES EN FRANCE POUR LES PERIODES 2010-2019 ET 2060-2069, AVEC DEUX SCENARIOS CLIMATIQUES (RCP 4.5 ET RCP 8.5) ET DEUX SCENARIOS DE GESTION (IRRIGUES ET NON IRRIGUES). EN UTILISANT LE MODELE CERES-EGC; CHAQUE PIXEL REPRESENTE 770 KM ²	51
FIGURE 4.32 : ÉMISSIONS ANNUELLES MOYENNES DE N ₂ O POUR LES TERRES CULTIVEES AU COURS DES PERIODES 2010-2019, 2060-2069, 2090-2099. LES EMISSIONS DE N ₂ O OBTENUES AVEC LES DEUX SCENARIOS CLIMATIQUES (RCP 4.5 ET RCP 8.5), LES SCENARIOS DE GESTION (IRRIGUES ET NON IRRIGUES), AINSI QUE LA ROTATION PRINCIPALE ET LA DEUXIEME ROTATION DOMINANTE (C1 ET C2, RESPECTIVEMENT) SONT RAPPORTEES. LES BARRES D'ERREUR EXPRIMENT L'ECART TYPE.....	52
FIGURE 4.33 : PRODUCTIVITE NETTE DE L'ECOSYSTEME (NEP) EN KG C HA ⁻¹ AN ⁻¹ POUR LES GRANDES CULTURES EN FRANCE POUR LES PERIODES 2010-2019 ET 2060-2069, AVEC DEUX SCENARIOS CLIMATIQUES (RCP 4.5 ET RCP 8.5) ET DEUX SCENARIOS DE GESTION (IRRIGUES ET NON IRRIGUE); CHAQUE PIXEL EST DE 770 KM ² . LES VALEURS NEGATIVES INDIQUENT UN STOCKAGE DE CARBONE.	53
FIGURE 4.34 : PRODUCTIVITE NETTE DE L'ECOSYSTEME (NEP) EN KG C HA ⁻¹ AN ⁻¹ POUR LES PRAIRIES EN FRANCE POUR LES PERIODES 2010-2019 ET 2060-2069, AVEC DEUX SCENARIOS CLIMATIQUES (RCP 4.5 ET RCP 8.5); CHAQUE PIXEL EST DE 770 KM ² . LES VALEURS NEGATIVES INDIQUENT UN STOCKAGE DE CARBONE.	54
FIGURE 4.35 : MOYENNE ANNUELLE DU NEP POUR LES TERRES CULTIVEES AU COURS DES PERIODES 2010-2019, 2060-2069 ET 2090-2099 POUR LES DEUX SCENARIOS CLIMATIQUES (RCP 4.5 ET RCP 8.5), LE SCENARIO DE GESTION (IRRIGUE ET NON IRRIGUE), AINSI QUE LA ROTATION PRINCIPALE ET LA DEUXIEME ROTATION DOMINANTE (C1 ET C2, RESPECTIVEMENT).....	55
FIGURE 4.36 : MOYENNE ANNUELLE DU NEP POUR LES PRAIRIES EN FRANCE AU COURS DES PERIODES 2010-2019, 2060-2069 ET 2090-2099 POUR LES DEUX SCENARIOS CLIMATIQUES (RCP 4.5 ET RCP 8.5),.....	55
FIGURE 4.37 : RENDEMENT MOYEN (T DM HA ⁻¹) DES PRINCIPALES ROTATIONS DE CULTURES EN FRANCE SUR DEUX SCENARIOS CLIMATIQUES (RCP 4.5 ET RCP 8.5) ET SCENARIOS D'IRRIGATION. L'OMBRE GRISE EST L'INTERVALLE DE CONFIANCE, TANDIS QUE LES LIGNES REPRESENTENT LA MOYENNE; L'ECART-TYPE EST INDICUE POUR TOUTES LES DONNEES ANNUELLES.....	56
FIGURE 4.38 : PRODUCTION MOYENNE DE BIOMASSE (T DM HA ⁻¹) POUR LES PRAIRIES EN FRANCE AVEC DEUX SCENARIOS CLIMATIQUES (RCP 4.5 ET RCP 8.5). L'OMBRE GRISE EST L'INTERVALLE DE CONFIANCE, TANDIS QUE LES LIGNES REPRESENTENT LA MOYENNE; L'ECART-TYPE EST INDICUE POUR TOUTES LES DONNEES ANNUELLES	56
FIGURE 4.39 : LE RENDEMENT MOYEN DU MAÏS EN FRANCE (T DM HA ⁻¹), LA DATE DE RECOLTE (DOY EST LE JOUR JULIEN) ET LE BESOIN D'IRRIGATION SUR DEUX SCENARIOS CLIMATIQUES (RCP 4.5 ET RCP 8.5) ET SCENARIO DE GESTION (IRRIGUE ET NON IRRIGUE). L'OMBRE GRISE EST L'INTERVALLE DE CONFIANCE, TANDIS QUE LES LIGNES REPRESENTENT LA MOYENNE; L'ECART-TYPE EST INDICUE POUR TOUTES LES DONNEES ANNUELLES.....	57

