

# Rapport de stage : Evaluation des émissions de $N_2O$ simulées par le modèle ORCHIDEE à l'échelle globale

Effectué au Laboratoire des Sciences et de l'Environnement (LSCE) du 23 avril 2018 au 29 Juin 2018, soutenance le 12 juin 2018

EDOUARD RAMBAUT Louis-Axel, M1 Ecologie, Biodiversité, Evolution,  
Année universitaire 2017-2018

## Maitres de stage :

- LATHIERE Juliette, Chercheure CNRS -LSCE-IPSL, CEA/CNRS/UVSQ
- VUICHARD Nicolas, Chercheur CEA -LSCE-IPSL, CEA/CNRS/UVSQ

## Tuteur universitaire :

- BAZOT Stéphane, Université Paris-Saclay



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Matériel et Méthodes</b>	<b>4</b>
2.1	Le modèle ORCHIDEE . . . . .	4
2.1.1	Structure générale . . . . .	4
2.1.2	Module de la dynamique de l'azote minérale . . . . .	5
2.1.3	Equations décrivant les émissions de N <sub>2</sub> O . . . . .	5
2.2	Mise en place des simulations . . . . .	6
2.3	Inventaire servant à la comparaison . . . . .	7
2.4	Comparaison EDGAR ORCHIDEE . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Résultats</b>	<b>9</b>
3.1	Emissions dans ORCHIDEE . . . . .	9
3.2	Comparaison de ORCHIDEE avec EDGAR . . . . .	11
3.3	Effets des intrants azotés . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Discussion</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>17</b>
	<b>Références</b>	<b>17</b>

# I Introduction

L'oxyde nitreux ( $N_2O$ ) est un gaz à effet de serre dont la concentration atmosphérique a largement augmenté depuis le début de l'ère industrielle passant de 270 ppb en 1850 à 314 ppb en 1998 (Flechard et al. 2007). Selon les publications les plus récentes, on estime que l'augmentation de la concentration atmosphérique en  $N_2O$  est responsable de 6 % de l'augmentation du forçage radiatif depuis le début de l'ère industrielle (Ciais et al. 2013). Le  $N_2O$  est également un composé particulièrement important pour la chimie atmosphérique. Il est par exemple, un précurseur de composés azotés comme le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote ( $NO_2$ ), ces derniers ayant un effet délétère sur la couche d'ozone (Ravishankara et al., 2009).

L'augmentation de la concentration atmosphérique en  $N_2O$  a été induite par la modification du cycle de l'azote par les activités humaines, comme l'agriculture ou l'industrie, et les émissions que celles-ci ont générées. La découverte du procédé Haber-Bosch de fixation du diazote ( $N_2$ ) de l'atmosphère en azote réactif sous forme d'ammoniac ( $NH_3$ ) en 1909 constitue la révolution majeure dans ce domaine. Ce processus a permis de largement développer la production d'engrais azotés. La production annuelle d'azote réactif à l'échelle globale est ainsi passée d'environ 18 TgN  $an^{-1}$  en 1900 à plus de 150 TgN  $an^{-1}$  en 2000, du fait essentiellement de l'utilisation du procédé Haber-Bosch, et dans une moindre mesure de la combustion de carburants fossiles.

A l'échelle globale, selon une estimation publiée en 2014 les émissions annuelles de  $N_2O$  estimées pour l'année 2005 sont de l'ordre de 16.6 TgN  $an^{-1}$ . 11 TgN  $an^{-1}$  sont émis par les écosystèmes naturels, dont 6.6 TgN  $an^{-1}$  par les écosystèmes terrestres, 3.8 TgN  $an^{-1}$  par les écosystèmes marins et 0.6 TgN  $an^{-1}$  par les réactions chimiques atmosphériques, les 5.3 TgN  $an^{-1}$  restants étant le fruit des activités anthropiques (Davidson et Kanter, 2014). Un autre chiffre de 6.9 Tg N  $an^{-1}$  est avancé pour les seules activités anthropiques par le dernier rapport de l'IPCC, dont plus de 60 % aux activités agricoles, le reste des émissions anthropiques étant attribuées à la combustion de biomasse, aux industries, à l'utilisation d'énergies, aux transports, aux déchets ainsi qu'à l'utilisation de protoxyde d'azote (Ciais, et al. 2013).

Les émissions par les sols, anthropisés (cultures et prairies gérées) et naturels ( prairies non gérées et couverts forestiers) représentent plus de 10 TgN  $an^{-1}$  d'émissions, faisant des sols le plus fort contributeur aux émissions de  $N_2O$  à l'échelle globale, et également l'un des plus sensibles aux activités anthropiques (Ciais, et al. 2013).

Dans les sols, le  $N_2O$  est produit par dénitrification qui transforme les ions nitrates ( $NO_3^-$ ) en formes réduites de l'azote ( $NO_2^-$ ,  $N_2O$  puis  $N_2$ ) en conditions anaérobiques. Le  $N_2O$  est

également produit indirectement par nitrification, processus qui transforme l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) en nitrates en conditions aérobiques. Des facteurs comme la température, l'humidité, la granulométrie et composition des sols, le pH, la disponibilité en carbone organique ou en azote (sous formes oxydées ou réduites), la concentration en  $\text{CO}_2$  ainsi que la couverture végétale sont déterminants et contrôlent l'intensité et la variabilité des émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  par le sol ( Butterbach-Bahl et al., 2013 ; Rowlings et al., 2015). Indépendamment, chacun de ces facteurs peut avoir un impact, mais leurs interactions peuvent mener à des effets non additifs, effets pouvant se révéler plus importants, comme la combinaison de la température, des précipitations et de la disponibilité en azote organique (Brown et al. 2011). Il est à noter que les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  sont marquées par d'importantes variations, tant spatiales que temporelles (Ciais et al. 2013, Flechard et al. 2007). Ainsi un ensemble de relevés d'émissions ponctuels ne peuvent permettre de rendre compte des évolutions des émissions à grandes échelles, tant temporellement que spatialement.

Des estimations à plus grandes échelles peuvent être obtenues par modélisation. Un modèle est une représentation plus ou moins simplifiée des processus réels, se déroulant au sein de différents systèmes (atmosphère, sol, compartiment végétal, etc.), tels que nous les comprenons. Il permet de prendre en compte l'impact des variables influentes, et d'obtenir des estimations qui peuvent être comparées à des données (mesures ponctuelles en situations réelles de terrain ou de laboratoire), afin d'en apprécier la validité. Les inventaires sont obtenus par des approches statistiques, basées sur le produit de facteurs d'émissions avec des données d'activités. Les inventaires sont particulièrement utiles afin d'avoir des bilans d'émissions globaux robustes utilisables pour des études d'impact sur le climat ou la chimie atmosphérique. Ces inventaires ne permettent cependant pas de rendre compte de la totalité des variations spatiales et temporelles des émissions par leur faible description des processus impliqués, et notamment la non-intégration des facteurs climatiques. Il existe également des modèles plus mécanistes représentant eux plus finement les mécanismes de ces émissions et notamment la réponse de ces dernières au changement climatique, comme le modèle ORCHIDEE.

Le but de ce stage est d'évaluer le module d'émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  par les sols du modèle ORCHIDEE (Organizing Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems), un modèle global de végétation du fonctionnement des écosystèmes terrestres. Un travail pionnier (Prieur, 2012) a été réalisé à l'aide d'une ancienne version du modèle (nommée O-CN) visant pour l'essentiel à comparer les émissions simulées de  $\text{N}_2\text{O}$  par les sols à des mesures sur site et à des inventaires à l'échelle de la France. Les objectifs de mon stage sont d'évaluer la version actuelle du modèle - qui a bénéficié de nombreux développements depuis 2012 - et de mener cette évaluation aux échelles globales et continentales. Pour ce faire, nous comparerons les émissions calculées par le modèle ORCHIDEE pour les années 1970 à

2012 à celles issues de l'inventaire EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research).