FIGURE 4.40 : NBP, NGE ET LEURS COMPOSANTES PAR GRANDES REGIONS AGRICOLES AU COURS DES CINQ DERNIERES DECENNIES. LES VALEURS DE CHAQUE COMPOSANTE SONT DES MOYENNES SUR 10 ANS POUR, DE GAUCHE A DROITE, 1961-1970, 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000 ET 2001-2010. NBP: NET BIOME PRODUCTIVITY (G C M-2 AN-1); CINPUT (BLEU): LE C ENTRANT DANS LE SYSTEME PAR APPLICATION DE LISIER (G C M-2 AN-1); CEXPORT (ROUGE): LE C PERDU PAR LE SYSTEME A TRAVERS LA BIOMASSE RECOLTEE, ET L'EMISSION DE CH4 PAR LES ANIMAUX AU PATURAGE (G C M-2 AN-1); NGE: L'ECHANGE NET DE GES DE L'ECOSYSTEME PRAIRIAL EXPRIME COMME POTENTIEL DE RECHAUFFEMENT GLOBAL (G C-CO2 EQUIVALENT M-2 AN-1), Y COMPRIS LES FLUX DE CO2 (VERT FONCE), CH4 (ORANGE) ET N2O (POURPRE). LES VALEURS DE NBP ET NGE POSITIVES INDIQUENT DES PUIITS NETS DE C ET DE GHG, RESPECTIVEMENT. LES VALEURS NEGATIVES DES FLUX DE CH4 ET DE N2O INDIQUENT QUE L'ECOSYSTEME PRAIRIAL EST UNE SOURCE DE CH4 ET DE N2O. 58

ANNEXES

Annexe 1 : Compte rendues des réunions du projet

1. Compte rendu de la réunion des parties prenantes È communication des résultats du projet

Date : 15.11.2016

Lieu : Jussieu, Paris

Participants :

Manuel Martin (Infosol) ; manuel.martin@inra.fr

Fiona Erhardt (INRA) ; fiona.ehrhardt@inra.fr

Elisabeth Panac-Farbiaz (Ministère de l'Agriculture) ; elisabeth.pagnac-farbiaz@developpement-durable.gouv.fr

Robert Colas (CITEPA) ; colas.robert@citepa.org

Jean-Baptiste Paroissien (Institut d'élevage) ; Jean-Baptiste.Paroissien@idele.fr

Francesca Degan (ACTA) ; francesca.degan@acta.asso.fr

Caroline Petitjean (IDELE) ; caroline.petitjean@idele.fr

Robert Trochard (Avalis) ; R.TROCHARD@arvalisinstitutduvegetal.fr

Hélène Chambaut (IDELE), Helene.Chambaut@idele.fr

Caroline Guinot (INTERBEV) ; c.guinot@interbev.fr

Carole Piquemal (Cniel) ; cpiquemal@cniel.com

La réunion des parties prenantes a eu lieu pendant une demi-journée. Quatre exposés oraux ont été donnés par les participants d'ÆGES pour (1) introduire la problématique d'ÆGES et ensuite répondre à deux questions : (2) Quelle gestion des prairies et cultures améliore la séquestration du C dans les sols, et à quelle vitesse ? (3) Quelle gestion des prairies et cultures oriente les activités microbiennes du sol d'une façon favorable ou défavorable aux émissions de gaz à effet de serre ? Enfin, (4) des projections des émissions de N₂O en fonction de différents scénarii climatiques sur l'Europe ont été présentées. Nous avons laissé du temps pour discuter des résultats et échanger avec les parties prenantes sur leurs questions, leurs remarques, mais également sur la façon de communiquer nos résultats. Les discussions, qui ont eu lieu durant les quatre exposés, ont été les suivantes :

Quelle gestion des prairies et cultures améliore la séquestration du C dans les sols, et à quelle vitesse ? (Exposé par Alexandra Crème)

Les principaux messages concernaient l'intérêt des prairies en vue de stocker du C, alors qu'on déstocke dans les sols sous culture. Néanmoins, le stockage du C a un coût financier et environnemental : si on veut produire de la biomasse en même temps que stocker du C, une fertilisation azotée est nécessaire.

Les questions concernaient

- La forme de la fertilisation azotée
- L'historique du site

L'intérêt d'un dispositif de recherche à long terme a été évoqué. Il a été constaté dans la discussion que pour le bilan, le stockage/déstockage de C doit être confronté aux émissions de CO₂.

Quelle gestion des prairies et cultures oriente les activités microbiennes du sol d'une façon favorable ou défavorable aux émissions de gaz à effet de serre ? (Exposé par Xavier Leroux)

Les messages principaux ont été, (1) qu'il y a plusieurs processus responsables des émissions de N₂O suivant les conditions pédoclimatiques, et (2) que la gestion des prairies impacte sur les services écosystémiques. Le plus souvent, on sera ainsi confronté à des compromis entre deux services qu'il faudra optimiser.

Dans la discussion, il a été évoqué qu'il faut bien préciser les modes de gestion dont on parle. Ils ont des effets contrastés selon le système. La question de la biodiversité a été évoquée ainsi que le compromis à faire entre séquestration de C et émissions de N₂O. Il a été suggéré, que ces deux processus devront être réunis pour décrire le service écosystémique « Régulation du climat ». Une question relative à la signification du terme « fertilité d'un sol » a été posée. Une réponse rapide pourrait être quelle se mesure au regard de la quantité d'engrais que le producteur devrait acheter. Ensuite nous avons discuté des notions de qualité et fertilité des sols et leur relation.

Projections des émissions de N₂O en fonction de différents scénarii climatiques sur l'Europe (Exposé par Katja Klumpp)

Les messages principaux ont été que les émissions des GES s'intensifieront au regard du scénario climatique choisi. L'effet des changements climatiques sur plusieurs variables est observable dès maintenant. Une adaptation des pratiques agricoles et le recours à certains moyens productifs (par exemple systèmes d'irrigation) des pratiques agricoles et/ou une amélioration génétique des cultures et/ou des pratiques agricoles et/ou le déplacement géographique des filières devrait être envisagé.

Les questions des parties prenantes concernaient les techniques utilisées pour arriver aux résultats des modèles (comment est-ce que les dates de fertilisation et de semis ont été prise en compte ? comment est-ce que les modèles ont été validés ? etc.). Les parties prenantes utilisent des modèles plus simples. En général, elles ne donnent pas trop d'importance aux résultats des modèles. Ils sont un aspect pour la prise de décision, car selon les paramètres des modèles, il est possible d'avoir des résultats très différents. Toutefois, quelques résultats de modélisation sont intéressants, donnent des orientations. Les parties prenantes sont conscientes qu'il faut toujours confronter ces résultats avec la réalité du terrain.