## 2 Matériel et Méthodes

### 2.1 Le modèle ORCHIDEE

#### 2.1.1 Structure générale

Le modèle ORCHIDEE décrit les bilans et flux d'eaux, d'énergie (de Rosnay et Polcher, 1998), de carbone (Krinner et al., 2005), et d'azote (Zaehle et Friend, 2010) au sein des écosystèmes terrestres, à l'échelle du globe.

Au sein d' ORCHIDEE, les différentes espèces végétales existantes sont regroupés en types fonctionnels (PFT, Plant Functionnal Type), définis selon le climat, le métabolisme associé (C3 ou C4 pour les strates espèces herbacées), les types de feuilles ainsi que leur phénologie. Il y a un total de 13 PFT dans ORCHIDEE, dont 10 pour les forêts, 2 pour les prairies, 2 pour les cultures, et un pour le sol nu. (Voir tableau 1). Les processus modélisés dans ORCHIDEE sont représentés par un même jeu d'équations dont les paramètres diffèrent d'un PFT à l'autre. Les proportions de chaque PFT présent au sein de chacune des mailles de la région étudiée est prescrite à l'aide d'une carte de végétation lue en début de chaque simulation par le modèle ORCHIDEE.

TAB. 1 : Liste des différents PFT pris en compte dans ORCHIDEE

PFT											
Arbre					Herbacé						
Feuillu					Résineux		Prairie		Culture		
Persistante		Caduque		Persistante		Caduque		C3	C4	C3	C4
Tropical	Tempréré	Tropical	Tempréré	Boréal	Tempréré	Boréal	Boréal				

Les différents stocks d'azotes caractérisés dans le modèle sont ceux de la végétation, de la litière, de la matière organique et des éléments minéraux du sol. La plante assimile les formes minérales ammoniac et nitrate présentes dans le sol. Au travers de différents évènements du cycle de vie de la plante (sénescence, mortalité), l'azote présent dans la végétation passe dans la litière, puis se décompose dans la matière organique du sol. La minéralisation de la matière organique transforme l'azote de la matière organique en éléments

minéraux simples, tels que l'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), le nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) et en d'autres formes inorganiques comme le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ou le diazote ( $\text{N}_2$ ). La figure 1 schématise les principaux réservoirs d'azote représentés dans le modèle ORCHIDEE ainsi que les processus conditionnant les flux entre ces stocks.

### 2.1.2 Module de la dynamique de l'azote minérale

Le module de l'azote minérale représente les flux d'azote relatif à la nitrification et à la dénitrification à travers de la fixation biologique par les végétaux ainsi que le dépôt associé à ces derniers, le lessivage et la lixiviation d'ammonium et de nitrates, le dépôt atmosphérique d'azote et les émissions de  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  et  $\text{N}_2\text{O}$ . Les flux de dépôt, d'ajouts d'intrants azotés et de fixation biologique sont des informations fournies au modèle sous forme de carte en début de simulation. Comme représenté sur la figure 1, l'ensemble des processus précédemment listés sont calculés à une résolution de 30 minutes (Zaehle et al. 2010).

Il est à noter que les flux de lessivage et de lixiviation des composés azotés sont sortis du modèle.

### 2.1.3 Equations décrivant les émissions de $\text{N}_2\text{O}$

La représentation dans ORCHIDEE de la production de  $\text{N}_2\text{O}$  par nitrification et, dénitrification ainsi que les émissions vers l'atmosphère associées sont basées sur les travaux de Li et al. 1992 et Xu-Ri et Prentice 2008 .

La production de  $\text{N}_2\text{O}$  (en  $\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{0.5h}^{-1}$ ) est la somme des émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  par nitrification et dénitrification et est telle que :

$$R_{N_2O} = R_{N_2O,nit} + R_{N_2O,den} = a_{nit} * f(T1) * r_{nit} + b_{den} * f(T2) * f(pH) * r_{den}$$

avec  $R_{N_2O,nit}$  et  $R_{N_2O,den}$  les émissions causées respectivement par les activités de nitrification et dénitrification ;  $a_{nit}$  et  $b_{den}$  les fractions d'émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  par nitrification et dénitrification ;  $f(T1)$  et  $f(T2)$  sont les fonctions d'impact de la températures respectivement sur la nitrification et la dénitrification ;  $r_{nit}$  et  $r_{den}$  les taux journaliers de nitrification et de dénitrification (en  $\text{gN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ) ;  $f(pH)$  la fonction rendant compte de l'effet du pH sur la quantité de  $\text{N}_2\text{O}$  produite par dénitrification par rapport à la production d'oxydes d'azotes ( $\text{NO}_x$ ) et de diazote ( $\text{N}_2$ ).

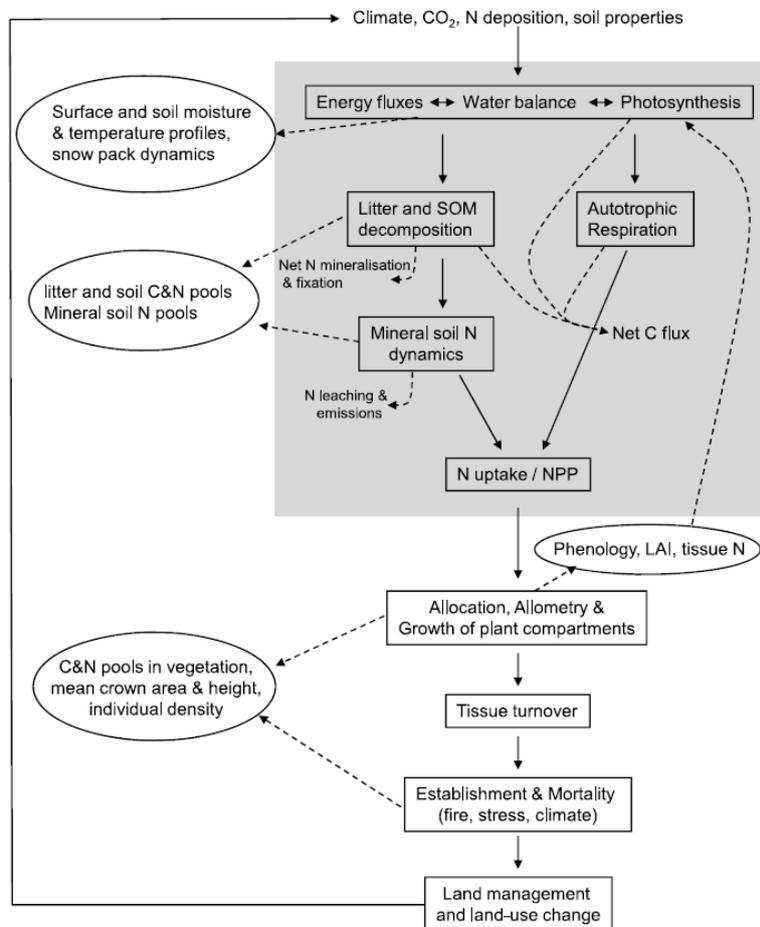


FIG. 1 : Schéma représentatif des différents processus représentés dans ORCHIDEE relatifs au cycle du carbone et de l'azote (Zaehle et al. 2010).

A la fin de chaque pas de temps (30 minutes pour les flux de composés azotés) les quantités d'azotes dans chacun des compartiments du sol sont modifiées.

## 2.2 Mise en place des simulations

La simulation du modèle ORCHIDEE étudiée rend compte de l'évolution des émissions de N<sub>2</sub>O de 1860 à 2015 sous l'effet de l'ensemble des forçages décrits ci-dessous.

La résolution spatiale utilisée pour cette simulation est de 0.5°\*0.5°. Les informations nécessaires au modèle sont apportées par les différents jeux de données suivants, pour la période de 1860 à 2015 sauf mentions contraires :

1 – Les variables climatiques telles que l'humidité, les précipitations, la pression atmosphérique, le rayonnement solaire (grandes et petites longueurs d'onde), la température et les vents sont issus du jeu de données CRU-NCEP développé par le LSCE ; il s'agit de la fusion des jeux de données du CRU (Climatic Research Unit) et du NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research)

s'étendant sur la période 1901-2015. Les données ainsi obtenues peuvent présenter une résolution de 6h ou 1 journée selon notre choix. (Viovy 2018)

2 – La concentration en CO<sub>2</sub> est issue du jeu de donnée basé sur des mesures atmosphériques ainsi que sur des mesures de concentration de CO<sub>2</sub> dans des carottes de glaces (GLOBALVIEW-CO<sub>2</sub>, 2013). Cette variable est particulièrement importante pour son rôle sur la croissance des végétaux impactant directement le cycle de l'azote.

3 – Les cartes de végétation sont issues de la Synergetic land Cover Product (SYNMAP, <ftp://ftp.bgc-jena.mpg.de/pub/outgoing/mjung/SYNMAP/>). La végétation au sein de SYNMAP a été classifiée en groupes fonctionnels selon le type de feuille et la longévité de la feuille. Ces groupes fonctionnels de couverts ont été adaptés aux PFT du modèle ORCHIDEE.

4 – Les dépôts d'azote à la surface terrestre, formes azotées réduites NH<sub>x</sub>-N et oxydées NO<sub>y</sub>-N sont issues de simulation avec le modèle de Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI). Les émissions de ces composés ainsi que leur transport, que ce soit depuis des sources naturelles ou anthropiques ont été considérées dans l'élaboration de ces données. (Eyring et al. 2013) (<https://blogs.reading.ac.uk/ccmi/forcing-databases-in-support-of-cmip6/>).

5 – Les intrants azotés ont été estimés par (KLEIN Goldewijk et al. 2016 et Lu et al. 2016).

6 – Les productions et dépôts de lisiers ont été estimés par (Zhang et al. 2017).

### **2.3 Inventaire servant à la comparaison**

La base de données de l'inventaire EDGAR (Janssens-Maenhout, et al. 2017, [http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=432\\_GHG&SECURE=123](http://edgar.jrc.ec.europa.eu/overview.php?v=432_GHG&SECURE=123)) sera utilisé pour l'évaluation des sorties du modèle ORCHIDEE. Ce jeu de données décrit l'ensemble des flux d'émissions de N<sub>2</sub>O anthropiques depuis 1970 jusqu'en 2012. Les différentes catégories des sources d'émissions sont : la production et la consommation d'énergies, les processus industriels, l'utilisation de N<sub>2</sub>O comme solvants, l'agriculture, les émissions de N<sub>2</sub>O par des zones non anthropisées par lessivage d'intrants azotés agricoles et les déchets. Dans notre étude, la comparaison sera effectuée en considérant les émissions des sols agricoles et les émissions induites par l'agriculture par le lessivage des composés azotés. Les catégories considérées au sein de l'inventaire EDGAR sont basés sur la classification de l'IPCC 1996 : 4C et 4D (agricultural soils) et 4D3 (Indirect N<sub>2</sub>O emissions from agriculture), cette dernière catégorie faisant partie de l'ensemble précédent.

Les émissions de N<sub>2</sub>O des sols dans les inventaires EDGAR sont basées sur le calcul des émissions de N<sub>2</sub>O, produit des apports en azotes et de facteurs d'émissions, globaux ou

plus précis et définis par pays. Les émissions totales sont calculées comme la somme des émissions directes, liées aux processus de dénitrification et de nitrification, et des émissions indirectes, liées aux processus de lessivages et de lixiviations. La non-prise en compte de nombreux paramètres comme la température et l'utilisation de facteurs d'émissions globaux non spécifiques à la région, entraînent une certaine incertitude, même si des spécifications des facteurs d'émissions par pays permettent d'avoir des estimations plus précises à l'échelle de ce pays. Les estimations effectuées par EDGAR ont suivi les recommandations de l'IPCC en termes d'utilisation des facteurs d'émissions (IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use).

## 2.4 Comparaison EDGAR ORCHIDEE

Les estimations du modèle ORCHIDEE et les estimations de l'inventaire EDGAR, étant de nature différentes il est nécessaire de les traiter afin de pouvoir les comparer.

Il est à noter que les estimations d'EDGAR ne portent que sur les émissions de  $N_2O$  causées directement et indirectement par les activités anthropiques, alors que les émissions calculées par ORCHIDEE portent elles sur l'ensemble des émissions de protoxyde d'azote par les sols. Ainsi toutes catégories confondues, les émissions estimées de  $N_2O$  par EDGAR ne correspondent pas aux émissions calculées par ORCHIDEE (Janssens-Maenhout et al. 2017).

On ne considérera donc que les émissions dans ORCHIDEE provenant des couverts végétaux anthropisés (couverts cultureux et pâturages). Afin de ne prendre en compte que les prairies (PFT 10 et 11) gérées et non naturelles, nous n'avons inclus dans nos bilans que les surfaces des PFT où les fertilisants azotés sont appliqués. Les émissions de EDGAR que j'ai utilisé correspondent à la différence entre les émissions des sols agricoles (4C 4D) et les émissions indirectes depuis l'agriculture (4D3). Ces dernières émissions sont celles induites par les composés azotés lessivés des couverts agricoles. Les composés azotés lessivés étant sortis du modèle ORCHIDEE ; nous n'en avons pas tenu compte dans la composante EDGAR.

J'ai mené cette comparaison pour les émissions annuelles globales de 1970 à 2012 ainsi que les moyennes des émissions régionales sur les périodes 1970-1975 et 2007-2012.

Pour ce travail j'ai utilisé R tant pour les statistiques que pour la représentation des données. Pour les figures 2 et 3, les courbes de régression ont été effectuées sous R à l'aide du package ggplot 2, et de la méthode loess, ces courbes n'ont qu'un intérêt qualitatif servant à représenter la tendance globale. Afin de manipuler les fichiers de données de format NetCDF j'ai utilisé les logiciels CDO et NCO afin de concaténer les fichiers et de mo-

difier la résolution spatiale de l'inventaire EDGAR, d'une résolution initiale de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  à une résolution finale plus grossière identique à celle des résultats issus de ORCHIDEE de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Afin d'effectuer des bilans et études à l'échelle régionale, j'ai utilisé des masques permettant d'isoler les régions.

### 3 Résultats

#### 3.1 Emissions dans ORCHIDEE

Au cours de cette étude, j'ai d'abord analysé les émissions globales de  $N_2O$  estimées par le modèle ORCHIDEE afin d'en apprécier la répartition globale ainsi que leur évolution sur la durée totale de la simulation.