Dans la discussion il a été évoqué que la PAC bloque l'adaptation des gestions des prairies et que les prairies n'ont pas beaucoup de valeurs, alors qu'elles rendent une multitude des services écosystémiques.

2. Compte rendu réunion AEGES experimentation

Le 29/01/2014 à Lusignan.

Abad CHABBI, Xavier CHARRIER, Alexandra CREME, Christophe DE BERRANGER, Raia-Silvia MASSAD
et Cornelia RUMPEL.

L'objectif de la réunion a été de discuter de la campagne d'échantillonnage MOS-μbio-flux des gaz à effet de serre dans le cadre AEGES à Lusignan sur Le SOERE ACBB. Mais aussi de visualiser les différentes décisions sur le terrain afin d'intégrer les différentes contraintes.

Campagne d'échantillonnage pour la spatialisation des stocks de carbone et d'azote sur SOERE ACBB site Lusignan.

Cette campagne fait partie du projet AEGES mais a été précédemment différencié de la campagne couplage MOS-μbio-flux GES, néanmoins il est intéressant de noter que prévu pour janvier 2014, les prélèvements n'ont pas commencés. A cause de la météo, il y a un mois de retard sur le planning.

Pour les mesures de Tomographie voir avec Isabelle Cousin d'Orléans qui l'a déjà effectué en couplage a des mesures de vers de terre sur SOERE.

Campagne d'échantillonnage pour le couplage MOS-microorganismes-activités et mise en relation avec les flux de gaz sur SOERE ACBB site Lusignan.

Dans le cadre d'AEGES notre objectif consiste à effectuer un couplage des variables microbiologiques (μbio), matières organiques du sol (MOS) et émission de gaz à effet de serre (GES).

Cette campagne se concentre sur les petites parcelles qui représentent les 5 modalités (T1, T2, T3, T4 et T5). N'ayant aucune modalité décrivant un retournement de prairie cette année, nous prévoyons de retourner 12m² dans la parcelle T5L afin de suivre les flux et processus de ce phénomène. Ainsi nous avons 6 modalités.

		2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Small plots																			
T1	Crop rotation	maïs	blé	orge	maïs	blé	orge	maïs	blé	orge	maïs	blé	orge	maïs	blé	orge	maïs	blé	orge
T2	Grassland 3 years N+ Cutting	maïs	blé	orge	Grassland 3 years			maïs	blé	orge	Grassland 3 years			maïs	blé	orge	Grassland 3 years		
T3	Grassland 6 years N+ Cutting	Grassland 6 years						maïs	blé	orge	Grassland 6 years						maïs	blé	orge
T4	Grassland 6 years N- Cutting	Grassland 6 years						maïs	blé	orge	Grassland 6 years						maïs	blé	orge
T5	Grassland >20 years N+ Cutting	permanent grassland																	
Large plots																			
T5L	Grassland >20 years N+ Cutting	permanent grassland									Retournement 12m ²								

Les chambres de mesures des gazes (CO₂ et N₂O) seront mises en place à la suite de prélèvements car la mise en place des chambres perturbe (tassement) le sol aux alentours.

À l'heure actuelle la date fixée est la dernière semaine de février 2014 soit le 24 et 25 février pour l'échantillonnage et le 26 et 27 février pour la mise en place des chambres.

Ces dates sont modulables en fonction de la météo et de l'électrification des blocs 3 et 4 (aussi dépendant de la météo du mois de février).



- Mesures de gaz
Raia-Silvia MASSAD, Olivier, Christophe DE BERRANGER.
 - Nous avons à disposition 4 jeux de 6 chambres (3 Lusignan + 1 Grignon). La disposition a été décidée afin de posséder 4 chambres par modalités et sur une même zone tout au long des

mesures donc nous ne pouvons avoir sur les 4 blocs. Ainsi nous avons 2 chambres par parcelles sur 2 parcelles de même modalité sans tenir compte des différents blocs.