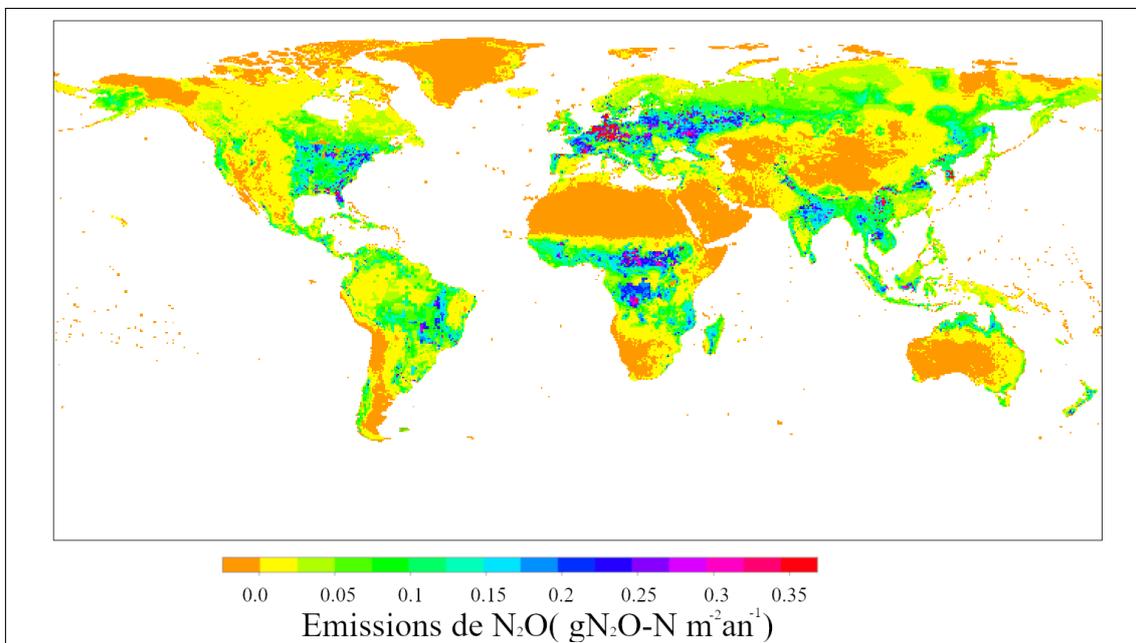


FIG. 2 : Emissions de  $N_2O$  (en  $gN_2O-N.m^{-2}.an^{-1}$ ) estimées par ORCHIDEE pour la période 2010-2015 pour tous les PFT.

La région composée de l'Allemagne, des Pays-Bas et du Danemark est la région où les émissions de  $N_2O$  par les sols (pour toutes surfaces, forêts, prairies, cultures) simulées par ORCHIDEE sont les plus élevées, avec une valeur d'environ  $0.35 gN_2O-N.m^{-2}.an^{-1}$  pour la période 2010-2015 (Figure 2). Les émissions de  $N_2O$  sont élevées ( $>0,2 gN.m^{-2}.an^{-1}$ ) en Europe de l'Est, à l'est de l'Amérique du Nord et en Afrique de l'Ouest. Les émissions restent élevées ( $>0.15 gN.m^{-2}.an^{-1}$ ) dans le centre de l'Inde et en Asie du Sud-Est.

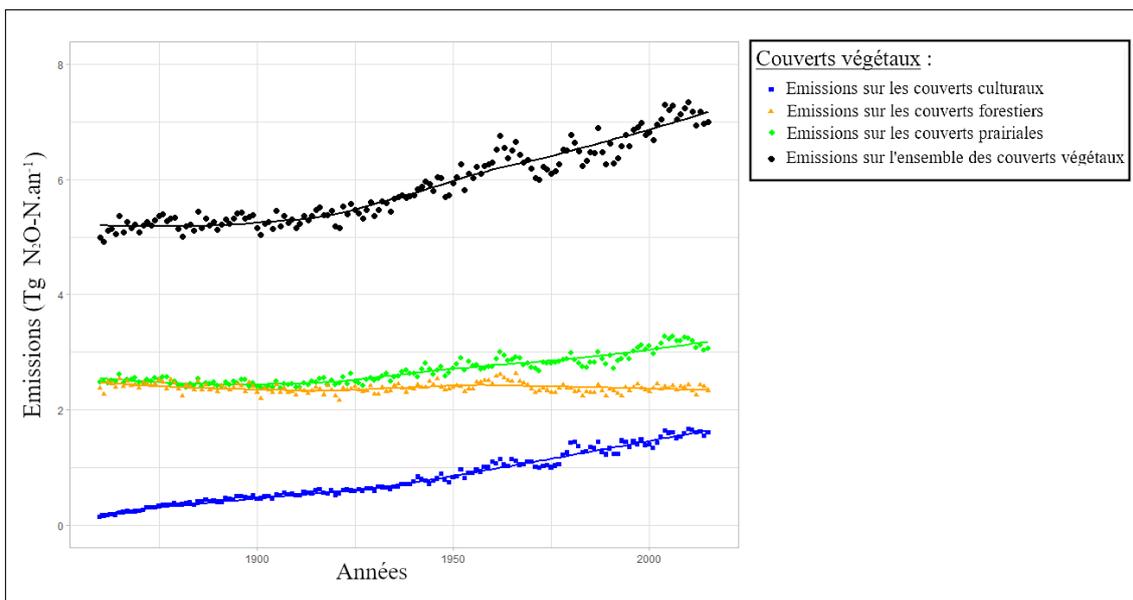


FIG. 3 : Emissions annuelles de  $N_2O$  par différents couverts végétaux calculées par le modèle ORCHIDEE pour l'ensemble du globe (en Tg  $N_2O-N.an^{-1}$ )

Les émissions globales de  $N_2O$  estimées par le modèle ORCHIDEE augmentent depuis le début du XXe siècle (figure3) , de 4.99 Tg N en 1860 à 7.18 Tg N en 2012 (+ 44%). Les émissions issues des couverts culturaux et prairiaux sont en augmentation, de 2.62 Tg N en 1860 à 4.84 TgN en 2012 (+ 85%), alors que les émissions issues des couverts forestiers sont stables, de 2.38 Tg N en 1860 à 2.33 Tg + en 2012 (-2%). Les couverts culturaux représentent 3% des émissions totales en 1860 et 23% en 2015. Les couverts prairiaux représentent 50% des émissions totales en 1860 et 45% en 2015. Les couverts forestiers représentent 47% des émissions totales en 1860 et 32% en 2015.

### 3.2 Comparaison de ORCHIDEE avec EDGAR

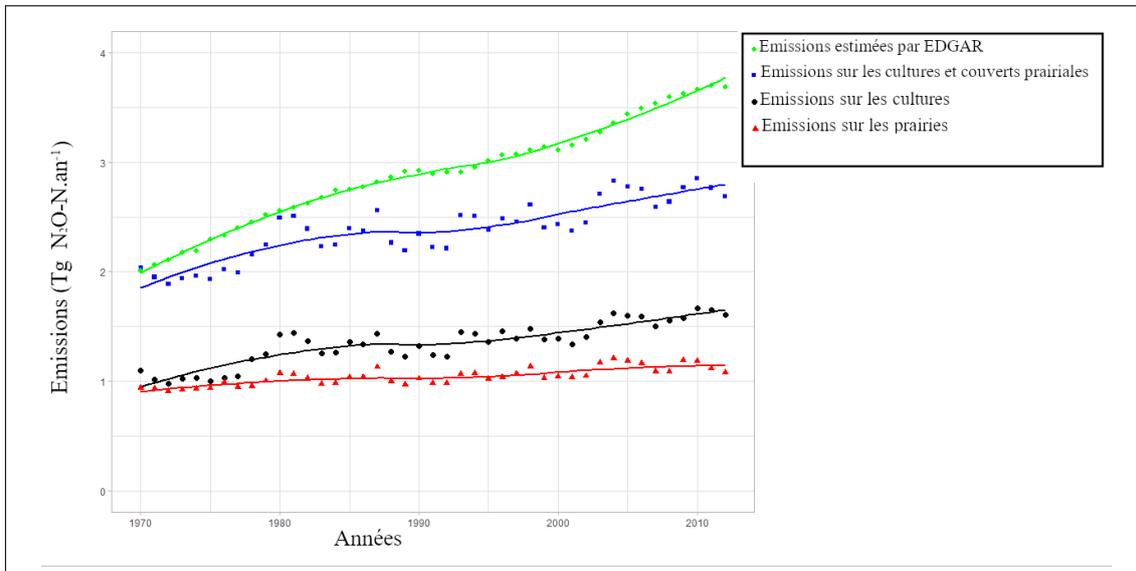


FIG. 4 : Emissions de N<sub>2</sub>O estimées par EDGAR et ORCHIDEE entre 1970 et 2012 (en Tg N<sub>2</sub>O-N.an<sup>-1</sup>)

Pour la période de 1970 à 2012 (figure 4) les émissions de N<sub>2</sub>O sur les sols agricoles estimées par EDGAR augmentent de 2.01 Tg N en 1970 à 3.69 Tg N en 2012 (+ 84%). Sur la même période les émissions estimées par ORCHIDEE augmentent de 2.07 Tg N à 2.76 Tg N (+ 33%). Sur la période 1970-2012, les émissions provenant des cultures sont en fortes augmentations de 1.09 Tg N en 1970 à 1.64 Tg N en 2012 (+ 50%). Les émissions issues des sols prairiaux augmentent également, mais plus faiblement, de 0.98 Tg N en 1970 à 1.12 Tg N en 2012 (+ 14%).

Aussi, pour les années 1970-1975 les émissions estimées par ORCHIDEE pour les cultures et les prairies gérées sont dans le même ordre de grandeur, tandis que, pour la période 2007-2012, les émissions sur les sols en culture sont 40% plus importantes que celles estimées pour les prairies gérées.

Les émissions des couverts prairiaux des figures 3 et 4 ne correspondent pas aux mêmes émissions. Les émissions des couverts prairiaux de la figure 4 correspondent aux émissions des couverts prairiaux anthropisés uniquement, alors que la figure 4 représente les émissions de l'ensemble des couverts prairiaux.

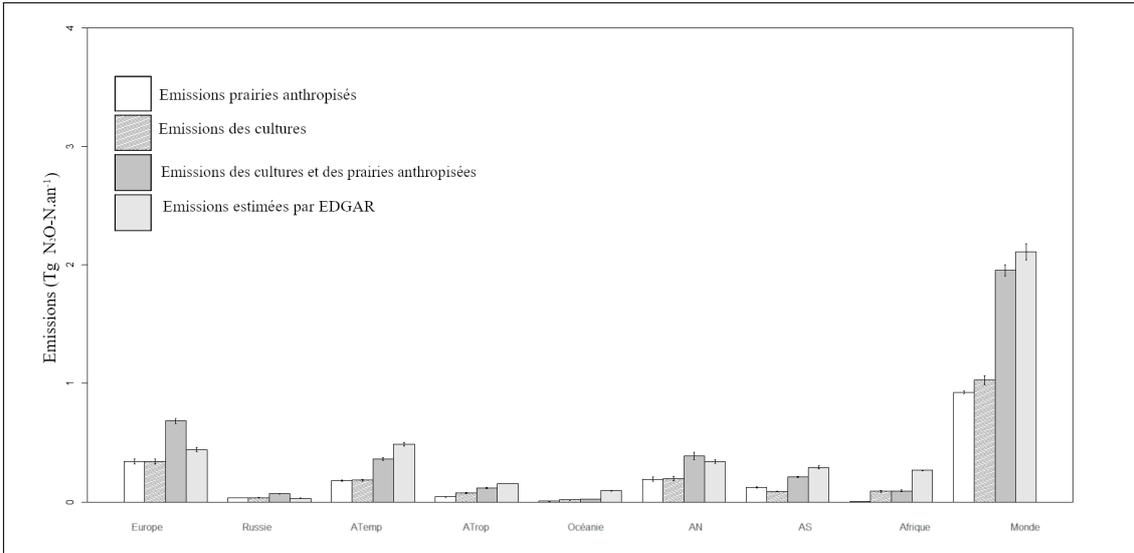


FIG. 5 : Emissions moyennes estimées de  $N_2O$  pour chaque région et à l'échelle globale par EDGAR et ORCHIDEE pour la période 1970-1975 (en  $Tg N_2O-N.an^{-1}$ ). Les Écarts-types sont représentés par les barres de variations. Les régions Asie tempérées, Asie tropicale, Amérique du Nord et Amérique du Sud sont nommées par les acronymes respectifs suivants « ATemp », « ATrop », « AN », « AS ».

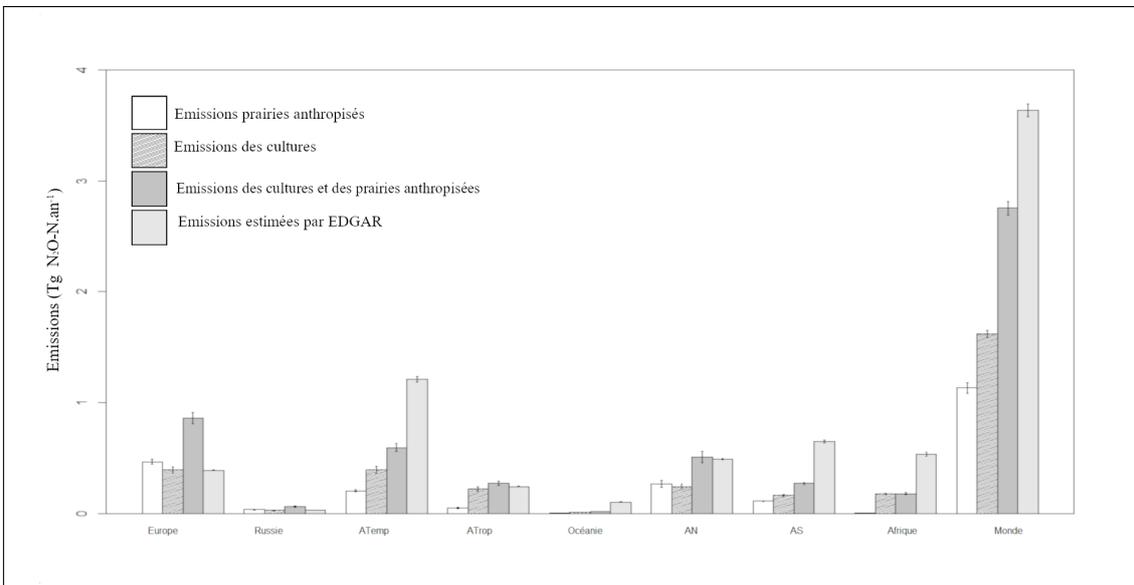


FIG. 6 : Emissions moyennes estimées de  $N_2O$  pour chaque région et à l'échelle globale par EDGAR et ORCHIDEE pour la période 2007-2012 (en  $Tg N_2O-N.an^{-1}$ ). Les Écarts-types sont représentés par les barres de variations. Les régions Asie tempérées, Asie tropicale, Amérique du Nord et Amérique du Sud sont nommées par les acronymes respectifs suivants « ATemp », « ATrop », « AN », « AS ».

Pour la période 1970-1975 les estimations par EDGAR et ORCHIDEE sont significativement différentes pour l'ensemble des régions concernées, à un seuil  $\alpha=5\%$ .

Pour la période 1970-1975 (figure 5), les émissions en Europe et en Russie calculées par ORCHIDEE sont plus élevées que celle de l'inventaire EDGAR (respectivement +54% et +126%). Dans les autres régions, les émissions calculées par ORCHIDEE sont plus faibles. La région émettant le plus de N<sub>2</sub>O dans l'inventaire EDGAR est l'Asie tempérée (ATemp) avec 23.2% des émissions totales, contre 18% dans ORCHIDEE. La région émettant le plus de N<sub>2</sub>O dans le modèle ORCHIDEE est l'Europe avec 34.7% des émissions totales, contre 21% dans EDGAR.

Les principales différences d'estimations entre EDGAR et ORCHIDEE se situent dans les régions d'Europe (différence de 0.24 Tg N.an<sup>-1</sup>, les estimations d'ORCHIDEE étant 54% plus importantes que celles d'EDGAR), d'Asie tempérée (différence de 0.13 Tg N.an<sup>-1</sup>, les estimations d'ORCHIDEE étant 36% plus faibles que celles d'EDGAR) et d'Afrique (différence de 0.17 Tg N.an<sup>-1</sup>, les estimations d'ORCHIDEE étant 186% plus faibles que celles d'EDGAR). Les différences au sein de régions comme la Russie et l'Océanie sont plus importantes (respectivement ORCHIDEE : +126% et EDGAR : + 350%), mais représentent chacune moins de 0.1 Tg N.an<sup>-1</sup> d'émissions.