- Le déplacement des chambres aura lieu uniquement lorsque les activités agricole le nécessiterons (labour, semi et fauche) sur une zone proche des prélèvements.

	Nb de chambre	Nb de parcelle	Blocs étudiés	Déplacements
T1	4	2	1 et 4	Labour/semi (avril) : 1
T2	4	2	3 et 4	Labour/semi (mars) : 1
T3	4	2	1 et 2	Labour/semi (mars) : 1
T4	4	2	1 et 2	Labour/semi (mars) : 1
T5	4	2	1 et 4	Fauches : 3
T5L retourné	4	1	P2	Retournement (mars) : 1

Emplacement des chambres N2O dans les parcelles

Luzerne
bandes luzerne installées en avril dans les parcelles des traitements T2 et T3

jeu de 6 chambres N2O modulables dans un rayon d'action de 16 m autour de l'analyseur

suivi flux N2O sur :

- T1 blocs 1 et 2
- T2 blocs 3 et 4
- T3 blocs 1 et 2
- T4 blocs 1 et 2
- T5 blocs 1 et 4
- (T5) prairie retournée P2

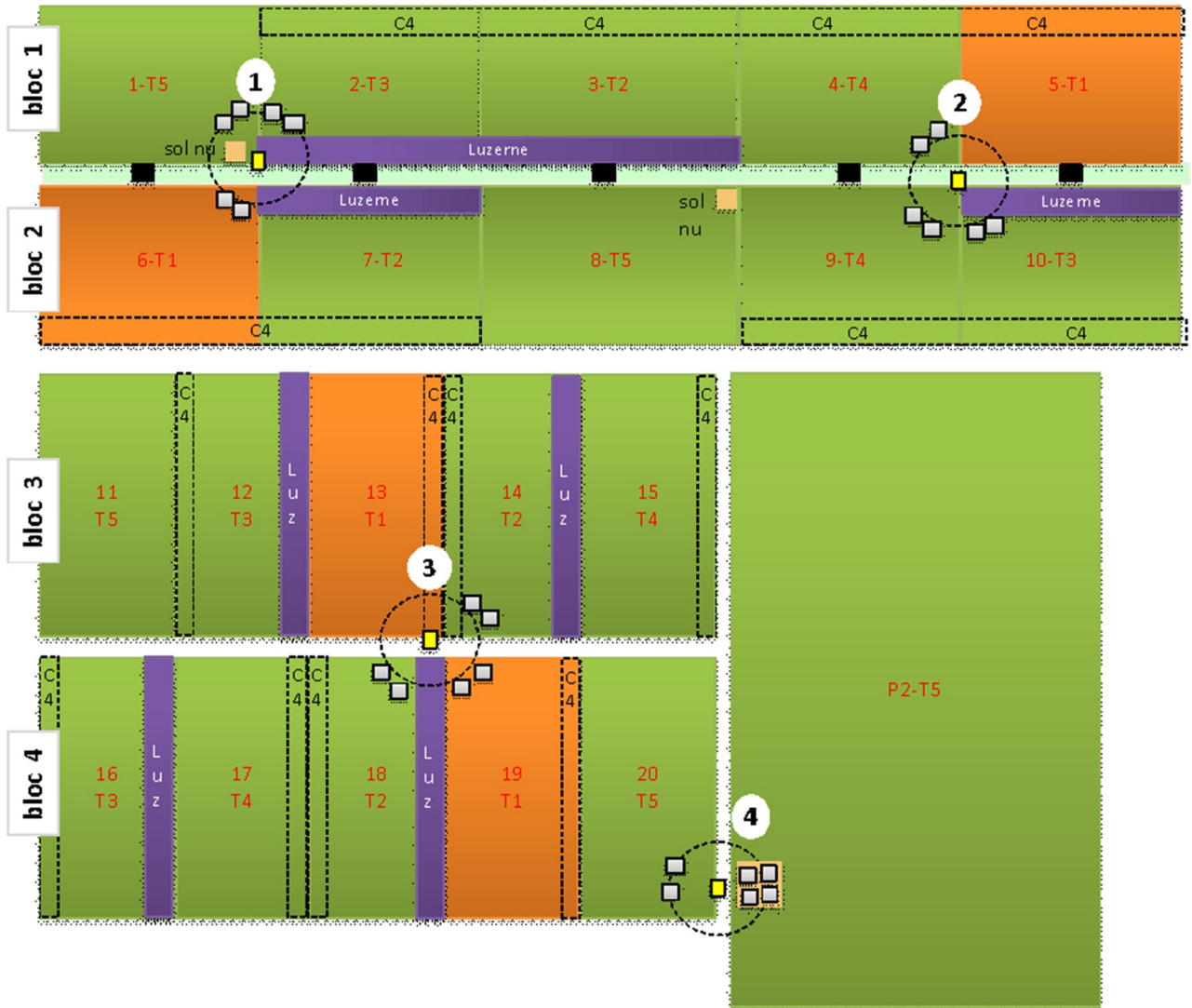


Schéma de Xavier Charrier

- **Prélèvements de sol (MOS et μ bio):**
Alexandra Crème, Xavier Leroux, Franck Poly, Cornelia Rumpel, Lan Tuo (*demander à Daniel Billiou*).
Tarière 18mm. Masse de sol ?
 - **Suivi μ bio :** (échantillons A = 40)
Echantillonnage standard (position idem que pour les autres dates, tout les 3 ans) sur toutes les petites parcelles (20 parcelles = 5 traitements ORE x 4 répliquâts) en 2 profondeurs : 0-10cm et 10-30cm. 5 points par parcelle (100 carottes) et création d'un composite des 5 prélèvements, en 2 profondeurs soit 40 échantillons.
 - **Couplage MOS- μ bio-flux GES**

- Echantillon tamisés 4 mm composite sur 0-10cm et 10-30cm: (échantillons B1 = 48)
Afin de réaliser 1 échantillon de sol associé aux émissions de gaz pour chaque chambre, on effectue un échantillon composite de 3 carottes, entourant chaque localisation de chambre. 3 carottes sur 0-10cm et 10-30cm au niveau des 4 chambres pour 6 modalités soit 144 carottes assemblées en 48 échantillons composites.
- Echantillons non perturbé sur 0-10cm: (échantillons B2 =24)
1 cylindre sur 0-10cm au niveau des 4 chambres pour 6 modalités soit 24 carottes.
Nb de cylindre disponible? 2eme série de cylindre B2 non perturbé pour LEM ?

sol frais tamisé à 4mm	MOS	µbio
échantillons A = 40	-	
échantillons B1 = 48		
0-10cm = 24	150g + 150g	
10-30cm = 24	150g	
échantillons B2 =24	1 cylindre	

Analyse des MOS :

Il est prévu de mesurer sur les échantillons B1 (0-10cm et 10-30cm) le CN, Nmin, les sucres, la lignine, la biomasse microbienne, de faire de la pyrolyse, des biolog, des plfa et du fractionnement. Pour cela il faut 150g. A ceci s'ajoute les incubations de sol B1 (0-10cm=150g) et B2 (0-10cm= 1 cylindre).