Pour la période 2007-2012 les estimations par EDGAR et ORCHIDEE sont significativement différentes pour l'ensemble des régions concernées, à un seuil alpha=5% excepté pour l'Amérique du Nord (AN) (pvalue=0.5032).

Pour la période 2007-2012 (figure 6), les estimations des émissions sont plus importantes que pour la période (1970-1975) pour l'ensemble des régions hormis pour la Russie et l'Océanie où les émissions estimées par EDGAR et ORCHIDEE sont restées stables.

Les émissions en Europe, en Russie et Asie tropicale (ATrop) sont plus importantes dans ORCHIDEE par rapport à EDGAR (respectivement +120%, +125%, +50%). Dans les autres régions, les émissions calculées par ORCHIDEE sont plus faibles. La région émettant le plus de N<sub>2</sub>O dans l'inventaire EDGAR est l'Asie tempérée avec 33% des émissions totales, contre 21% dans ORCHIDEE. La région émettant le plus de N<sub>2</sub>O dans le modèle ORCHIDEE est l'Europe avec 31.1% des émissions totales, contre 11% dans EDGAR.

Les principales différences d'estimations entre EDGAR et ORCHIDEE se situent dans les régions d'Europe avec une différence de 0.47 Tg N.an<sup>-1</sup>, les estimations d'ORCHIDEE étant 120% plus importantes que celles d'EDGAR, d'Asie tempérée avec une différence de 0.62 Tg N.an<sup>-1</sup>, les estimations d'ORCHIDEE étant 105% plus faibles que celles d'EDGAR et en Afrique avec une différence de 0.35 Tg N.an<sup>-1</sup>, les estimations d'ORCHIDEE étant 194% plus faibles que celles d'EDGAR.

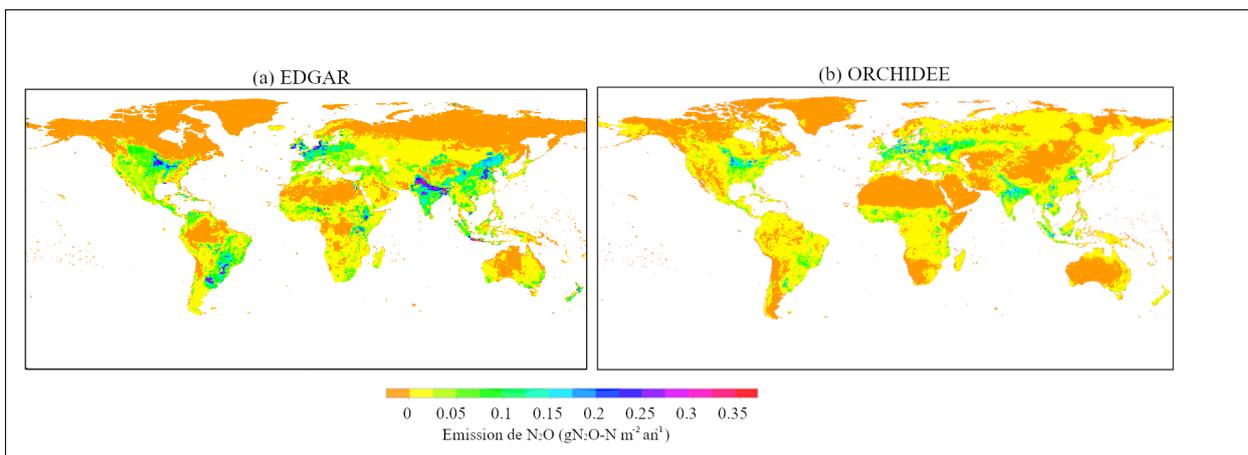


FIG. 7 : Emissions moyennes de  $N_2O$  (en  $gN.m^{-2}.an^{-1}$ ) par EDGAR à l'échelle globale pour la période 2007-2012 estimées par EDGAR (a) et par ORCHIDEE (b)

La répartition spatiale des émissions de  $N_2O$  calculées par l'inventaire EDGAR (figure 7a) pour la période 2007-2012 a des motifs similaires aux estimations du modèle ORCHIDEE (figure 7b). Dans les hautes latitudes de l'hémisphère Nord, les émissions calculées par EDGAR et par ORCHIDEE sont faibles ( $<0.05gN.m^{-2}.an^{-1}$ ), des émissions de mêmes intensités sont retrouvées dans les déserts, zones de hautes montagnes et en Amazonie. A l'inverse les valeurs calculées par ORCHIDEE et par EDGAR plus élevées ( $>0.05gN.m^{-2}.an^{-1}$ ) sont localisées à l'ouest de l'Europe, à l'est de l'Amérique du Nord, au sud-est de l'Amérique du Sud, en Inde, sur la côte de l'Asie de l'est et du sud-est.

Les régions pour lesquels les émissions diffèrent le plus sont l'Europe centrale et de l'est ainsi que l'ouest de l'Amérique du Nord. Pour les deux premières les émissions calculées par EDGAR sont limitées ( $<0.15gN.m^{-2}.an^{-1}$ ) alors que les émissions calculées par ORCHIDEE y sont plus importantes (jusqu'à  $0.25gN.m^{-2}.an^{-1}$ ). En outre, des émissions de l'ordre de  $0.1gN.m^{-2}.an^{-1}$  sont calculées par ORCHIDEE jusque profondément en Russie contrairement à EDGAR, qui n'y mesure que des émissions inférieures à  $0.025gN.m^{-2}.an^{-1}$ . Pour l'ouest de l'Amérique du nord, les émissions calculées par EDGAR sont importantes ( $>0.1gN.m^{-2}.an^{-1}$ ) alors que les émissions calculées par ORCHIDEE le sont moins ( $<0.025gN.m^{-2}.an^{-1}$ ).

Les valeurs maximales d'émissions dans EDGAR sont plus importantes ( $>0.35gN.m^{-2}.an^{-1}$ ) que les émissions maximales d'ORCHIDEE ( $0.25gN.m^{-2}.an^{-1}$ ).

### 3.3 Effets des intrants azotés

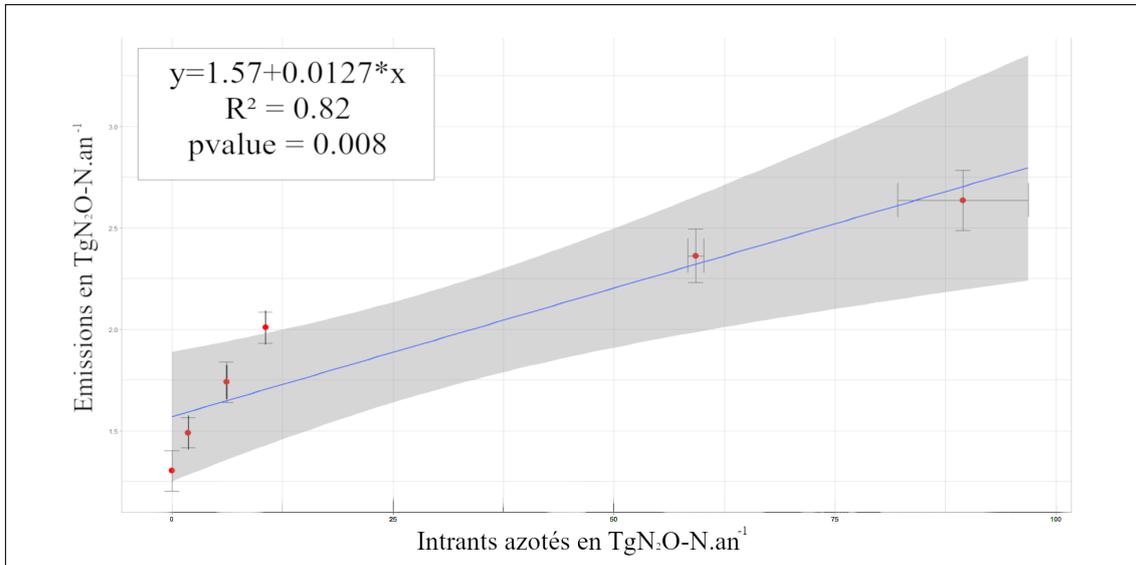


FIG. 8 : Emissions globales annuelles de  $N_2O$  ( $TgN.an^{-1}$ ) calculées par ORCHIDEE e fonctions des intrants azotés ( $TgN.an^{-1}$ ). En bleu est représentée la régression linéaire et la zone grisée correspondant à l'intervalle de confiance de la régression.

Les émissions de  $N_2O$  estimées par ORCHIDEE sont positivement corrélées ( $R^2= 0.82$ ) avec l'augmentation des intrants azotés. On observe une régression linéaire telle que :  $Emissions=1.57+0.0127*intrants$  (figure 8)

## 4 Discussion

Qualitativement, les zones d'émissions entre le modèle ORCHIDEE et l'inventaire EDGAR sont sensiblement les mêmes avec les mêmes zones d'émissions principales, concentrées dans les zones à fortes activités agricoles, et les zones aux émissions très faibles dans les zones désertiques, froides, montagneuses et en Amazonie.

Les analyses que j'ai pu effectuer ont mis en évidence une augmentation des émissions globales de  $N_2O$  sur la période 1970-2012 calculées par le modèle ORCHIDEE (figure 4). Sur la même période, les estimations de l'inventaire EDGAR augmentent aussi, mais plus fortement que les estimations du modèle ORCHIDEE .

J'ai pu observer une erreur dans les forçages relatifs aux intrants azotés au sein de la simulation ORCHIDEE. La quantité d'intrants azotés utilisés dans la simulation n'a pas été correctement actualisée. Les valeurs de forçages ont été conservées pour des périodes de 20 ans au lieu d'être renouvelés tous les ans. La quantité d'intrants azotés étant en augmentation exponentielle à l'échelle globale depuis la découverte du procédé Haber-Bosch, la

non-prise en compte de l'augmentation des intrants tous les ans a entraîné une limitation des intrants appliqués à l'échelle mondiale. Cette limitation est à l'origine d'une réduction des estimations des émissions de  $N_2O$ , surtout dans les régions où l'apport d'intrants azotés a particulièrement augmenté depuis les années 1970. Cette limitation peut expliquer les plus faibles estimations d'ORCHIDEE dans ces régions en comparaison avec l'inventaire EDGAR. Dans les régions du nord où les quantités d'intrants azotés sont en diminution depuis cette période, on a là un dépassement des fertilisants réels. Ce dépassement peut expliquer les plus importantes estimations d'émissions dans ORCHIDEE dans ces régions face à EDGAR (figure 5 et 6)

Une rectification de ce forçage permettrait d'avoir accès à des données non faussées plus clairement comparables quantitativement avec les données obtenues dans EDGAR.

Il peut également être observé une différence d'estimations à l'intérieur même des régions où l'on peut observer des différences de répartition des émissions. On peut évoquer une plus importante estimation des émissions en Europe de l'Est dans le modèle ORCHIDEE que dans l'inventaire EDGAR. En effet, quand EDGAR calcule une baisse des émissions en Europe de l'est et en Russie au début des années 1990, ORCHIDEE ne calcule pas de baisse majeure. Cette diminution dans les estimations des émissions par EDGAR peut être mise sur le compte d'une baisse d'activité liée à la chute de l'URSS (figure 8). Il convient de noter que les estimations d'émissions ayant été comparés entre l'inventaire EDGAR et le modèle ORCHIDEE, les estimations ne correspondent par rigoureusement aux mêmes d'émissions, ORCHIDEE et EDGAR étant construits autour d'approches et de forçages différents.

La variabilité interannuelle des émissions estimées entre ORCHIDEE et EDGAR était différentes. Ainsi si les courbes d'émissions annuelles de EDGAR sont monotones, les courbes d'émissions d' ORCHIDEE sont elles, plus variables. Cela s'observe également au niveau des figures 4 et 5 où les écarts-types des moyennes d'émissions sont plus importants dans ORCHIDEE par rapport à ceux de EDGAR, +70% pour la période 2007-2012. Cette plus grande variabilité interannuelle peut être le fait de la prise en compte de composantes notamment climatique dans le modèle ORCHIDEE et de leur non-prise en compte dans l'inventaire EDGAR (figure 5 et 6).

Au sein du modèle ORCHIDEE, est observée une réponse des émissions aux intrants azotés de 1.27% (figure 7). Cette valeur est légèrement supérieure au facteur d'émission préconisé par l'IPCC et utilisé au sein de l'inventaire EDGAR, étant lui de 1% mais reste dans des ordres de grandeur similaires. Cette réponse semble indiquer que les importantes différences d'émissions observées entre EDGAR et ORCHIDEE ne sont pas causées par un problème de modélisation des émissions, mais sont possiblement imputables aux diffé-

rences de surfaces agricoles, aux estimations de quantités de fertilisants considérées dans EDGAR et ORCHIDEE et aux erreurs de forçages.

## 5 Conclusion

Au cours de cette étude a été mis en place une comparaison des estimations des émissions de N<sub>2</sub>O par le modèle ORCHIDEE avec les estimations de l'inventaire EDGAR.

Les estimations d'émissions du modèle et de l'inventaire sont à quelques exceptions près la même répartition sur la surface du globe.

Les estimations par le modèle ORCHIDEE sont faibles, tant par rapport à l'inventaire EDGAR que par rapport à d'autres modèles participant comme ORCHIDEE au projet d'intercomparaison de modèles relatifs au N<sub>2</sub>O. Ces derniers estiment pour les années 2010 des émissions totales annuelles de plus de 10 Tg N (tian et al. 2018) contre 7 Tg N (figure 3) par le modèle ORCHIDEE. Cette plus faible estimation dans le modèle ORCHIDEE pourrait être en partie causée par une erreur d'exécution des forçages, ayant limité l'apport d'intrants azotés sur l'ensemble des surfaces, et par des différences de structures et de paramétrages des modèles. La différence d'estimation entre le modèle ORCHIDEE et l'inventaire EDGAR peut-être également due au non-recoupement des catégories comparées entre ORCHIDEE et EDGAR, à des forçages de végétation et de fertilisants différents, ainsi qu'à une non-prise en compte de facteurs climatiques dans les estimations de l'inventaire EDGAR. la non prise en compte de certains facteurs par EDGAR peut également expliquer la plus grande variabilité des estimations d'émissions d'ORCHIDEE par rapport à l'inventaire EDGAR ; les émissions de l'inventaire EDGAR étant principalement entraînées par la quantité d'intrants azotés.

Le facteur d'émission de N<sub>2</sub>O en réponse aux fertilisants azotés observé dans ORCHIDEE est cohérent avec les valeurs utilisées au cours de la construction d'inventaires, semblant indiquer la conformité du modèle sur ce point. Ainsi une nouvelle simulation avec des forçages non biaisés pourra être mise en place afin d'obtenir de nouvelles estimations d'émissions comparables avec l'inventaire EDGAR ou d'autres modèles au sein du NMIP (N<sub>2</sub>O Model Intercomparison Project).

## Références

- [1] Cooperative Global Atmospheric Data Integration Project. 2013, updated annually. Multi-laboratory compilation of synchronized and gap-filled atmospheric car-

bon dioxide records for the period 1979-2012 (obspack\_co2\_1\_GLOBALVIEW-CO2\_2013\_v1.0.4\_2013-12-23).

- [2] J. R. Brown, J. C. Blankinship, A. Niboyet, K. J. van Groenigen, P. Dijkstra, X. Le Roux, P. W. Leadley, and B. A. Hungate. Effects of multiple global change treatments on soil N<sub>2</sub>O fluxes. *Biogeochemistry*, 109(1-3) :85–100, 2012.
- [3] K. Butterbach-Bahl, E. M. Baggs, M. Dannenmann, R. Kiese, and S. Zechmeister-Boltenstern. Nitrous oxide emissions from soils : how well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 368(1621) :20130122–20130122, 2013.
- [4] P. Ciais, C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. L. Quéré, R. Myneni, S. Piao, and P. Thornton. The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Change, IPCC Climate*, pages 465–570, 2013.
- [5] P. J. Crutzen, A. R. Mosier, K. A. Smith, and W. Winiwarter. comment - N<sub>2</sub>O release from fertilizer use in biofuel production N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels N<sub>2</sub>O release from fertilizer use in biofuel production. *Atmos. Chem. Phys. Discuss. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 7 :11191–11205, 2007.
- [6] E. A. Davidson and D. Kanter. Inventories and scenarios of nitrous oxide emissions. *Environmental Research Letters*, 9(10), 2014.
- [7] P. de Rosnay and J. Polcher. Modelling root water uptake in a complex land surface scheme coupled to a GCM, 1998.
- [8] S. J. Del Grosso, T. Wirth, S. M. Ogle, and W. J. Parton. Estimating agricultural nitrous oxide emissions. *Eos*, 89(51) :529, 2008.
- [9] V. Eyring, J.-F. Lamarque, P. Hess, F. Arfeuille, K. Bowman, M. P. Chipperfield, B. Duncan, A. Fiore, A. Gettelman, M. A. Giorgetta, C. Granier, M. Hegglin, D. Kinison, M. Kunze, U. Langematz, B. Luo, R. Martin, K. Matthes, P. A. Newman, T. Peter, A. Robock, T. Ryerson, A. Saiz-Lopez, R. Salawitch, M. Schultz, T. G. Shepherd, D. Shindell, J. Stählerin, S. Tegtmeier, L. Thomason, S. Tilmes, J.-P. Vernier, D. W. Waugh, and P. J. Young. Overview of IGAC/SPARC Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI) Community Simulations in Support of Upcoming Ozone and Climate Assessments. *SPARC Newsletter*, 40(January) :48–66, 2013.

- [10] C. R. Flechard, P. Ambus, U. Skiba, R. M. Rees, A. Hensen, A. van Amstel, A. v. d. P. van Dasselaar, J. F. Soussana, M. Jones, J. Clifton-Brown, A. Raschi, L. Horvath, A. Neftel, M. Jocher, C. Ammann, J. Leifeld, J. Fuhrer, P. Calanca, E. Thalmann, K. Pilegaard, C. Di Marco, C. Campbell, E. Nemitz, K. J. Hargreaves, P. E. Levy, B. C. Ball, S. K. Jones, W. C. van de Bulk, T. Groot, M. Blom, R. Domingues, G. Kasper, V. Allard, E. Ceschia, P. Cellier, P. Laville, C. Henault, F. Bizouard, M. Abdalla, M. Williams, S. Baronti, F. Berretti, and B. Grosz. Effects of climate and management intensity on nitrous oxide emissions in grassland systems across Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 121(1-2) :135–152, 2007.
- [11] K. K. Goldewijk, A. Beusen, J. Doelman, and E. Stehfest. Anthropogenic land use estimates for the Holocene - HYDE 3.2. *Earth System Science Data*, 9(2) :927–953, 2017.
- [12] IPCC. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use. *Ippc*, pages 15–83, 2006.
- [13] G. Janssens-Maenhout, M. Crippa, D. Guizzardi, M. Muntean, E. Schaaf, F. Dentener, P. Bergamaschi, V. Pagliari, J. G. J. Olivier, J. A. H. W. Peters, J. A. van Aardenne, S. Monni, U. Doering, and A. M. R. Petrescu. EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major Greenhouse Gas Emissions for the period 1970&ndash;2012. *Earth System Science Data Discussions*, (August) :1–55, 2017.
- [14] G. Krinner, N. Viovy, N. de Noblet-Ducoudré, J. Ogée, J. Polcher, P. Friedlingstein, P. Ciais, S. Sitch, and I. C. Prentice. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(1) :1–33, 2005.
- [15] C. Li, S. Frolking, and T. A. Frolking. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events : 2. Model applications. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 97(D9) :9777–9783, 1992.
- [16] C. Lu and H. Tian. Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half century : Shifted hot spots and nutrient imbalance. *Earth System Science Data*, 9(1) :181–192, 2017.
- [17] A. R. Ravishankara, J. S. Daniel, and R. W. Portmann. Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) : The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century. *Science*, 326(5949) :123–125, 2009.

- [18] D. W. Rowlings, P. R. Grace, C. Scheer, and S. Liu. Rainfall variability drives interannual variation in N<sub>2</sub>O emissions from a humid, subtropical pasture. *Science of the Total Environment*, 512-513 :8–18, 2015.
- [19] H. Tian, J. Yang, C. Lu, R. Xu, J. G. Canadell, R. Jackson, A. Arneeth, J. Chang, G. Chen, P. Ciais, S. Gerber, A. Ito, Y. Huang, F. Joos, S. Lienert, P. Messina, S. Olin, S. Pan, C. Peng, E. Saikawa, R. L. Thompson, N. Vuichard, W. Winiwarter, S. Zaehle, B. Zhang, K. Zhang, and Q. Zhu. The global N<sub>2</sub>O Model Intercomparison Project (NMIP) : Objectives, Simulation Protocol and Expected Products. *Bulletin of the American Meteorological Society*, pages BAMS–D–17–0212.1, 2018.
- [20] XU-RI and I. C. PRENTICE. Terrestrial nitrogen cycle simulation with a dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 14(8) :1745–1764, 2008.
- [21] S. Zaehle and A. D. Friend. Carbon and nitrogen cycle dynamics in the O-CN land surface model : I. Model description, site-scale evaluation, and sensitivity to parameter estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(1) :1–13, 2010.
- [22] B. Zhang, H. Tian, C. Lu, R. S. S. Dangal, J. Yang, and S. Pan. Manure nitrogen production and application in cropland and rangeland during 1860 - 2014 : A 5-minute gridded global data set for Earth system modeling, feb 2017.

## Résumé Abstract

Au cours de cette étude, une évaluation des émissions de  $N_2O$  calculées par le modèle global de végétation ORCHIDEE, a été mise en place. Dans cet objectif, les résultats du modèle ORCHIDEE ont été comparés à d'autres estimations obtenues par une approche moins mécaniste, celles de l'inventaire EDGAR, pour la période 1970-2012. Cette comparaison a été menée pour les émissions issues des couverts culturaux et prairiaux anthropisés uniquement. Si les deux estimations présentent une même répartition globale des émissions à l'échelle globale, des émissions plus faibles au sein du modèle ORCHIDEE sont observées. L'écart entre les deux estimations augmentant au fil de la période étudiée. Cette plus faible estimation peut être attribuée à une erreur d'exécution du programme menant à une limitation des forçages en intrants azotés et à l'approche de construction différente du modèle ORCHIDEE et de l'inventaire EDGAR. En attribuant le forçage correct au modèle, il est possible que nous obtenions dans le futur des estimations plus justes que nous pourrions comparer aux émissions estimées par EDGAR ou d'autres modèles.

During this study, an evaluation of the emissions of in the model of global vegetation ORCHIDEE has been conducted. In this goal, the results of the ORCHIDEE model have been confronted with other estimations obtained by less mechanistic approach, those of the EDGAR inventory, for the period between 1970 and 2012. If both estimations have same global repartitions over the earth surface, smaller emissions have been observed in the ORCHIDEE model. The gap between the two estimations growing during the period studied. These smaller estimation can be attributed to a mistake in the execution in the model program, limiting the deposition of nitrogen by fertilization and to the different approaches in the construction of the ORCHIDEE model and the EDGAR inventory. By solving this bug and attributing the correct forcing to the model we might get in the future more coherent estimations which could be compared to estimations from EDGAR and other models.