Annexe 2 : Liste des publications du projet

Articles dans des revues internationaux avec comité de lecture:

- Chang, J., Viomy, N., Vuichard, N., Ciais, P., Campioli, M., Klumpp, K., & Soussana, J.-F. (2015). Modeled Changes in Potential Grassland Productivity and in Grass-Fed Ruminant Livestock Density in Europe over 1961. 2010. Plos One, 10(5), e0127554. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127554>
- Crème, A., Rumpel, C., Gastal, F., Mora, M.-L., Chabbi, A., 2016 : Effect of grasses and a legume grown in monoculture or mixture on soil organic matter and phosphorus forms. *Plant and Soil*, 402, 117-128
- Crème, A., Chabbi, A., Gastal, F., Rumpel, C. : Biogeochemical nature of grassland soil organic matter under two nitrogen sources. *Plant and Soil*, accepté avec révisions, sous presse.
- Eza, U., Shtiliyanova, A., Borrás, D., Bellocchi, G., Carrère, P., & Martin, R. (2015). An open platform to assess vulnerabilities to climate change: An application to agricultural systems. *Ecological Informatics*, 30, 389. 396. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2015.10.009>
- Ma, S., Lardy, R., Graux, A.-I., Ben Touhami, H., Klumpp, K., Martin, R., & Bellocchi, G. (2015). Regional-scale analysis of carbon and water cycles on managed grassland systems. *Environmental Modelling & Software*, 72, 356. 371. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.03.007>
- Nemo R., K. Klumpp, K. Coleman, M., Dondini, M., Goulding, K. Hastings, A., Jones, MB., Leifeld, J., Osborne, B., Saunders, M., Scott, T., The, YA., Smith, P. (2016) Soil organic carbon (SOC) equilibrium and model initialisation methods for the Rothamsted Carbon (RothC) model-26.3. *Environmental Modeling and Assessment*, in press
- Panettieri, M., Rumpel, C., Dignac, M.-F., Chabbi, A., 2017 : Does grassland introduction into cropping cycles affect carbon dynamics through changes of allocation of soil organic matter within aggregate fractions? *Science of the Total Environment*, 576, 251-263.
- Rumpel, C., Crème, A., Ngo, P.T., Valesquez, G., Mora, ML, Chabbi, A. 2015: The impact of grassland management on biogeochemical cycles involving carbon, nitrogen and phosphorus. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 15 (2), pp. 353-371.

Présentation aux congress, workshops, conférences :

- Carozzi M., Massad R.S., Martin R., Shtiliyanova A., Klumpp K., Drouet J.L., 2014. Modelling climate change impact on European crop and livestock systems. Open Science Conference: Integrating Impacts Of Air Pollution And Climate Change On Ecosystems, Budapest 1-2 October 2014.
- Carozzi M., Massad R.S., Rumpel C., Crème A., Le Roux X., Poly F., Martin R., Klumpp K., Vuichard N., 2014. AEGES: Attenuation Of Greenhouse Gas Emissions In Grasslands. Workshop "Experimental databases and model of N₂O emissions by croplands: do we have what is needed to explore mitigation options?", Global research Allianz, Paris, 17th-19th March 2014.
- Carozzi M., Massad R.S., Klumpp K., Eza U., Shtiliyanova A., Doruet J-L., Martin R., 2015. Evaluation of GHGs, carbon stocks and yields from European cropping and pasture systems under two climate change scenarios. Climate-Smart Agriculture. Montpellier 16-18 March 2015.
- Carozzi M., Martin R., Klumpp K., Borrás D., Eza U., Rumpel C., Crème A., Le Roux X., Poly F., Chabbi A., Massad R.S., 2015. Interpretation of GHG emissions from mixed crop, grassland and ruminant systems using the FarmSim model. Climate-Smart Agriculture. Montpellier 16-18 March 2015.
- Carozzi M., Massad R.S., Rumpel C., Crème A., Le Roux X., Poly F., Martin R., Klumpp K., Vuichard N., 2014. AEGES: Attenuation Of Greenhouse Gas Emissions In Grasslands. Workshop "Experimental databases and model of N₂O emissions by croplands: do we have what is needed to explore mitigation options?", Global research Allianz, Paris (FR), 17th-19th March 2014.
- Chabbi, A., Cellier, P., Rumpel, C., Gastal, F., Lemaire, G. Cycle du carbone et risques environnementaux dans les écosystèmes prairiaux. Carrefour des Innovations Agronomiques, Poitiers, Octobre 2012.
- Crème, A., Rumpel, C., Massad, R., Lan, T., Romian, A., Chabbi, A. Effect of grassland management on soil organic matter storage and greenhouse gas emissions. 5th International Symposium on Soil Organic Matter Dynamics, Göttingen, Allemagne, Septembre 2015.

Crème, A., Rumpel, C., Gastal, F., Chabbi, A., Effect of fertilizer replacement by introduction of legume species in grasslands on soil nitrogen, carbon and phosphorus and forage yield. International Workshop on Soil Plants and Microorganisms, Pucon, Chili. Décembre 2014.

Crème, A., Rumpel, C., Massad, R., Lan, T., Romain, A., Chabbi, A., 2016 : Effet de la gestion des prairies sur le stockage des matières organiques du sol et les émissions de gaz à effet de serre. Journées AFES, juillet 2016, Louvain de la Neuve, Belgique.

Rumpel, C., Chabbi, A., Brunet, N., Klumpp, K.: Quantification of SOC stocks, SOC changes and quality in relation to management practices across ACBB sites. International workshop SOERE ACBB, Biarritz, France, Septembre 2013.

Rumpel, C., Crème, A., Lan, T., Romain, A., Chabbi, A., 2015 : Les sols de Lusignan : effet du mode de gestion des prairies sur la quantité et composition des matières organiques des sols. Journée de l'Académie d'Agriculture, juin 2015, Lusignan, France

Rumpel, C.: Land-management effects on soil organic matter composition and nutrient forms. Keynote lecture at the workshop: Regulation of soil organic matter and nutrient turnover in agriculture. Witzenhausen, Allemagne, November 2015.

Rumpel, C., Massad, R.S., Crème, A., Carozzi, M., Chabbi, A., Klump, K., Leroux, X., Martin, R., Vuichard, N., 2017. Is it possible to mitigate greenhouse gas emissions from agricultural soil by introduction of temporary grassland into cropping cycles? Global Symposium on soil carbon, mars 2017, FAO Rome, Italie

Articles de vulgarisation

Chabbi, A., Cellier, P., Rumpel, C., Gastal, F., Lemaire, G., 2012. Cycle du carbone et risques environnementaux dans les écosystèmes prairiaux. Innovations Agronomiques, 22, 17-30.

Rumpel, C. and Massad, R., 2013: To graze or not to graze. International Innovations.

Chabbi A., Carrozi M., Gastal F., Giotri A.F., Klumpp K., Lemaire G., Massad R.S., Recous S., Rumpel C., Sanapati N., Vertès F., 2015. Performances des rotations à base de cultures fourragères en termes de gaz à effet de serre (GES) et bilan de carbone. Fourrages, 223, 241-248.

Thèse

Alexandra Crème, (2016) Impacts de la gestion des prairies sur le stockage du carbone et la nature biogéochimique des matières organiques du sol. Université de Poitiers.

Stages de fin de étude (M2):

1. Vieille, M. (2016). Mise en place d'une démarche de modélisation des pertes azotées par lixiviation des nitrates sous parcelles agricoles en contexte Karstique avec le modèle FarmSim. Chambre Interdépartementale d'Agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort
2. Gonzaga-Gomez L., (2014) Mesures et analyses des émissions de gaz à effet de serre sur un système prairie-culture : zoom sur un épisode de retournement de prairie. Université Marne la Vallée.
3. Lan, T. (2014) Effet de la gestion des prairies et du labour sur la fraction de carbone et azote minéralisable. UPMC.
4. Romain, A. (2015) Effets de la gestion des prairies temporaires sur la nature biochimique du carbone dans le sol. Université de Tours.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie et du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr

ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy, and the Ministry for Higher Education and Research. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development.

ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

www.ademe.fr.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr