

Simulation de la croissance et des émissions de gaz à effet de serre d'une rotation culturale classique en Hesbaye ; Évaluation du modèle STICS et analyse de l'impact du changement climatique

Auteur : Choquet, Pauline

Promoteur(s) : Dumont, Benjamin

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/8186>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**SIMULATION DE LA CROISSANCE ET DES
ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE D'UNE
ROTATION CULTURALE CLASSIQUE EN HESBAYE**

—

**ÉVALUATION DU MODÈLE STICS ET ANALYSE DE
L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

CHOQUET PAULINE

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADEMIQUE 2018-2019

PROMOTEUR: DR. DUMONT BENJAMIN

« Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech. »

« Le présent document n'engage que son auteur. »

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT.

**SIMULATION DE LA CROISSANCE ET DES
ÉMISSIONS DE GAZ À EFFET DE SERRE D'UNE
ROTATION CULTURALE CLASSIQUE EN HESBAYE**

—

**ÉVALUATION DU MODÈLE STICS ET ANALYSE DE
L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

CHOQUET PAULINE

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADEMIQUE 2018-2019

PROMOTEUR: DR. DUMONT BENJAMIN

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des personnes qui, de près ou de loin, ont permis l'aboutissement de ce travail, et plus particulièrement :

- Benjamin Dumont, promoteur de ce TFE, pour son enthousiasme et son goût pour la modélisation qu'il a réussi à me transmettre ;
- Tanguy Manise, Anne Deligne, et Margaux Lognoul pour la fourniture des données ;
- Delphine Brogna et Laura Fagnant pour l'ambiance dans le bureau ;
- Merci à Aude pour son aide durant toutes ces journées et nuits passées à travailler, y compris sous les températures caniculaires ;
- Merci à Lolita sans qui la vie en STE n'aurait pas été aussi sympa ;
- Merci à mes amis et co-koteurs pour leur esprit et leur grande aide pour les rudes retours de soirées ;
- Merci à mes parents pour leur soutien pendant ces années d'étude ;

Par contre, je ne remercierai pas mon ordinateur qui a rendu l'âme moins de deux semaines avant l'échéance.

A la mémoire de ma grand-mère Danielle Campana.

Résumé

De nombreuses études montrent, que depuis 1950 l'atmosphère se réchauffe. Les jours extrêmement chauds et les fortes précipitations sont plus fréquents. Ces bouleversements sont des conséquences du changement climatique et ont un impact sur les écosystèmes terrestres. Celui-ci est essentiellement dû à l'émission anthropogénique de gaz à effet de serre conduite par une croissance économique et une population mondiale toujours croissante. Dans ce contexte, le maintien de la sécurité alimentaire mondiale est un défi majeur pour l'agriculture. C'est une raison pour laquelle l'étude de l'impact du changement climatique sur une culture et ses échanges de gaz avec l'atmosphère est essentielle. Dans ce cadre, ce travail consiste à tester et à évaluer le modèle STICS pour simuler la croissance des plantes et les échanges des gaz CO_2 et N_2O d'une rotation betterave sucrière/froment d'hiver/pomme de terre/froment d'hiver située à Lonzée. Les données météorologiques et d'échanges de gaz proviennent du site ICOS LTO et couvrent la période 2004-2016.

Le test du modèle STICS pour la simulation de la croissance des plantes est satisfaisant excepté pour la modélisation de la pomme de terre. Concernant les échanges de dioxyde de carbone, les résultats montrent que l'amplitude des émissions simulées est parfois trop élevée, parfois trop faible. Cependant, la dynamique des courtes variations est convenablement reproduite par le modèle. De plus, la diminution du stock de carbone dans le sol de la parcelle étudiée est décemment représentée par le modèle. L'évolution des sorties de la modélisation concernant la production de protoxyde d'azote a été comparée avec les mesures uniquement pendant l'année 2016. Comme pour le CO_2 les variations d'émissions sont correctement simulées, mais l'amplitude des pics est parfois trop importante. Ensuite, des prédictions sur le rendement et les variables environnementales, selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5 à l'horizon 2070-2100, ont été effectuées. Les prédictions selon le RCP 4.5 montrent une forte diminution des émissions de gaz liée à une ferme réduction des rendements cumulés. Selon le RCP 8.5, la prédiction des rendements tend à une légère hausse de production avec une même quantité de CO_2 émise que pour la simulation actuelle. Néanmoins, les émissions de N_2O prédites sont plus importantes.

Abstract

Since 1950, the atmosphere of our planet has warmed up. Extremely hot days and heavy precipitations are more recurring. These upheavals are consequences of climate change and have an impact on terrestrial ecosystems. This is mainly due to the anthropogenic emission of greenhouse gases driven by economic growth and an ever-increasing world population. In this context, maintaining global food security is a major challenge for agriculture. This is one reason why studying the impact of climate change on a crop and its gas exchanges with the atmosphere is essential.

In this conditions, this work consists of a test and evaluation of the STICS model to simulate the growth of plants and the CO₂ and N₂O gas exchanges of a sugar beet/winter wheat/potato/winter wheat rotation located in Lonzée. Meteorological and gas exchange data come from the ICOS LTO site during the period 2004-2016.

The STICS model test for the simulation of plant growth is satisfactory except for the potato modeling. With regard to carbon dioxide exchanges, the results show that the simulated emissions amplitude is sometimes too high, sometimes too low. However, the dynamics of the short variations are adequately reproduced by the model. In addition, the carbon stock decrease in the soil of the plot studied is decently represented by the model. The evolution of modeling outputs for nitrous oxide production was compared with the measurements only during the year 2016. As for CO₂, the emissions variations are correctly simulated but the peaks amplitude is sometimes too important. Then, yield predictions and environmental variables under scenarios RCP 4.5 and 8.5 by 2070-2100 were made. Predictions under RCP 4.5 show a sharp decrease in gas emissions associated with a sharp reduction in cumulative returns. Under RCP 8.5, the prediction of yields tends to slightly increase in production with the same amount of CO₂ emitted as for the current simulation. Nevertheless, predicted N₂O emissions are larger.

Table des matières

1.	Introduction	1
2.	Synthèse bibliographique	2
2.1.	Le changement climatique.....	2
2.1.1.	Les différents RCP (Representative Concentration Pathway).....	2
2.1.2.	Les effets attendus	3
2.1.3.	Les gaz à effet de serre	4
2.2.	Les échanges de gaz à effet de serre des systèmes de cultures.....	6
2.2.1.	Dioxyde de carbone	6
2.2.2.	Protoxyde d'azote.....	7
2.3.	Réponse des systèmes de culture au changement climatique.....	8
2.4.	Les modèles de culture	9
2.4.1.	Historique	9
2.4.2.	Les modèles	10
3.	Matériel et méthode.....	11
3.1.	Sites de mesure et données de référence	11
3.2.	Le modèle STICS	13
3.2.1.	Présentation générale.....	13
3.2.2.	Les données d'entrée	13
3.2.3.	Principe de fonctionnement.....	15
3.2.4.	Les modules.....	16
3.2.5.	Les sorties du modèle	24
3.3.	Les entrées du modèle	25
3.3.1.	Les caractéristiques du sol.....	25
3.3.2.	Elaboration des fichiers climatiques actuels.....	25
3.3.3.	Les données climatiques futures.....	26
3.4.	Les mesures de gaz.....	26
3.4.1.	Détermination de la respiration de l'écosystème.....	26
3.4.2.	Flux d'oxyde nitreux	27
3.5.	Test et évaluation du modèle	27
4.	Résultats et discussions	29
4.1.	Test et évaluation du modèle	29
4.1.1.	Variables agronomiques	29
4.1.2.	Variables environnementales.....	41
4.2.	Analyse d'impact de scénarios climatiques.....	54
4.2.1.	Variables agronomiques	54
4.2.2.	Variables environnementales.....	55

5.	Conclusion et perspectives	63
6.	Bibliographie	64

Table des figures

Figure 1 – Evolution des émissions de CO ₂ annuelles mondiales en gigatonnes selon les scénarios RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5 (Source : IPCC, 2014)	3
Figure 2 – Modification de la température moyenne de surface en degré Celsius à l’horizon 2081-2011 par rapport aux moyennes des températures de 1986-2005 (RCP2.6-RCP8.5) (Source: IPCC, 2014). 3	
Figure 3 – Evolution des concentrations atmosphériques moyennes de gaz à effet de serre entre 1850 et 2015. En rouge, le protoxyde d’azote en ppb, en jaune, le méthane en ppb et en vert le dioxyde de carbone en ppm (Source: I.P.C.C., 2014).....	5
Figure 4 – Schéma présentant les différents termes de la respiration de l’écosystème cultural (Source : Delogu, 2011).....	6
Figure 5 – Schéma présentant l’itinéraire technique de la première rotation culturale betterave sucrière/froment d’hiver/pomme de terre/froment d’hiver étudiée (2004-2007).	11
Figure 6 - Situation du mât de mesure d’EC sur la parcelle étudiée à Lonzée.	12
Figure 7 – Schéma présentant les fichiers d’entrée du modèle STICS (Source : Ripoché-Wachter et Lecharpentier, 2017).	14
Figure 8 – Schéma résumant le principe de fonctionnement du modèle STICS (Source : www6.paca.inra.fr).....	15
Figure 9 - Schéma de la relation entre mes stades et l’évolution du LAI, de la croissance du grain et de la maturation du grain (Adapté de Brisson <i>et al.</i> , 1998).....	17
Figure 10 - Évolution du facteur FCO ₂ en fonction de la concentration atmosphérique en CO ₂ dans le modèle STICS (Source: Brisson <i>et al.</i> , 2008).....	18
Figure 11 - Diagramme flux de la décomposition des résidus organiques dans le modèle STICS (Source : Nicolardot, Recous et Mary, 2001).....	20
Figure 12 - Evolution des constantes de décomposition (<i>k_{res}</i> , <i>k_{bio}</i>) en fonction du ration C/N des résidus dans le modèle STICS (Source Brisson et Mary, 2002).	20
Figure 13 - Evolution du potentiel de dénitrification en fonction du pourcentage de carbone organique disponible dans le sol dans le modèle STICS (Source : Léonard, 2016).....	22
Figure 14 - Evolution facteur FNO ₃ en fonction de la concentration en NO ₃ dans le sol (Source : Léonard, 2016). (w est la teneur en eau massique).	22
Figure 15 - Évolution du ratio <i>z</i> en fonction de l’état hydrique du profil de sol dans le modèle STICS (Source : Léonard, 2016).....	23
Figure 16 - Évolution du facteur WFPS en fonction de l’état hydrique du profil de sol (Source : Léonard, 2016).	23
Figure 17 - Évolution de <i>r</i> en fonction du pH du sol pour WFPS ~80 % et du nitrate en abondance (Léonard, 2016).....	23
Figure 18 – Comparaison des observations et simulations pour chaque année de la culture de la betterave.	30
Figure 19 - Comparaisons observations et simulations pour les trois premières années de culture du froment.	32
Figure 20 - Comparaisons observations et simulations pour les trois dernières années de culture du froment.	33
Figure 21 – Comparaison des observations et simulations de la culture du froment.	34
Figure 22 - Comparaisons observations et simulations pour chaque année de culture de pomme de terre.....	36

Figure 23 - Comparaison observations et simulations de la culture de pomme de terre.	36
Figure 24 - Comparaisons observations et simulations pour chaque année de culture de moutarde. ...	38
Figure 25 - Comparaison observations et simulations de la culture de moutarde.	39
Figure 26 - Comparaison de la masse sèche aérienne et la masse sèche des carottes de maïs (saison 2012), observées et simulées (1).	40
Figure 27 - Comparaison de la masse sèche aérienne et la masse sèche des carottes de maïs (saison 2012), observées et simulées (2).	40
Figure 28 - Evolution journalière de l'émission de CO ₂ simulée et observée pendant la première rotation.	42
Figure 29 - Evolution journalière de l'émission de CO ₂ simulée et observée pendant la deuxième rotation.	42
Figure 30 - Evolution journalière de l'émission de CO ₂ simulée et observée pendant les deux premières années de la troisième rotation.	43
Figure 31 - Evolution journalière de l'émission de CO ₂ simulée et observée, ainsi que celle du LAI simulé pendant la première rotation.	45
Figure 32 - Evolution journalière de l'émission de CO ₂ simulée et observée, ainsi que celle du LAI simulé pendant la deuxième rotation.	45
Figure 33 - Evolution journalière de l'émission de CO ₂ simulée et observée, ainsi que celle du LAI simulé pendant la troisième rotation.	46
Figure 34 - Comparaison entre la respiration hétérotrophe approximée et la variable <i>CO2sol</i>	46
Figure 35 - Evolution modélisée et mesurée du stock de carbone du sol de la parcelle étudiée.	47
Figure 36 - Comparaison mesures et simulations des émissions de N ₂ O en 2016.	48
Figure 37 - Evolution des flux de N ₂ O mesurés et simulés en 2016.	49
Figure 38 - Somme cumulée des émissions de N ₂ O mesurées en fonction des émissions simulées.	49
Figure 39 - Evolution des émissions de N ₂ O mesurées, simulées totales et simulées issues de la nitrification en 2016 (Période 1).	51
Figure 40 - Evolution des émissions de N ₂ O mesurées, simulées totales et simulées issues de la dénitrification en 2016 (Période 2).	52
Figure 41 - Evolution des émissions de N ₂ O mesurées, simulées totales et simulées issues de la nitrification en 2016 (Période 3).	53
Figure 42 - Rendement cumulé des rotations actuelles et selon les RCP 4.5 et 8.5 à l'horizon 2085. ...	55
Figure 43 - Evolution des émissions de CO ₂ simulées de la première rotation selon les RCP4., RCP8.5 et la référence.	56
Figure 44 - Evolution des émissions de CO ₂ simulées de la deuxième rotation selon les RCP4., RCP8.5 et la référence.	57
Figure 45 - Emissions cumulées de CO ₂ simulées selon les RCP4.5 et 8.5 et la référence actuelle.	58
Figure 46 - Evolution des émissions de N ₂ O simulées de la première rotation selon les RCP4.5, RCP8.5 et la référence.	59
Figure 47 - Evolution des émissions de N ₂ O simulées de la deuxième rotation selon les RCP4.5, RCP8.5 et la référence.	60
Figure 48 - Evolution des émissions de N ₂ O simulées de la troisième rotation selon les RCP4.5, RCP8.5 et la référence.	60
Figure 49 - Emissions cumulées de N ₂ O simulées selon les RCP4.5 et 8.5 et la référence actuelle.	61

Table des tableaux

Tableau 1 - Liste des stades phénologiques de STICS. Certains stades sont fonction de l'option choisie : * pour les cultures semées, ** pour les cultures déterminées, *** pour les cultures indéterminées (Adapté de Brisson <i>et al.</i> , 2008).....	16
Tableau 2 - Opération réalisées sur les variables climatiques.....	25
Tableau 3 - Paramètre modifié dans STICS pour les simulations de la culture de betterave.....	30
Tableau 4 - Paramètres statistiques de la modélisation des cultures de betterave.....	30
Tableau 5 - Paramètres statistiques de la modélisation des cultures de froment.....	34
Tableau 6 - Paramètres modifiés dans STICS pour les simulations de la culture de pomme de terre. .	35
Tableau 7 - Paramètres statistiques de la modélisation des cultures de pomme de terre.	36
Tableau 8 – Facteurs caractéristique des variétés de pomme de terre (Source : NIVAP HOLLAND, 2011).....	37
Tableau 9 – Paramètres modifiés dans STICS pour les simulations de la culture de moutarde.....	38
Tableau 10 - Paramètres statistiques de la modélisation des cultures de moutarde.	39
Tableau 11 - Coefficients statistiques évaluant le modèle pour la simulation Maïs Lonzée 2012.....	40
Tableau 12 - Paramètres statistiques des émissions de N2O en 2016.	49

1. Introduction

Depuis 1950, l'atmosphère et l'océan se réchauffent. La quantité de neige et de glace sur la terre a diminué. Le niveau de la mer a augmenté. Les jours extrêmement chauds et les fortes précipitations sont plus fréquents (I.P.C.C., 2018). Ces bouleversements sont des conséquences du changement climatique.

D'après un rapport de l'IPCC de 2018, on estime que les activités humaines ont provoqué un réchauffement de la planète d'environ 1,0°C par rapport aux moyennes de températures observées avant la période préindustrielle (deuxième moitié du 18^{ème} siècle). Le réchauffement atteindrait 1,5°C entre 2030 et 2052 si la tendance reste équivalente (I.P.C.C., 2018).

Il est évident aujourd'hui que le changement climatique a un impact sur les systèmes humains et naturels sur tous les continents et les océans (I.P.C.C., 2018). Les écosystèmes terrestres sont totalement dépendants de leur environnement. Avec le dérèglement climatique, ceux-ci sont en train de changer.

Celui-ci est essentiellement dû à l'émission anthropogénique de gaz à effet de serre. Ces émissions sont largement conduites par une croissance économique et une population mondiale toujours croissante.

Le maintien de la sécurité alimentaire mondiale face à cette population croissante et ce changement climatique constitue un défi majeur pour l'agriculture qui est une activité liée aux écosystèmes dont l'humanité a besoin.

En 2009, 1.5 milliards d'hectares ont été cultivés dans le monde. Ce nombre reste en augmentation afin de répondre à la demande croissante (F.A.O., 2010).

C'est une raison pour laquelle l'étude de l'impact du changement climatique sur une culture et ses échanges de gaz avec l'atmosphère est et restera essentielle.

Dans ce cadre, le réseau observatoire ICOS mesure les flux de gaz à effet de serre échangés par des écosystèmes un peu partout en Europe. Le site ICOS LTO, localisé en région hesbignonne mesure les échanges gazeux liés à une rotation culturale depuis 2004 (ICOS). La rotation betterave sucrière/froment d'hiver/pomme de terre/froment d'hiver y est pratiquée par cycle de 4 ans.

La mesure mais aussi la prédiction du comportement de cet écosystème dans le futur est nécessaire. Dans ce contexte, la modélisation est un outil indispensable. Plus précisément, un modèle de culture permet de prédire le développement et les échanges de gaz à effet de serre d'une plante en croissance en fonction des conditions climatiques et environnementales changeantes (Jones *et al.*, 2017).

De nombreux modèles ont été créés afin d'étudier l'effet de multiples facteurs environnementaux sur une culture. Celui utilisé dans ce travail est le modèle STICS. Sa description est réalisée dans la suite du document.

Les objectifs du présent travail sont :

- de tester et d'évaluer le modèle STICS pour simuler la croissance des plantes et les échanges des gaz CO₂ et N₂O qui y sont associés, à l'échelle d'une rotation.
- de prédire le rendement et les variables environnementales selon différents scénarios climatiques, actuels et futurs.

2. Synthèse bibliographique

La synthèse bibliographique s'articule sur plusieurs axes : le changement climatique avec ses prédictions et ses conséquences, les échanges de gaz à effet de serre des cultures, concentrés sur le dioxyde de carbone et l'oxyde nitreux, la réponse des cultures au changement climatique futur, et les modèles de simulation de culture.

2.1. Le changement climatique

2.1.1. Les différents RCP (Representative Concentration Pathway)

Le dernier rapport du *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (G.I.E.C) décrit clairement que le climat futur dépend fortement des émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre. Elles dépendent à la fois du développement socio-économique (taille de la population, activité économique, niveau de vie, utilisation de l'énergie, utilisation des terres, technologies) et des politiques climatiques (I.P.C.C., 2014).

Le G.I.E.C. envisage 4 différents scénarios (R.C.P.) selon ces émissions et le forçage radiatif² équivalent estimé: trois scénarios de stabilisation des émissions, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 et un scénario qui garde la tendance actuelle, RCP 8.5.

La figure 1 ci-dessous représente les émissions de CO₂ selon les différents RCPs (lignes) et les catégories de scénarios utilisés en WGIII (les aires colorées montrent une gamme de 5 à 95 %) (I.P.C.C., 2014).

Comme le décrit la figure 2, seul le scénario avec les plus basses émissions (RCP 2.6) maintient l'augmentation de la température de la surface globale de la terre en dessous de 2°C plus haute que le niveau préindustriel (Van Ypersele, 2017).

² « Le forçage radiatif peut être défini comme la différence entre l'énergie radiative reçue du soleil et l'énergie radiative émise vers l'espace par la Terre. », *Science-Climat-Energie.be*

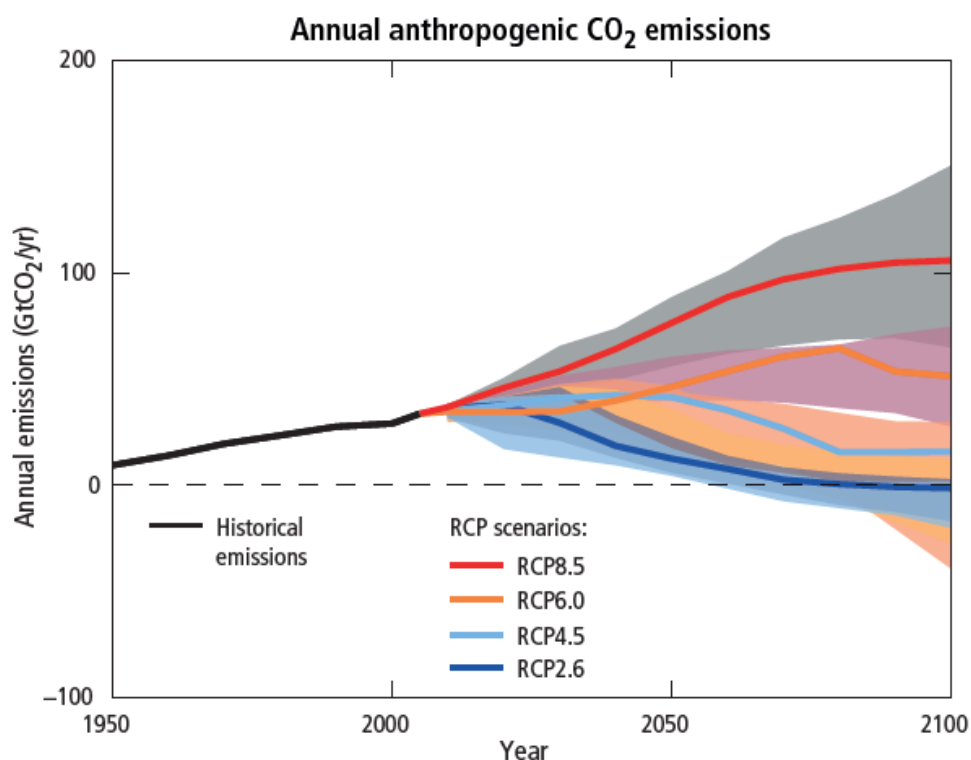


Figure 1 – Evolution des émissions de CO₂ annuelles mondiales en gigatonnes selon les scénarios RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5 (Source : IPCC, 2014)

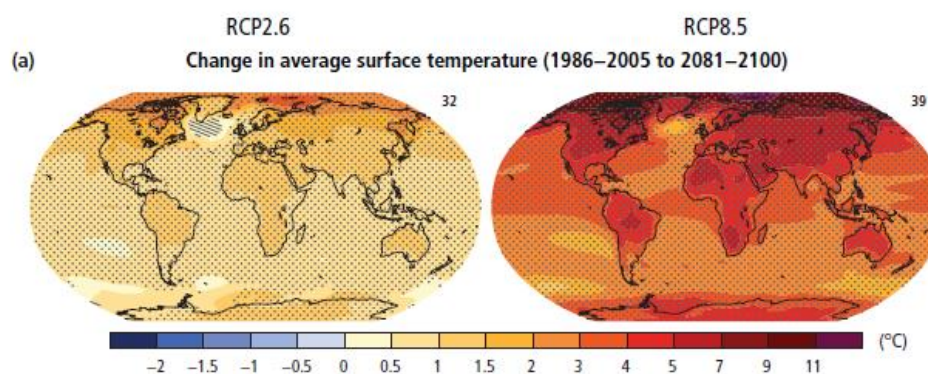


Figure 2 – Modification de la température moyenne de surface en degré Celsius à l'horizon 2081-2111 par rapport aux moyennes des températures de 1986-2005 (RCP2.6-RCP8.5) (Source: IPCC, 2014).

2.1.2. Les effets attendus

Il est prévu que l'indisponibilité de l'eau va augmenter dans certaines parties du monde. Ce changement aura son propre effet sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau et son allocation (Kang, Khan, et Ma, 2009).

La sécurité alimentaire globale menacée par le changement climatique est un des plus importants challenges du 21^{ème} siècle pour fournir assez de nourriture à la population grandissante tout en

soutenant l'environnement déjà stressé (Kang, Khan et Ma, 2009). De plus, Zhang *et al.* (2007) ont montré que les cycles de changements de températures sont liés aux cycles de changements de populations et à la fréquence des guerres.

A l'échelle du globe, la fréquence et l'intensité des événements extrêmes sont en augmentation en raison du changement climatique (Banholzer, Kossin et Donner, 2014). Le nombre de jours et de nuits froides a diminué et le nombre de jours et de nuits chaudes a augmenté. Ceci de manière plus fréquente dans une large partie d'Europe, d'Asie et d'Australie (I.P.C.C., 2014). A l'avenir, les sécheresses seront également plus intenses (Trenberth *et al.*, 2014). Un déplacement des cyclones vers les pôles est en train de se produire (McDonald, 2011).

La fréquence des fortes précipitations est prévue à la hausse, et notamment, une augmentation des précipitations extrêmes dans l'hémisphère nord (Min *et al.*, 2011; Banholzer, Kossin et Donner, 2014).

À l'avenir, le sud et le centre de l'Europe vont être touchés par des vagues de chaleur et des feux de forêts plus fréquents. L'aire méditerranéenne sera également plus marquée par des sécheresses intenses (Seneviratne *et al.*, 2018).

Le climat des Pays Nordiques (Européens) sera significativement plus humide, et subira plus d'inondations hivernales (Commission européenne³; (Seneviratne *et al.*, 2018).

Selon le scénario RCP considéré, pour la Belgique, l'augmentation de température se situera entre 0,7 et 5°C d'ici la fin du siècle. En général, l'élévation la plus importante est attendue en hiver.

L'évolution des précipitations est plus nette. Les hivers seront plus pluvieux et en moyenne seulement une légère baisse des précipitations est prévue en été (IRM)⁴, modèle ALARO).

Selon le scénario RCP le plus pessimiste, pour les périodes 2026-2069 ou 2070-2100, les faits suivants ont été prédits pour la Belgique (Termonia *et al.*, 2018) :

- avec un degré de confiance élevé: beaucoup plus de jours tropicaux ($T > 30^{\circ}\text{C}$) et de vagues de chaleur, plus de précipitations extrêmes (Willems *et al.*, 2017), et des périodes de pluie plus exceptionnelles.

- avec un degré de confiance modéré: des sécheresses plus extrêmes et exceptionnelles (Termonia *et al.*, 2018).

2.1.3. Les gaz à effet de serre

Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone (CO_2), de méthane (CH_4) et d'oxyde nitreux ou protoxyde d'azote (N_2O) se sont accrues à des niveaux jamais atteints dans les 800.000 dernières années (Lüthi *et al.*, 2008; Van Ypersele, 2017).

La source de ces augmentations est la deuxième révolution industrielle, phénomène qui a commencé dans les années 1850. Le graphique suivant (figure 3) illustre cette nette augmentation.

³ www.europa.eu (consulté en mars 2019)

⁴ www.meteo.be (consulté en mai 2019)

Ces gaz contribuent au réchauffement en absorbant une partie du rayonnement infrarouge émis à la surface de la terre et renvoient celle-ci vers la terre. Ce phénomène est appelé l'effet de serre.

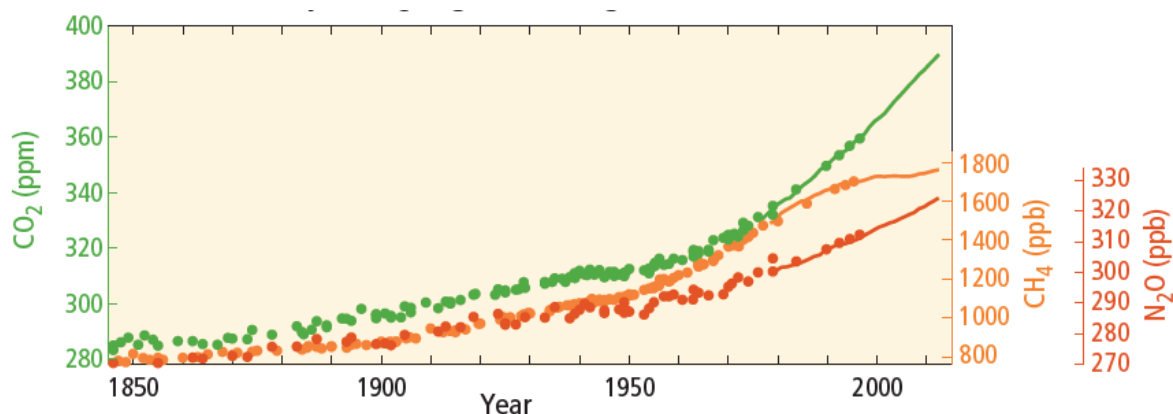


Figure 3 – Evolution des concentrations atmosphériques moyennes de gaz à effet de serre entre 1850 et 2015. En rouge, le protoxyde d'azote en ppb⁵, en jaune, le méthane en ppb et en vert le dioxyde de carbone en ppm⁶ (Source: I.P.C.C., 2014).

A. Le dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone ou gaz carbonique (CO₂) est, avant tout, utilisé par les végétaux selon le processus de photosynthèse afin de produire du glucose. Ensuite, il est émis lors de la respiration servant à produire l'énergie. Il peut aussi être produit par la combustion de ces végétaux ou d'énergies fossiles. Ce gaz fait partie du cycle du carbone qui est le cycle naturel le plus perturbé par l'activité humaine.

Selon l'IPCC, sur des données de 1990-1999, les écosystèmes terrestres puisent 2,6 gigatonnes de carbone par an et en plus, l'océan 2,2 gt C/an alors que la déforestation et le changement d'affectation des terres en rejette 1,6 gt C/an et l'emploi des combustibles fossiles en émet environ 6,4 gt C/an.

B. Le protoxyde d'azote

L'oxyde nitreux ou protoxyde d'azote (N₂O) est présent en faible quantité dans l'air sec. Sa production est naturelle (par les micro-organismes du sol par exemple) mais son augmentation est due à l'activité humaine, principalement l'agriculture, notamment à cause de l'utilisation des fertilisants industriels (E.C.S.S.S., 2012).

Malheureusement, en plus de son forçage 296 fois plus élevé que celui du CO₂ (pour une période de 100 ans), le N₂O est la substance majeure de diminution de la couche d'ozone. En outre, il contribue à 8% du forçage radiatif à l'échelle globale (E.C.S.S.S., 2012).

Il existe d'autres gaz à effet de serre, comme rapporté précédemment. Cependant, ce travail se limite aux gaz CO₂ et N₂O car ce sont les principaux gaz dégagés des cultures avec le méthane.

⁵ parties par billions (unité de concentration).

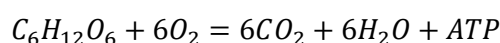
⁶ parties par millions.

2.2. Les échanges de gaz à effet de serre des systèmes de cultures

2.2.1. Dioxyde de carbone

Les plantes consomment le CO₂ en se développant grâce à la photosynthèse. Cependant, la plus importante source biosphérique de dioxyde de carbone est l'ensemble des cultures (Smith, Anderson et Moore, 2012). Cette source de dioxyde de carbone est le résultat de la respiration des plantes et de la décomposition de la matière organique (Aubinet *et al.*, 2009). La respiration est le total de la respiration hétérotrophe et de la respiration autotrophe. La part hétérotrophe (Rh) est celle des microbes et de la faune du sol, ceux-ci décomposant la matière organique. Tandis que la part autotrophe (Ra) est celle de la partie aérienne des plantes (Raa) et de leurs racines (Rar) (Moureaux *et al.*, 2008) (figure 4).

La respiration est le processus d'oxydo-réduction du glucose qui est réalisé par la photosynthèse. Elle sert à produire l'énergie pour les cellules. Cette énergie est sous forme de molécule d'Adénosine TriPhosphate (ATP) (Delogu, 2011). L'équation de la respiration est la suivante :



(1)

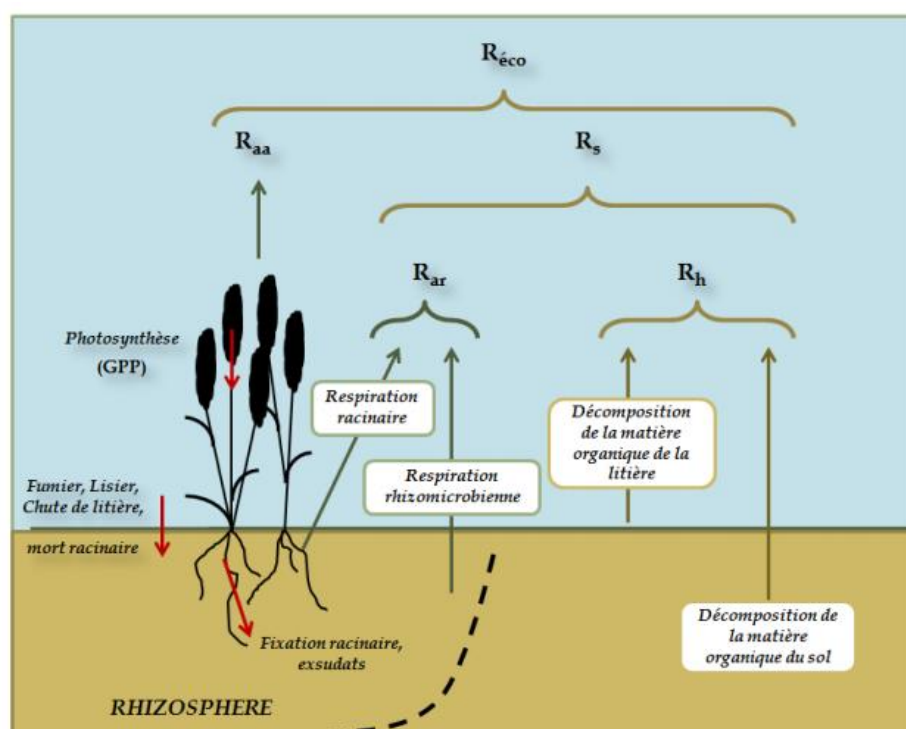


Figure 4 – Schéma présentant les différents termes de la respiration de l'écosystème culturel (Source : Delogu, 2011).

La respiration hétérotrophe est une importante source de carbone dans le monde et est estimée à plus de 50 Pg de carbone par an (Hashimoto *et al.*, 2015). Celle-ci est sensible à la température. Cette sensibilité est représentée par une relation Q₁₀ dans la littérature. Q₁₀ est le facteur par lequel la respiration du sol va être multipliée lorsque la température augmente de 10°C (Kirschbaum, 1995).

Cependant, la teneur en eau du sol et la source en substrat doivent aussi être prises en compte (Sihi *et al.*, 2018). Selon Meyer, Welp et Amelung (2018), Q10 augmente avec la teneur en eau dans les sols de culture et est aussi fonction de la texture du sol. Il augmente avec la proportion de sable et d'argile et diminue avec la proportion de limon.

Ensuite, à l'échelle globale, la respiration autotrophe émet environ 40 Pg de carbone par an selon Hashimoto *et al.* (2015). Ce phénomène est appelé la photorespiration. Il est dû à une dérivation du cycle de Calvin-Benson (servant à fixer le CO₂ chez les organismes autotrophes) qui permet d'éliminer et de recycler un sous-produit nocif formé lorsque l'O₂ remplace de CO₂ dans la photosynthèse (Hagemann et Bauwe, 2016).

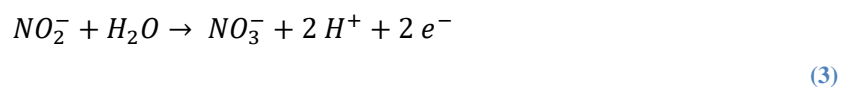
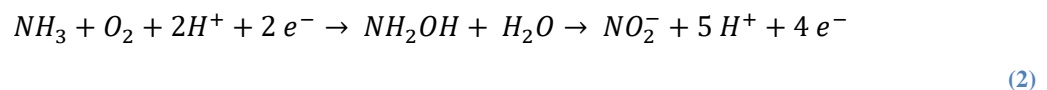
Dans le cycle du carbone, le sol représente le pool de carbone terrestre le plus large avec 1,500 Pg de carbone dans le premier mètre, ce qui équivaut à environ 2 fois la quantité retenue dans l'atmosphère et 3 fois celle de la végétation terrestre (Kutsch, Bahn et Heinemeyer, 2010). De ce fait, les sols agricoles ont un potentiel inexploité de puits de carbone (Eagle, Macy et Claxton, 2010).

En agriculture, parmi les facteurs humains influençant l'émission de CO₂ du sol, la gestion de la culture en est le plus significatif. Par exemple, lors d'un travail du sol, l'émission augmente. Selon la littérature, à l'échelle européenne, les terres de cultures constituent une source mineure de carbone (+/- 10 g C/m²) (Schulze *et al.*, 2010).

2.2.2. Protoxyde d'azote

L'agriculture est responsable de 60% des émissions totales de N₂O dans l'atmosphère (Linguist *et al.*, 2011). Ces émissions sont le résultat de deux processus microbiens, la nitrification et la dénitrification. Elles peuvent aussi provenir de la volatilisation des intrants. Les micro-organismes libèrent du protoxyde d'azote selon la quantité d'azote et d'oxygène disponibles dans le sol. Plusieurs autres facteurs ont aussi une influence sur les émissions de N₂O : la température, le contenu en eau, la texture du sol, le pH, la quantité d'ions ammonium (NH₄⁺) et la quantité de nitrate (NO₃⁻) (Norton, Schepers et Raun, 2008; Snyder *et al.*, 2009).

La nitrification est l'oxydation du NH₄⁺ ou NH₃ en NO₂⁻ ou NO₃⁻. Dans les sols agricoles, la nitrification s'effectue par des bactéries chimolithotrophes et archées (Norton, Schepers et Raun, 2008). La conversion d'ammonium en nitrite est réalisée par des bactéries du sol comme *Nitrosomonas* sp. Le nitrite est ensuite transformé en NO₃⁻ par des bactéries *Nitrobacter* sp. et *Nitrospira* sp. (Snyder *et al.*, 2009). Les équations suivantes illustrent la nitrification autotrophe :

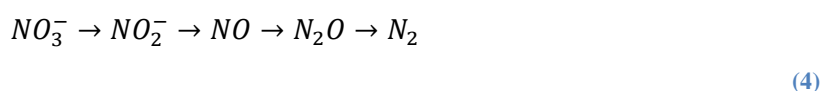


Comme le montre ces équations, la nitrification est dépendante de la disponibilité d'oxygène, du pH, etc. De plus, d'après Fortuna *et al.* (2003), une fertilisation ou un épandage ont une influence positive

sur la nitrification. Enfin, elle augmente également avec la température, jusqu'à atteindre un plateau (Snyder *et al.*, 2009). Une nitrification hétérotrophe peut aussi se réaliser par des bactéries hétérotrophes ou des champignons.

L'ion NO_3^- peut s'accumuler (Norton, Schepers et Raun, 2008) mais il est transporté grâce à l'écoulement d'eau réalisé notamment par les racines des plantes et par le lessivage. Le NO_3^- peut également disparaître du sol avec le processus de dénitrification.

La dénitrification est la transformation du nitrate en N_2 lorsqu'elle est complète. Sinon, l'équation suivante résume le chemin pris par l'azote. Chaque conversion se faisant entièrement ou non et à un certain rythme.



Un facteur influant fortement sur la conversion complète de N_2O en N_2 est la disponibilité d' O_2 . Celle-ci est essentiellement fonction de la teneur en eau du sol. Spécifiquement, lors de fortes pluies, la disponibilité en oxygène diminue très rapidement. Cette rapidité a aussi un impact direct positif sur le taux de production de N_2O (Linguist *et al.*, 2011). De plus, une haute température provoque une activité dénitrifiante élevée à cause de la décomposition de la matière organique (FAO, 2001). Enfin, un pH de sol bas et une source de nitrate abondante augmentent la production de N_2O (FAO, 2001).

Selon la FAO (2001), 23% de la quantité de N_2O émise provient des fertilisants azotés (FAO, 2001). De plus, 1% de la quantité d'azote apportée est émise directement (I.P.C.C. *et al.*, 2007). Ce taux est influencé par le type de fertilisant azoté, plutôt alcalin ou acide ou le type de culture (Linguist *et al.*, 2011; ECSSS, 2012). En outre, une fertilisation azotée plus précise, amènerait une moins grande quantité d'azote dans les champs. En effet, une grande partie (environ 50%) de la fertilisation est perdue et n'est pas utilisée par la plante (FAO, 2001).

2.3. Réponse des systèmes de culture au changement climatique

Suite à toutes les conséquences climatiques expliquées précédemment, le changement climatique va causer des modifications dans les bilans physiques qui interagissent avec les systèmes cultureux (bilans hydriques, bilans radiatifs, ...). Les résultats de modélisations existants montrent qu'une augmentation de la précipitation induit une augmentation du rendement des cultures, et que le rendement est plus sensible à la précipitation qu'à la température (Kang, Khan et Ma, 2009).

Cet effet dépend des espèces cultivées. La pomme de terre par exemple, est une culture qui présente une utilisation de l'eau très efficace (Haverkort et Verhagen, 2008). Elle ne devrait donc pas subir le manque d'eau éventuel.

L'augmentation de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère va provoquer une augmentation de la biomasse différente selon le type de plante. Il existe les types de plantes dites « en C3 » ou en « en C4 » selon le nombre d'atomes de carbone de la molécule permettant de fixer le carbone. Par exemple, si la concentration atmosphérique double, les plantes en C3 comme le blé, vont assimiler deux fois plus de carbone que celles en C4 comme le maïs (Seguin, 2010).

De plus, l'augmentation de température a un impact positif sur la production de biomasse, jusqu'à une température optimale maximum (Seguin, 2010). Nonobstant, cette augmentation accélère également le cycle de vie des plantes déterminées (Seguin, 2010). Dans nos régions, l'augmentation pourrait avoir un impact positif sur le rendement des cultures comme le blé ou le maïs (Parry *et al.*, 2004; Seguin, 2010; Olesen *et al.*, 2011). Cependant certains craignent que l'élévation de la température engendre une diminution de l'efficacité de l'assimilation du carbone par les plantes (Gray et Brady, 2016a).

Les possibles épisodes exceptionnels thermiques (canicule ou gel), de pluies (inondation, ruissellement, érosion) ou de sécheresses doivent également être pris en compte (Kang, Khan et Ma, 2009). L'augmentation de température a aussi un impact sur l'évapotranspiration du sol et la transpiration de la plante (Kang, Khan et Ma, 2009).

Aujourd'hui, plusieurs faits ont déjà été remarqués : la levée de dormance plus tardive par manque de températures basses, ou une avancée vers le Nord d'insectes ravageurs (Seguin, 2010), ou encore un semis plus tardif lié à une perte de rendement (Petkeviciene, 2009).

En effet, d'après Olesen et al. (2011), les grosses menaces portant sur le blé en Belgique seront les pathogènes et les ravageurs. Par exemple, le niveau de survie hivernale des insectes herbivores va augmenter (Bale *et al.*, 2002).

Enfin, concernant l'avenir des micro-organismes du sol : l'augmentation de température devrait amener à une augmentation de l'activité microbiologique, ce qui engendre une plus forte respiration et donc une émission plus importante de CO₂ (Mandal et Neenu, 2014).

D'après Farina *et al.* (2018), le changement climatique va augmenter légèrement les émissions de CO₂ des cultures. De plus, les émissions de N₂O ne sont pas à négliger. Van Groenigen *et al.* (2010) ont postulé que, vu la demande en nourriture croissante et l'expansion limitée de l'agriculture, les émissions de N₂O devraient être évaluées comme une fonction du rendement de culture et non en fonction de l'aire comme dans la littérature en général. Si les émissions de N₂O sont analysées en fonction du rendement, elles sont plus basses pour les systèmes de production intensifs que pour les extensifs (van Groenigen *et al.*, 2010; Hoben *et al.*, 2011). En outre, le contenu en carbone organique du sol va diminuer avec la pratique du labour, ce qui pourrait aussi avoir un impact sur la qualité du sol et donc sur la productivité (Farina *et al.*, 2011).

2.4. Les modèles de culture

2.4.1. Historique

Avec l'avancée des nouvelles technologies et des nouvelles disciplines, les connaissances biologiques ont évolué fortement ces dernières années. La compréhension des systèmes agricoles s'est accrue

notamment pour répondre aux enjeux mondiaux. Celle-ci a permis le développement de modèles qui regroupent les connaissances acquises. Dans les années 1960, les deux pionniers de la modélisation des systèmes agricoles étaient un physicien, C.T. de Wit et W.G. Duncan, un ingénieur chimiste qui a fait fortune en vendant des fertilisants. C'est en 1972, aux Etats-Unis que se crée le modèle CERES pour le blé et le maïs. CERES est encore utilisé aujourd'hui (Jones *et al.*, 2017).

Les modèles de culture ont d'abord été élaborés pour comprendre et aider à la décision des politiques agricoles (Jones *et al.*, 2017). Leur premier rôle a été de prévoir les rendements futurs. Ils vont être de plus en plus utilisés par les agriculteurs et leurs consultants aussi bien que par les politiques afin de prendre des décisions (Hoogenboom, 2000).

2.4.2. Les modèles

Selon le dictionnaire Larousse, le modèle se définit comme étant la représentation simplifiée d'un processus. Dans le cas étudié, le processus de croissance d'une culture et des échanges avec son environnement est représenté.

Un des avantages du modèle est qu'il peut fournir une approximation théorique sans nécessiter le passage à l'expérimentation. Un seul paramètre peut-être changé facilement (Tardieu, 2003). En effet, en science agronomique particulièrement, cet avantage est important quand le développement de la plante est lent comparé à l'expérimentation en science automobile par exemple.

Le modèle de culture consiste en la hiérarchisation de processus physiologiques et de variables d'entrées basées sur des analyses expérimentales (Tardieu, 2003).

Avant tout, ce type de modèle décrit la croissance de la plante. Selon Yin et Schapendonk (2016), il doit d'abord décrire la partition entre les assimilations racinaires et de la pousse. Ce type de modèle représente également le partitionnement vers les organes de croissance (Goudriaan et Van Laar, 1994).

Ensuite, les principaux systèmes à mimer sont le sol, la plante et l'atmosphère ainsi que les échanges entre ces éléments. Le modèle est composé d'équations mathématiques qui reproduisent les conditions de sol, les conditions météorologiques et la gestion agricole (Hoogenboom *et al.*, 2012).

Il existe des modèles simples et des modèles plus complexes. Les plus simples sont basés sur des informations statistiques (données météo et connaissances des rendements précédents) en utilisant des fonctions empiriques. Ils ont été exploités à grande échelle pour prédire le rendement des cultures (Lobell et Burke, 2010; Bregaglio *et al.*, 2015). D'autres modèles mécanistiques, plus complexes, requièrent de nombreuses données d'entrée et leurs sorties sont plus détaillées et spécifiques. Ils se concentrent sur les taux instantanés de chaque processus physiologique lié à l'environnement (Bregaglio *et al.*, 2015).

De nombreux modèles de systèmes agricoles existent tels que DSSAT (qui reprend les premiers modèles CERES), EPIC, APSIM, STICS, et WOFOST, pour ne citer que ceux-ci. Ils modélisent selon des échelles de temps et d'espaces différents.

Des biais liés à différentes sortes d'erreurs peuvent apparaître dans les modèles qui doivent alors être calibrés et validés avant leur utilisation.

La calibration consiste au paramétrage suite à la comparaison des sorties du modèle avec des données observées telles que des observations phénologiques (Kersebaum *et al.*, 2015). La validation sert à vérifier la robustesse et la fiabilité de la calibration (Pohanková *et al.*, 2015).

3. Matériel et méthode

3.1. Sites de mesure et données de référence

3.1.1. Le site d'étude

Les descriptions du site d'étude proviennent de Moureaux *et al.* (2006). Le site d'étude ICOS LTO (« Lonzée Terrestrial Observatory ») est situé à Lonzée à environ 45 kilomètres au sud-est de Bruxelles (50°33'08'' N, 4°44'42'' E, 165 m AMSL). L'aire de la parcelle d'étude est un quadrilatère d'environ 12 hectares. Les mesures utilisées pour la modélisation ont été prises sur 12 ans entre 2004 et 2016.

La parcelle se situe sur un plateau ayant une pente maximum de 1.2% dans la direction ouest-sud-ouest. Le sol est un Luvisol selon la classification de la FAO. Il est composé de 18-22% d'argile, 5-10% de sable et 68-77% de limon. Le climat est qualifié de climat tempéré chaud sans saison sèche, à été tempéré selon la classification de Köppen (Köppen, 1884; Peel, Finlayson et McMahon, 2007).

La parcelle mesurée est cultivée depuis plus de 70 ans. Pour les 6 ans précédents 2004, les cultures ont été de 50% de céréales et 50% de pommes de terre et betteraves. Aucun fumier n'a été appliqué sur la parcelle depuis 1996.

3.1.2. Gestion culturale

La rotation betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.)/froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.)/pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.)/froment d'hiver est une rotation typique de l'ouest de l'Europe. Elle s'effectue sur 4 ans comme décrit sur la figure 5 ci-dessous.

L'étude s'étend sur 12 ans. La rotation a été répétée 3 fois avec quelques modifications. Sur les deux derniers cycles, de la moutarde a été cultivée juste après la première récolte de froment et également après la deuxième récolte pour la dernière rotation. De plus, du maïs a remplacé la betterave en 2012 lors de cette dernière rotation. Un tableau reprenant le détail de l'itinéraire cultural est présent en annexe 1.

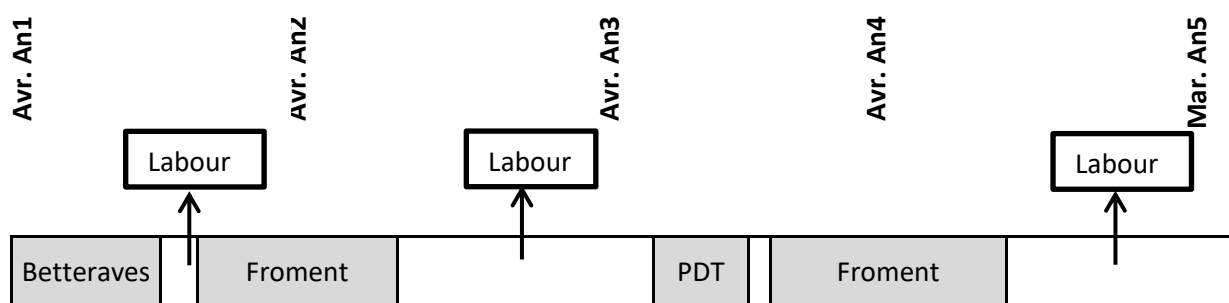


Figure 5 – Schéma présentant l'itinéraire technique de la première rotation culturale betterave sucrière/froment d'hiver/pomme de terre/froment d'hiver étudiée (2004-2007).

3.1.3. Mesures par la méthode d'Eddy covariance

La méthode d'Eddy covariance (EC) sert à mesurer des échanges de flux de chaleur sensibles, de dioxyde de carbone et d'autres gaz. Elle a permis de déterminer les échanges de dioxyde de carbone et de protoxyde d'azote de la parcelle.

Le système d'EC est utilisé par le réseau CarboEurope-IP et Fluxnet dont le site fait partie (Grelle et Lindroth, 1996; Moncrieff *et al.*, 1997; Moureaux *et al.*, 2006).

Ces mesures ont été prises à l'aide d'un mât d'une hauteur de 2,7 mètres. Il fournit un fetch⁷ de 240 mètres dans le sud-ouest qui est la direction principale du vent. Le bâtiment le plus proche est la ferme située à 400 mètres à l'ouest-sud-ouest du mât (cf. figure 6). Aucun autre bâtiment ou route n'est à signaler à moins de 1000 mètres. La seconde direction principale du vent est nord-est avec un fetch de 200 mètres. De ce côté, une seule rue peu fréquentée est à signaler. Le reste est uniquement composé de cultures.



Figure 6 - Situation du mât de mesure d'EC sur la parcelle étudiée à Lonzée.

Les mesures de flux de CO₂ ont été réalisées sur les 12 années d'étude mais seulement une année est disponible pour le N₂O.

En 2004, le matériel de mesure consistait en un anémomètre sonique et un analyseur de gaz infrarouge ainsi que de thermomètres. Les données de l'anémomètre sonique ont été échantillonnées à un taux de 20 Hz. Des mesures de contenu en eau du sol ont également été réalisées à différentes profondeurs.

Entre 2004 et 2016, le matériel a évolué et est composé de capteurs solaires, d'humidité, de contenu en eau du sol supplémentaire à des hauteurs différentes. Le détail du matériel de mesure est présenté en annexe 2.

⁷ Le fetch est l'empreinte/l'air des flux mesurés par le système.

3.1.4. Mesures sur la végétation

Au stade d'émergence de chaque culture, le nombre de plants à l'hectare a été décompté. À certains moments des stades de végétation, des mesures de LAI (Leaf Area Index) ont été conduites à l'aide d'une caméra et d'un analyseur d'image.

Le poids sec des feuilles et des tiges a également été déterminé. La hauteur, le pourcentage en carbone, azote et le poids des résidus ont été établis sur base des méthodes de référence laboratoire.

3.2. Le modèle STICS

3.2.1. Présentation générale

Le modèle STICS a été développé en 1996 par l'INRA (Institut National français pour la Recherche Agronomique). Son nom est un acronyme de « **S**imulateur mul**T**idisciplinaire pour les **C**ultures **S**tandards ».

C'est un modèle de culture dynamique, générique et robuste qui simule le système sol-plante-atmosphère par incrément journalier à l'échelle de la parcelle agricole. Il fonctionne sous la forme d'USM (unité de simulation). Il est reconnu internationalement (INRA⁸).

Le modèle STICS provient du rassemblement de plusieurs autres modèles constituant les différents modules qui le composent : les modèles GOA pour la plante, BYM pour l'eau et LIXIM pour l'azote (Nadine Brisson et Bruno Mary, INRA). D'autres modules se sont ajoutés au fur et à mesure.

Un réseau scientifique composé d'une trentaine de membres travaille à son développement aujourd'hui.

La croissance de différents types de cultures peut aujourd'hui être modélisée : des espèces cultivées, annuelles, pérennes, herbacées ou ligneuses (Brisson et Mary, INRA⁷).

Dans le cadre de ce travail, la version 9.0 du modèle STICS a été utilisée.

3.2.2. Les données d'entrée

Le modèle nécessite de nombreuses variables d'entrée contenues dans différents fichiers, comme illustré en figure 7.

Initialement, des fichiers sont déjà paramétrés et fournis avec le téléchargement du modèle. Ceux-ci concernent les paramètres généraux et le fichier « plante », si les cultures modélisées ont déjà été paramétrées.

Les paramètres généraux concernent les options de simulation. Les paramètres globaux concernent des facteurs égaux pour toute simulation. Par exemple, la part de radiation photosynthétiquement active (PAR) à la radiation globale, etc. Le fichier « plante » comprend les caractéristiques connues en lien avec le développement de cette plante.

⁸ www6.paca.inra.fr (consulté en mars 2019)

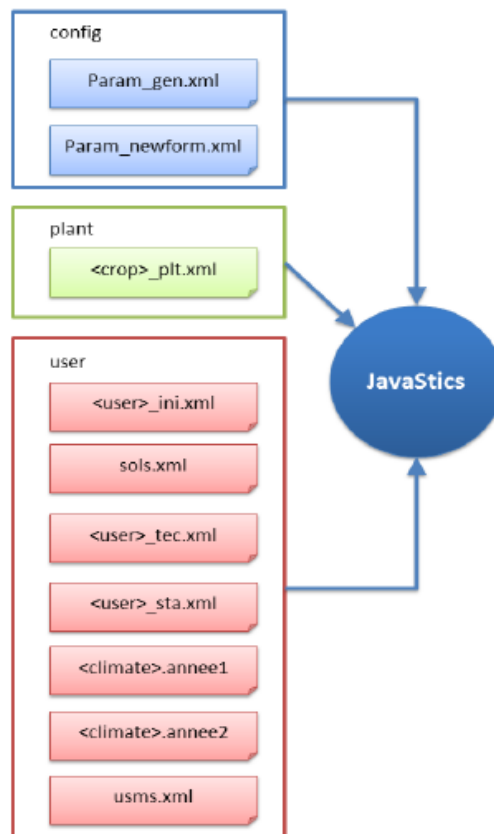


Figure 7 – Schéma présentant les fichiers d'entrée du modèle STICS (Source : Ripoché-Wachter et Lecharpentier, 2017).

Les fichiers à importer par l'utilisateur sont :

- le fichier contenant le descriptif des profils de sol tels que la profondeur des différents horizons, la densité, le contenu en azote, le ratio C/N, la texture, etc. ;
- les fichiers concernant les itinéraires techniques (IT) réalisés à l'aide du tableau situé en annexe 1. Ils comprennent les dates d'intervention converties en jour julien, les différentes dates de semis, de fertilisation, de travail du sol ainsi que quelques caractéristiques comme la profondeur de semis, la profondeur de labour, la variété semée, etc. ;
- le fichier concernant les caractéristiques de la station météorologique de référence (latitude, élévation, etc.) ;
- les fichiers climatiques reprenant les grandeurs journalières suivantes : les températures maximales et minimales, la quantité de précipitation, le rayonnement, la vitesse de vent moyenne, l'humidité de l'air, et la concentration en CO₂ de l'air ;
- les unités de simulations (USM) permettent de définir les caractéristiques de la simulation (date de début et de fin, enchainement sur plusieurs années, etc.) et de préciser les données d'entrée qui doivent être assemblées (itinéraire technique, fichier plante, données météorologiques, sol) pour réaliser une simulation.

3.2.3. Principe de fonctionnement

Le modèle STICS stimule l'interaction de 3 systèmes (le sol, la plante et l'atmosphère) qui amène chacun des inputs dans le système.

L'atmosphère est représentée par un ensemble d'inputs dérivés de mesures climatiques standards. La croissance du végétal est basée sur son assimilation du carbone en fonction du rayonnement. Comme l'illustre la figure 8, la plante convertit ce rayonnement en biomasse qui est redirigée vers les différents organes suivant un ratio source/puits (INRA⁹). L'évolution du développement de la plante est régi par un ratio thermique appelé « degré jour ». Le degré jour est un index établi selon une approche « unité de chaleur » ou « temps thermique ». Ce concept est lié au fait que les organismes vivants ont besoin d'emmagasiner un nombre fixe d'« unité de chaleur » pour croître ou mûrir (Hamdi, Chevallier et Bernoux, 2012).

La culture peut subir différents stress dont les unités de développement sont dépendantes. Les outputs du modèle sont nombreux. Ils peuvent autant concerner des variables agricoles comme le rendement ou des variables environnementales telles que les émissions de N₂O.

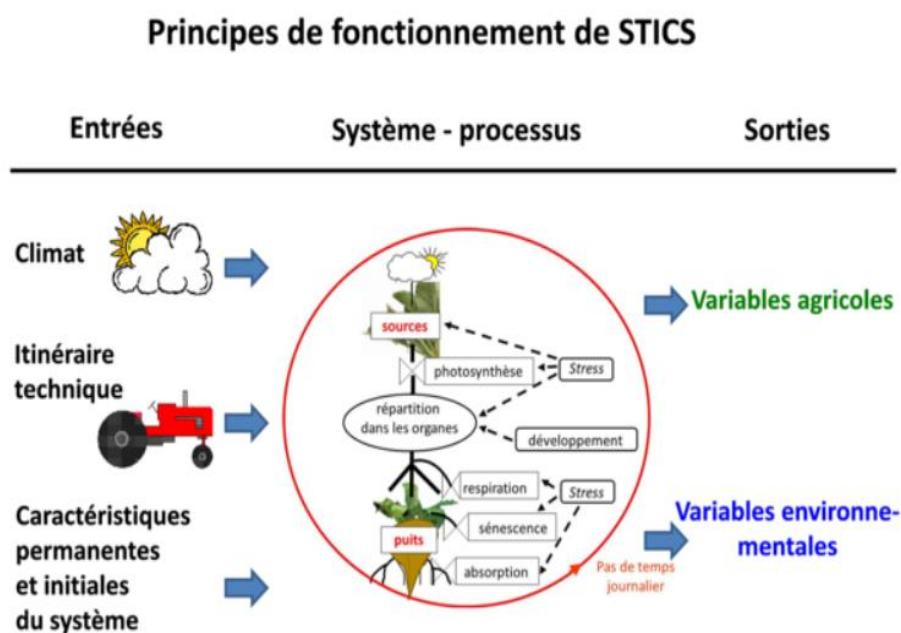


Figure 8 – Schéma résumant le principe de fonctionnement du modèle STICS (Source : www6.paca.inra.fr).

Le modèle de culture STICS est organisé en modules. Les trois premiers modules sont consacrés à la partie aérienne de la plante. Les 4 derniers sont destinés à simuler les interactions entre la partie souterraine du végétal et le sol. A ceux-ci s'ajoutent les modules microclimat et management (Brisson *et al.*, 2008).

La description des différents modules est rédigée dans le chapitre suivant.

⁹ www6.paca.inra.fr (consulté en mai 2019)

Diverses options peuvent être activées ou désactivées selon les besoins. Par exemple, la compétition pour les assimilats entre les organes végétatifs et de réserve.

3.2.4. Les modules

A. La phénologie

Le développement

Les stades phénologiques (voir tableau 1) sont employés pour décrire la dynamique végétative et le remplissage des organes de récolte. A chaque étape de développement, un changement dans l'évolution des dynamiques se produit. Le graphique suivant (figure 8) schématise les relations entre l'évolution du LAI et la masse du grain (variable *MAGRAIN*). Il est issu de Brisson *et al.* (1998).

Dans ce modèle, une distinction est faite entre deux groupes de plantes. Les plantes indéterminées et déterminées. Pour les espèces déterminées (froment d'hiver, pomme de terre, moutarde, maïs), la croissance de la plante entre les stades LAT et DRP détermine le nombre de grains ou d'organes de récolte. Tandis que pour les plantes indéterminées (betterave sucrière), le nombre de fruits ou d'organes de récolte est un paramètre génétique fixe. Ceux-ci se remplissant plus ou moins en fonction de l'assimilation de la plante.

Tableau 1 - Liste des stades phénologiques de STICS. Certains stades sont fonction de l'option choisie : * pour les cultures semées, ** pour les cultures déterminées, *** pour les cultures indéterminées (Adapté de Brisson *et al.*, 2008)

Stades végétatifs (LAI)	Stades organes récoltés
<i>IPLT</i> : semis ou plantation	
<i>IGER</i> * : germination	
<i>ILEV</i> : émergence ou débourrement végétatif	
<i>ILET</i> : fin du stade de sensibilité au gel des plantules	<i>ILAT</i> ** : début de la phase critique de l'apparition du nombre de grains
<i>IAMF</i> : accélération maximum de la croissance foliaire, fin de phase juvénile	<i>IFLO</i> : floraison (début de la sensibilité au gel des fruits)
	<i>IDRP</i> : début du remplissage des organes de récolte
<i>ILAX</i> : LAI maximum, fin de croissance foliaire	<i>IDEBDES</i> : début de la dynamique hydrique des fruits
	<i>IMAT</i> : maturité physiologique
<i>IREC</i> : récolte	

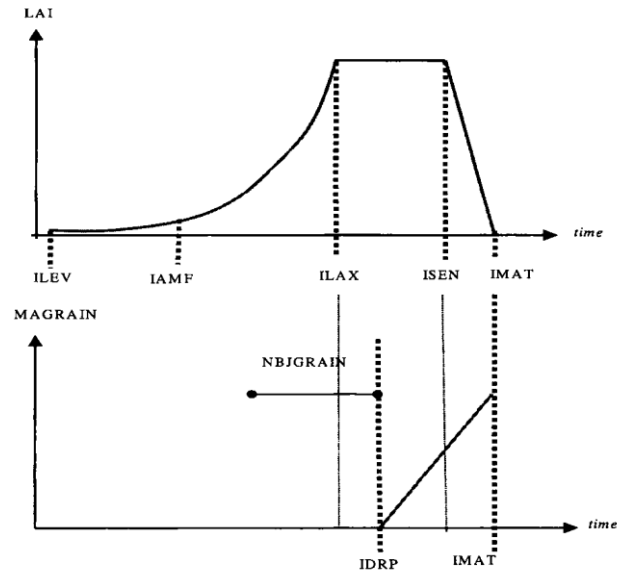


Figure 9 - Schéma de la relation entre les stades et l'évolution du LAI, de la croissance du grain et de la maturation du grain (Adapté de Brisson *et al.*, 1998).

Calcul des unités de développement

Les périodes séparant le début de vie et la maturité sont spécifiques à chaque variété. Chacune est caractérisée par des unités de développement et une somme de degrés-jours pour les atteindre, celles-ci peuvent être fonction d'un effet photopériodique ou de vernalisation (Brisson *et al.*, 2003).

B. La croissance de la partie aérienne

Le LAI

L'option standard pour simuler le LAI dans STICS est de faire calculer le bilan entre la croissance et la senescence, en ajoutant les stress hydriques, de chaleur ou azotés (Brisson *et al.*, 2003).

L'interception des radiations

Deux options peuvent être choisies pour simuler l'interception du rayonnement. L'une intègre la loi de Beer et l'autre prend en compte la géométrie de la culture (Brisson *et al.*, 2003). La loi de Beer établit la probabilité de l'interception comme ayant une augmentation exponentielle avec le LAI projeté en direction de la radiation et la distance à travers la canopée (Ponce de León et Bailey, 2019).

L'efficacité d'utilisation des radiations (RUE)

Le modèle STICS calcule l'incrément journalier de la biomasse aérienne, comme étant le résultat net des processus de photosynthèse, respiration et distribution. L'équation suivante décrit *deltams*, la variable qui incrémente la production de biomasse. *deltams* est égale à la fonction RUE multiplié par un facteur FCO_2 si l'option « changement climatique » est activée (Brisson *et al.*, 2003).

FCO_2 est un facteur qui augmente avec la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. L'effet de celle-ci sur la RUE est exponentiel (cf. équation 5). Le formalisme employé est issu de Stockle *et al.* (1992). La valeur 350 ppm¹⁰ est la valeur courante de concentration dans l'atmosphère au moment de l'étude et 600 ppm la valeur maximum évaluée dans l'étude.

$$FCO_2 = 2 - \exp \left[\log(2 - ALPHACO_2) * \frac{CO_{2c} - 350}{600 - 350} \right] \quad (5)$$

Comme expliqué précédemment, le métabolisme des plantes en C3 et en C4 est différent. En effet, la résistance stomatique des plantes en C3 est plus faible que celle des plantes dites en C4. Par conséquent, une concentration plus grande en CO_2 amènera à un rendement plus élevé pour les C3 mais quasi inchangé ou légèrement plus haut pour les C4.

Le graphique suivant (figure 10) illustre l'évolution du facteur FCO_2 en fonction de la concentration atmosphérique en CO_2 pour deux espèces différentes, le froment (plante en C3) et le maïs (plante en C4).

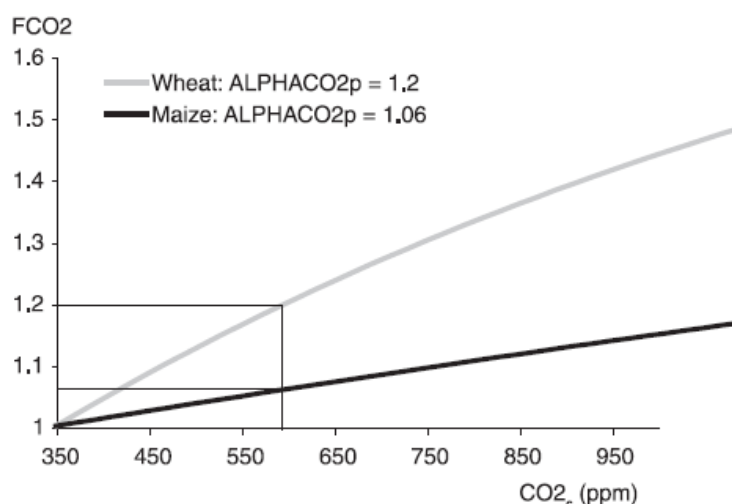


Figure 10 - Évolution du facteur FCO_2 en fonction de la concentration atmosphérique en CO_2 dans le modèle STICS (Source: Brisson *et al.*, 2008).

Les indices de stress

Les stress sont des facteurs qui réduisent les fonctions vitales des plantes. Leurs indices s'étalent entre 0 et 1. Ces facteurs sont calculés selon des variables d'entrée. Par exemple, le contenu en eau du sol est une variable qui peut induire un stress sur la disponibilité en eau pour la racine (Brisson *et al.*, 2003).

¹⁰ Partie par millions (unité de concentration).

C. La croissance de la racine

Le modèle STICS modélise séparément la croissance de la plante au-dessus et en dessous du sol. L'avancement du front racinaire est fonction de la température du sol, de la teneur en eau du sol et est spécifique à chaque espèce.

D. La gestion de la culture

Les fertilisants

L'azote minéral est originaire des fertilisants, de l'eau d'irrigation et de la pluie (environ 0,02 kg N / ha/ mm). Les fertilisants perdent de l'azote par la volatilisation et l'immobilisation selon leur type. La distribution de ceux-ci dans le profil de sol est également dépendante du type de labour. Le taux de volatilisation est calculé en fonction de l'équilibre forme ionique/forme moléculaire atteint par le sol, qui lui-même dépend de la composition minéralogique, de la teneur en matière organique, du pH et de la température du sol (Brisson et al., 2003).

E. Le bilan azoté - carboné

La minéralisation

La minéralisation de l'azote peut provenir de la minéralisation de l'humus ou des résidus organiques (immobilisation possible également).

L'humification est influencée par la réserve en azote organique humifié, la texture, l'humidité et la température du sol (Brisson et al., 2003).

La minéralisation des résidus organiques (cf. figure 11) est sous la dépendance du taux de décomposition des résidus et de la biomasse (*KRES*, *KBIO*), du rapport C/N de ceux-ci (*CNRES*, *CNBIO*) et de l'humus (*CNHUM*), de la biomasse et de la formation de l'humus (Nicolardot, Recous et Mary, 2001; Brisson et Mary, 2002a). Ces variables sont, soit constantes, soit calculées en fonction du ratio C/N des résidus (*CNRES*) (Brisson et Mary, 2002). La figure 12 expose l'évolution des constantes de vitesse de décomposition.

Sur la figure 11, les lignes continues représentent les flux de carbone et les lignes pointillées les flux d'azote.

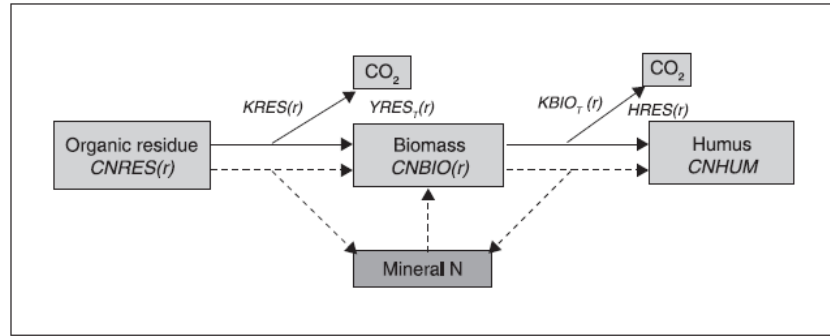


Figure 11 - Diagramme flux de la décomposition des résidus organiques dans le modèle STICS (Source : Nicolardot, Recous et Mary, 2001).

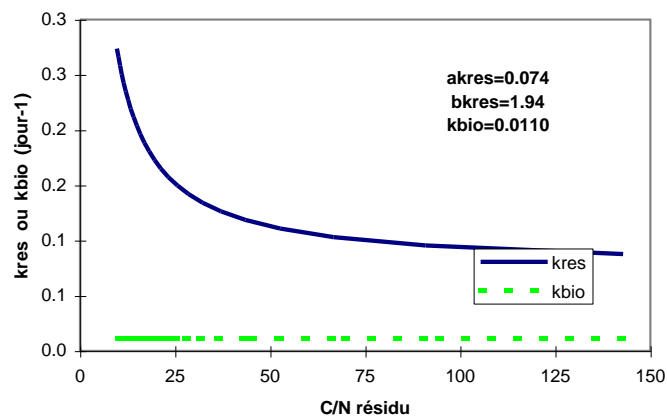


Figure 12 - Evolution des constantes de décomposition (*kres*, *kbio*) en fonction du ration C/N des résidus dans le modèle STICS (Source : Brisson et Mary, 2002).

Les variables de sorties liés à l'émission de CO_2 par la minéralisation du sol sont *CO2hum*, lié à la minéralisation de l'humus, *CO2res*, lié à la minéralisation des résidus organiques et *CO2sol*, la somme des deux.

La nitrification

La production de nitrate dans les sols provient de deux actions successives : la minéralisation puis la nitrification. Cette dernière est la transformation de l'azote minéral en nitrate ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$) qui se produit à partir de la surface jusqu'à la profondeur d'humification (*profhum* dans le fichier sol) (Brisson *et al.*, 2008).

Cette nitrification est fonction de la disponibilité en ions NH_4^+ (figure 13), de la température, la teneur en eau et du pH du sol (cf. équation 6, Léonard, 2016).

Si l'option linéaire est activée, la vitesse de nitrification est fonction de la proportion d'ammonium disponible (Léonard, 2016).

$$v_{nit} = v_{nitpot} * f_{NH4} * f_{pH} * f_T * f_{WFPS}$$

(6)

Où :

- v_{nit} est la vitesse de nitrification réelle [mg/kg/jour] ;
- v_{nitpot} est la vitesse potentielle de nitrification qui est liée linéairement à la concentration en ammonium disponible [mg/kg/jour] ;
- f_{NH4} est l'effet du NH_4 [-] (figure 13);
- f_{pH} est l'effet linéaire du pH [-] ;
- f_T est l'effet de la température [-] ;
- f_{WFPS} est l'effet du contenu en eau du sol [-].

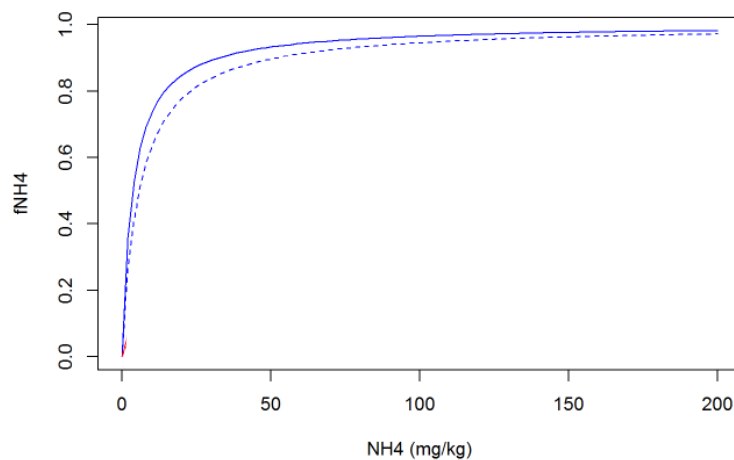


Figure 13 - Évolution du facteur f_{NH4} en fonction de la concentration en NH_4 dans le modèle STICS (Source : Léonard, 2016).

La dénitrification

Elle est calculée sur la profondeur *profdenit*, entrée dans le fichier « sol ». Le taux de dénitrification évolue avec la température du sol, la concentration en nitrates et la teneur en eau (cf. équation 7, Brisson *et al.*, 2008). Les figures 13 et 14 illustrent ces effets.

$$v_{denit} = v_{denitpot} * f_{NO3} * f_T * f_{WFPS}$$

(7)

Où :

- v_{denit} est la vitesse de nitrification réelle [mg/kg/jour] ;
- $v_{denitpot}$ est la vitesse potentielle de nitrification calculée à partir du carbone organique disponible (figure 14, Léonard, 2016) [mg/kg/jour] ;
- f_{NO3} est l'effet de la concentration en nitrates (figure 15) [-] ;
- f_T est l'effet de la température [-] ;
- f_{WFPS} est l'effet de la teneur en eau du sol (figure 17) [-].

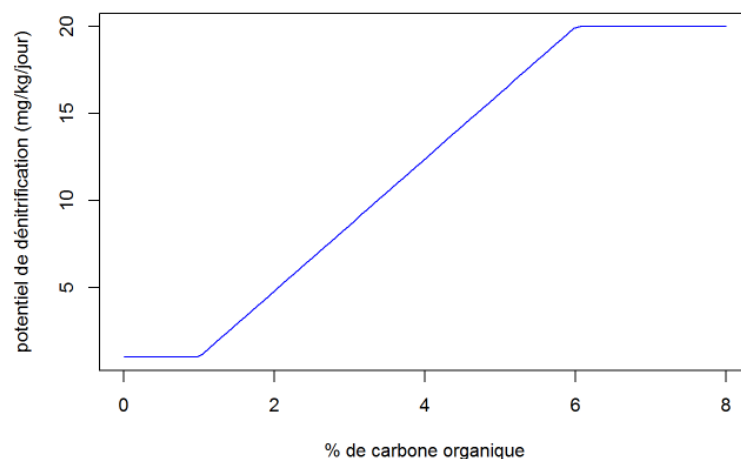


Figure 13 - Evolution du potentiel de dénitrification en fonction du pourcentage de carbone organique disponible dans le sol dans le modèle STICS (Source : Léonard, 2016).

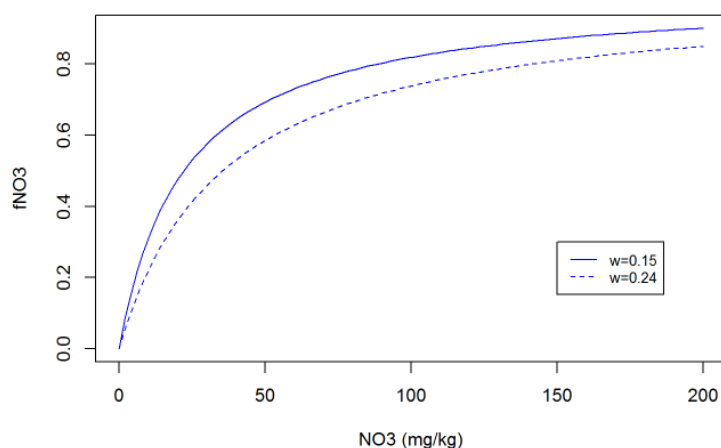


Figure 14 - Evolution facteur FNO_3 en fonction de la concentration en NO_3 dans le sol (Source : Léonard, 2016). (w est la teneur en eau massique).

La dénitrification qui est un processus anaérobie. Il faut donc une certaine concentration d'eau dans le sol avant que la dénitrification soit active. Cette limite est le facteur w_{psc} dans le modèle (Léonard, 2016). Il dépend de la structure du sol.

L'absorption d'azote

L'absorption d'azote est le minimum entre la demande de la culture et la réserve en azote du sol. La première correspond à une relation qui a été évaluée pour quelques cultures majeures par (Greenwood, Stone et Draycott, 1990). Celle-ci est fonction du métabolisme de la plante. Les plantes en C4 ont besoin d'un plus faible pourcentage en azote par rapport à leur biomasse comparé aux plantes en C3 (Gastal et Lemaire, 2001). Cette demande minimale correspond, dans le modèle STICS à un index de nutrition azoté (INN). Si la plante est en stress azoté, c'est par ce facteur que STICS le simule (Brisson *et al.*, 2003). Tandis que la réserve en azote du sol est estimée par couche de 1 centimètre le long de la racine.

Les émissions de N_2O

Avec la nitrification et la dénitrification, peuvent survenir des émissions de N_2O . z et r sont respectivement le ratio d'azote nitrifié et dénitrifié émis sous forme de N_2O .

Selon l'option activée, dans le modèle STICS, la variable z est égale à une valeur constante de 0,0016 ou, par défaut, varie avec la teneur en eau (cf. figure 15). Si elle varie, la hausse exponentielle à de fortes teneurs en eau, est due à l'anoxie qui induit plus de pertes d'azote sous forme de N_2O .

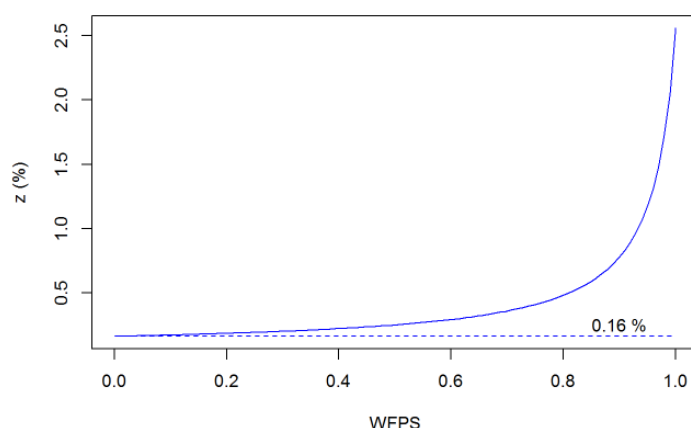


Figure 15 - Évolution du ratio z en fonction de l'état hydrique du profil de sol dans le modèle STICS (Source : Léonard, 2016).

Comme z , r peut soit prendre une valeur constante de 0,2, soit varier. Il évolue selon le pH (figure 17), la teneur en eau du sol (figure 16) et la concentration en nitrate.

Les figures suivantes illustrent l'évolution de chaque facteur par ordre d'importance. En effet, le pH aura plus d'impact que la teneur en eau et la concentration en nitrate sur le potentiel de réduction du N_2O en N_2 (Léonard, 2016).

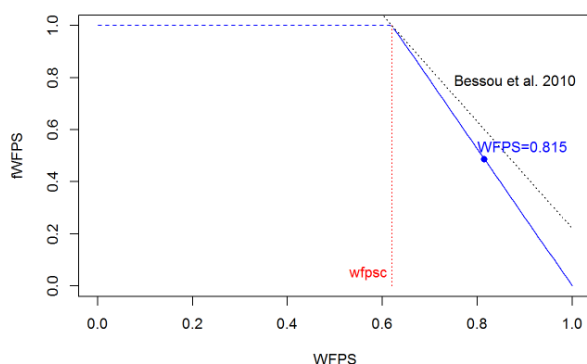


Figure 16 - Évolution du facteur WFPS en fonction de l'état hydrique du profil de sol (Source : Léonard, 2016).

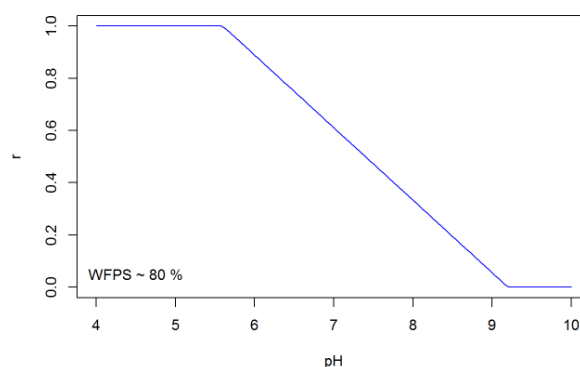


Figure 17 - Évolution de r en fonction du pH du sol pour WFPS ~80 % et du nitrate en abondance (Source : Léonard, 2016).

Lorsque le sol est saturé en eau, il y a moins d'oxygène disponible donc la réduction se fait complètement jusqu'à la formation de N_2 (Bessou *et al.*, 2010).

F. Évaluation du stock de carbone dans le sol

La variable *Chumt* représente le stock de carbone du sol. La première valeur est calculée à partir des entrées *norg*, *profhum*, *CsurNsol*, *DAF* (densité) et *cailloux* du fichier sol à l'aide des équations 8, 9 et 10. Cette valeur est recalculée pour chaque couche de 1 centimètre de la surface du sol à la profondeur *profhum* (profondeur de la couche biologique active) (Brisson *et al.*, 2008; Ferchaud, 2018).

$$corg = norg * CsurNsol \quad (8)$$

$$Msol = DAF * \left(1 - \frac{cailloux}{100}\right) * 100 \quad (9)$$

$$Chumt = corg * Msol \quad (10)$$

Où :

- *corg*, est la teneur en carbone organique de la couche [% sol sec] ;
- *norg*, est la teneur en azote organique de la couche [% sol sec] ;
- *CsurNsol*, est le ratio C/N de la matière organique de la couche [-] ;
- *Msol*, est la masse de sol de la couche [g /cm³] ;
- *DAF*, est la densité apparente de la fraction fine de terre de la couche [g/cm³] ;
- *cailloux*, est la teneur volumique en cailloux de la couche [m³/m³] ;
- *Chumt*, est la quantité de carbone dans la matière organique humifiée de la couche [kg] -> [kg/ha] ;

Chumt est la somme des variables *Chuma* et *Chumi* représentant respectivement la partie active et inerte du stock de carbone dans le sol. Le ratio *Chumi/Chumt* est de 0.65. Le stock de carbone inerte est recalculé après chaque simulation en fonction de la modification du stock de la partie labile (« Biomass » à la figure 11)(Andriulo, Mary et Guerif, 1999).

3.2.5. Les sorties du modèle

Les sorties principales de STICS sont d'ordres agronomiques ou environnementales. Comme variable de sorties agronomiques principales, on peut citer le rendement ou la qualité des organes récoltés. Le bilan hydrique, carboné ou azoté incluant les prélèvements, la lixiviation, les échanges de gaz à effet de serre par exemple font partie des sorties environnementales disponibles (Brisson *et al.*, 2003).

3.3. Les entrées du modèle

3.3.1. Les caractéristiques du sol

Les éléments proviennent de la base de données Aardewerk associée à la PCNSW¹¹. Les paramètres ont été calculé à partir de fonctions de pédotransfert (Bernoux *et al.*, 1998; A. A. Suleiman et J. T. Ritchie, 2001; Brisson *et al.*, 2008).

3.3.2. Elaboration des fichiers climatiques actuels

Les traitements de données effectués dans ce travail ont été réalisés à l'aide du logiciel Matlab v2016a. Les fichiers climatiques actuels ont été créés à partir des données provenant de la station météo ICOS fournies à l'échelle semi-horaire. Les transformations effectuées pour chaque jour sont rassemblées dans le tableau 2. Au besoin, certaines variables ont été recalculées.

Tableau 2 - Opération réalisées sur les variables climatiques.

Entrée du modèle	Variable utilisée	Transformation
Température minimale [°C]	Température	Minimum
Température maximale [°C]	Température	Maximum
Vitesse de vent [m/s]	Vitesse de vent	Moyenne
Précipitation [mm]	Précipitation	Somme
Rayonnement [J/m²]	Rayonnement	Intégration, somme, transformation d'unité
Pression de vapeur [mPa]	HR	Moyenne, voir équations 11, 12 et 13

Le calcul de la pression de vapeur à partir de l'humidité relative moyenne journalière (HR [%]) nécessite l'utilisation des équations suivantes afin de déterminer au préalable les pressions de vapeur minimales et maximales journalières et la pression de vapeur saturante.

$$eS_{min/max} = 0.6108 * \exp\left(\frac{17.27 * T_{min/max}}{T_{min/max} + 273.3}\right) * 10 \quad (11)$$

¹¹ geoportail.wallonie.be

$$es_{moy} = \frac{(es_{min} + es_{max})}{2} \quad (12)$$

$$ea = \frac{(HR * es_{moy})}{100} \quad (13)$$

Où :

- es_{min} et es_{max} sont les pressions de vapeurs maximales et minimales journalières [mbars] ;
- T_{min} et T_{max} sont les températures maximales et minimales journalières [°C];
- es_{moy} est la pression de vapeur saturante journalière [mbars];
- ea est la pression de vapeur journalière [mbars] ;
- HR est l'humidité relative moyenne journalière [%].

Les données manquantes dans la base de données (interruption des capteurs, etc.) ont été remplacées par celles de la station météo d'Ernage auxquelles un coefficient de corrélation entre les deux sites a été préalablement établi.

3.3.3. Les données climatiques futures

Les inputs météorologiques futurs proviennent du modèle ALARO-0 de l'institut Royal Météorologique de Belgique qui est considéré comme un modèle correct pour la simulation d'un climat régional (De Troch *et al.*, 2013; Giot *et al.*, 2016).

Les données ont été générées pour deux scénarios climatiques RCP 4.5 et RCP 8.5 à l'horizon 2070-2100. Celles-ci ont été calibrées avec des données historiques observées de 1980 à 2001, à Ernage, village situé à 5 kilomètres du site étudié. La comparaison temporelle et sous forme de bilan a été réalisée.

3.4. Les mesures de gaz

3.4.1. Détermination de la respiration de l'écosystème

Les données de la respiration de l'écosystème proviennent de la base de données FLUXNET¹². La démarche liée à la méthode de l'Eddy Covariance a été utilisée pour les traiter. Un résumé de ce traitement est présent ci-dessous.

Les échanges nets de l'écosystème (NEE, Net Ecosystem Exchange [$\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$]) sont mesurés par la méthode d'Eddy Covariance. Cet échange net est la somme de la Production primaire (GPP, < 0) et de la respiration (Reco, > 0).

¹² https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dataset_list.pl?p=9

NEE est la somme du flux turbulent de CO₂ (Fc) mesuré réellement et du stockage d'air dans la canopée (Sa) (équation 14).

$$Sa = \sum_{couche\ h=0}^{h=hc} \frac{\Delta C_a}{\Delta t} * \frac{\Delta z}{V_{mol}} \quad (14)$$

Pendant la nuit, la plante ne photosynthétise plus, donc la valeur de *GPP* est nulle. De ce fait, pendant la nuit la *NEE* est égale à la respiration de l'écosystème. La journée, la respiration de l'écosystème n'est pas mesurée directement mais doit être extrapolée. Le set de données est donc divisé par périodes en fonction de la végétation qui est présente ou pas sur le sol. Effectivement, la respiration de l'écosystème est fonction de la température, du contenu en eau du sol, de la biomasse microbienne et racinaire de la plante, ... Sur ces périodes, la variable la plus corrélée à *Reco* pendant la nuit est utilisée pour extrapoler les valeurs de *Reco* la journée (Aubinet et al., 1999).

Comme toute méthode, l'EC a des limites. Si la turbulence est trop faible, la respiration est sous-estimée. La vitesse de friction (u^*) est utilisée comme proxy de la turbulence. Les valeurs dont u^* est inférieur à u^*_{lim} sont donc supprimées du set de données. Une correction spectrale est également réalisée.

Les valeurs finales ont subi une transformation d'unité afin de correspondre à l'unité kilogramme par hectare au pas de temps journalier des sorties du modèle STICS.

Cependant, le modèle STICS ne modélise que la respiration provenant du sol. Il faut donc séparer la respiration hétérotrophe de la respiration autotrophe dans la respiration de l'écosystème. Aubinet *et al.* (2009) et Suleau *et al.* (2011) estiment la respiration autotrophe à au moins 65% de la respiration totale de l'écosystème. Une importante approximation est réalisée afin de faire ressortir uniquement la partie hétérotrophe de la respiration mesurée. Lorsqu'il y a de la végétation, la respiration de la plante est retirée à la respiration de l'écosystème complet. Le LAI est utilisé comme variable permettant de déterminer s'il y a respiration autotrophe ou non. Lorsque celui-ci est supérieur à zéro, la respiration de l'écosystème est multipliée par le coefficient 0.35. Cette part représentant la partie hétérotrophe de la respiration.

3.4.2. Flux d'oxyde nitreux

La description du traitement des données de N₂O (filtre u^* limite, correction spectrale, ..) est décrite complètement dans Lognoul *et al.*, 2019).

Dans le cadre de ce travail, les flux moyens journaliers ont été fournis par les auteurs. Seule une transformation de ces flux moyens fournis à l'échelle journalière a été réalisée afin de calculer le flux total à l'échelle d'une journée.

3.5. Test et évaluation du modèle

Les graphiques de l'évolution dans le temps d'une variable simulée et observée sont réalisés afin d'évaluer la qualité du modèle. Ensuite, des graphiques de lien entre une même variable d'intérêt

simulée et observée ont également été réalisés. Finalement, des variables statistiques telles que l'erreur quadratique moyenne, l'efficacité ou la déviation normale sont calculées (Brisson *et al.*, 2003).

A. L'erreur quadratique moyenne (RMSE)

L'erreur quadratique moyenne ou RMSE (« Root Mean Square Error », en anglais) sert à analyser le degré de coïncidence entre les valeurs observées et simulées (Willmott *et al.*, 1985).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (15)$$

Où : n est le nombre d'observations, O_i est la variable observée et P_i est la variable simulée.

L'ordre de grandeur du RMSE est fonction de l'ordre de grandeur de la variable. Plus il est grand, moins le modèle est efficace. Plus le RMSE est proche de zéro, plus le modèle est précis (Choudhury *et al.*, 2018). Un RMSE minimum est donc recherché.

B. La déviation normale (ND)

$$ND = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (16)$$

Elle peut être négative ou positive, respectivement lorsque le modèle sous-estime ou sur-estime les observations. Si ND est nul, le modèle est considéré comme parfait. Une valeur absolue de ND inférieure à 0.15 est recherchée.

C. L'efficacité de modélisation (EF)

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (<O> - O_i)^2} \quad (17)$$

Où : $<O>$ est la moyenne des valeurs observées.

La valeur maximum est 1, ce qui veut dire que le modèle est considéré comme parfait. Si EF est négatif, cela signifie que le modèle est moins efficace que de prendre la moyenne des valeurs observées (Loague et Green, 1991). Le critère concernant l'EF est une valeur EF inférieure à 0.5.

4. Résultats et discussions

Les résultats de ce travail sont divisés en deux parties :

- Premièrement, la comparaison des produits du modèle STICS relative aux variables agronomiques et aux échanges de gaz du test de modélisation sur la rotation à Lonzée pour les 12 années actuelles (2004-2016).
- Deuxièmement, une comparaison de la modélisation de la culture de référence actuelle et les simulations projetées dans un futur à l'horizon 2070-2100. Pour ces simulations, l'option de modélisation « changement climatique » a été activée.

4.1. Test et évaluation du modèle

4.1.1. Variables agronomiques

Pour chaque saison de végétation, les mesures de croissance et les variables simulées ont été comparées. Celles-ci dépendent des données d'observations disponibles. Pour certaines saisons de végétation, le LAI, la masse sèche aérienne et la masse du fruit sont disponibles. Pour d'autres, la quantité d'azote est également mesurée.

Les graphiques ci-dessous sont présentés par plante cultivée. Dans les illustrations des valeurs observées par rapport aux valeurs simulées, la ligne rouge représente la droite 1:1, droite illustrant une modélisation idéale. Sur ces graphiques, la droite jaune représente la régression linéaire des points de comparaison.

Concernant les tableaux des paramètres statistiques, les valeurs en rouge représentent celles ne répondant pas aux critères de validité du modèle. Pour rappel, RMSE minimum, $EF > 0.5$ et $DN < 0.15$.

La première culture exposée est la betterave cultivée en 2004, 2008 et 2016. Ensuite, la modélisation de la croissance du froment d'hiver est analysée. Celui-ci est cultivé un an sur deux et est récolté durant les mois d'août 2005, 2007, 2009, 2011, 2013 et 2015. La troisième culture est la pomme de terre qui est semée entre les deux saisons de froment en 2006, 2010 et 2014. La croissance de l'interculture de moutarde est ensuite décrite. Enfin, la modélisation de la croissance du maïs en 2012 est analysée.

A. Betterave sucrière

La variété Calgahri a été semée en 2008 et Lisanna KWS en 2016. Aucune variété n'a été communiquée par l'agriculteur pour la première année.

Pour la culture de 2016, le paramètre *durvieF* est modifié afin de faire diminuer au maximum la déviance entre les données observées et les données simulées (tableau 3).

Les graphiques suivants (figure 18) comparent le LAI, la masse sèche et la masse racinaire des données d'observation et de simulation de la betterave sucrière. Globalement, l'évolution de la croissance de la betterave est correctement simulée par le modèle. Cependant, la prédiction de la

croissance du LAI au-dessus de 3 m² de feuilles par m² de sol est saccadée alors que les observations sont plus continues. La saison de croissance de 2016 est surestimée sur la fin de la culture.

Le tableau 4 reprend les paramètres statistiques de la modélisation de la culture de betterave. Tous les paramètres répondent aux critères souhaités sauf un. Le modèle simule donc correctement cette culture excepté pour la masse racinaire qui est très légèrement surestimée.

Tableau 3 - Paramètre modifié dans STICS pour les simulations de la culture de betterave.

Paramètre	Valeur initiale	Valeur utilisée (2016)
<i>durvieF</i>	95	87

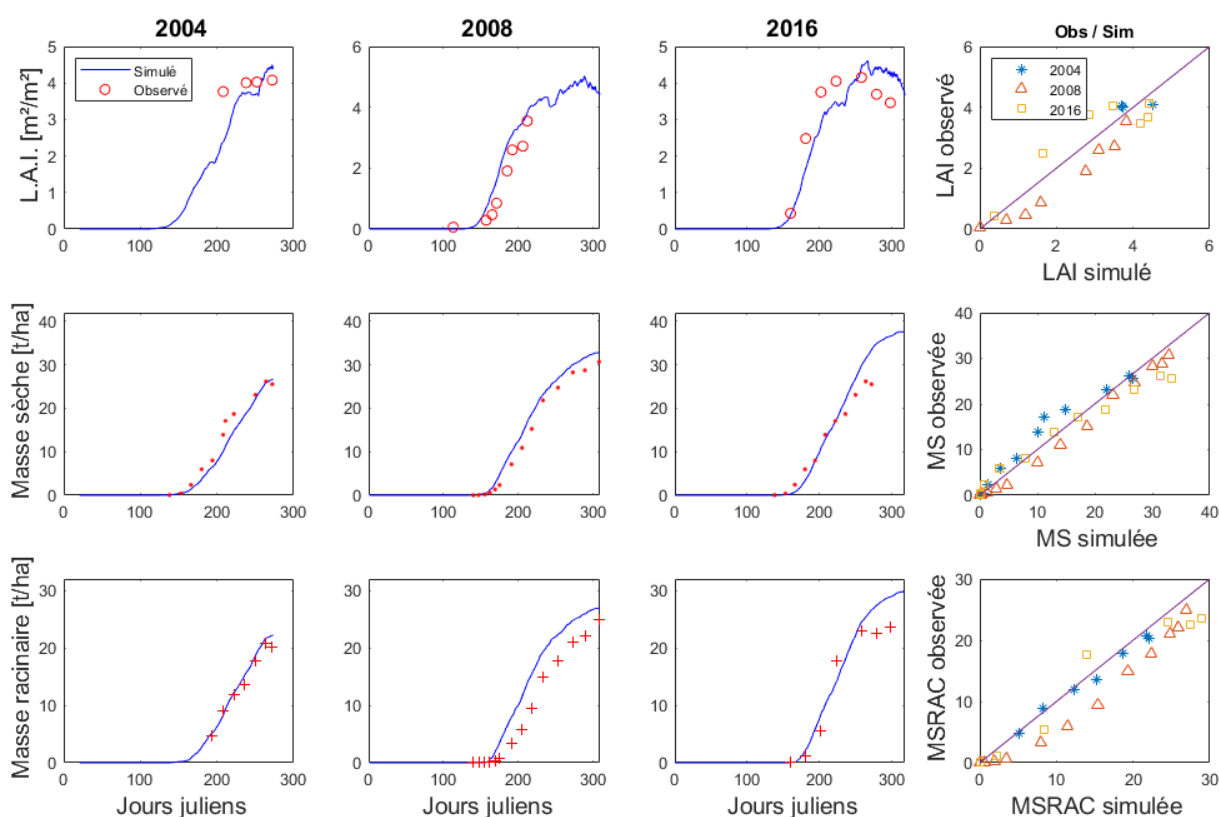


Figure 18 – Comparaison des observations et simulations pour chaque année de la culture de la betterave.

Tableau 4 - Paramètres statistiques de la modélisation des cultures de betterave.

Élément	RMSE	EF	ND
LAI	0.63	0.82	0.04
MS	2.66	0.94	0.05
MSRAC	3.05	0.89	0.19

Diminuer le paramètre *durvieF* permet de rétrécir la durée de vie des feuilles. Ce paramètre garde sa valeur initiale pour les deux premières simulations de la culture de betterave.

Le seul critère non respecté dans le tableau 4 est causé par la légère surestimation de la masse racinaire en 2008 et 2016. Ceci est certainement dû à la variété qui diffère de la première année. Mais, dans la littérature, plusieurs études montrent une surestimation de cette variable lors de la simulation de betterave sucrière (Baey *et al.*, 2012).

B. Froment d'hiver

Depuis 2004, un froment est semé un hiver sur deux. Les variétés cultivées sont toujours différentes excepté pour les années 2008-2009 et 2014-2015, où la variété Sahara a été choisie.

Pour le froment, les variables LAI, masse sèche aérienne et masse sèche de l'épi entier ont été comparées. Dans ce cas, la masse de l'épi a été mis en parallèle avec la variable *mafruit* des simulations. En effet, cette dernière ne prenant en compte que la masse des grains, la comparaison peut donc être biaisée (figure 19 et 20). Enfin, dans les figures 19 et 20, l'* représente le rendement. Ce point observé ne prend en compte que les grains.

Il n'y a pas eu de changement de valeur de paramètres pour la culture de froment. Le tableau 5 contient les paramètres statistiques pour la simulation du froment d'hiver et la figure 21 illustre la similitude entre les variables observées et simulées pour la totalité des cultures de froment.

Globalement, l'évolution des observations et de la simulation sont similaires. Visuellement, un décalage dans le temps de l'évolution du LAI est présent pour la première et la troisième saison de végétation du froment d'hiver. En 2011 et 2013, le LAI n'est pas simulé de façon assez importante pour atteindre la valeur observée à environ 4 m² de feuilles par m² de sol.

L'évolution de la masse sèche aérienne est légèrement surestimée pour les trois premières cultures et sous-estimée pour les trois dernières. Concernant le rendement (*mafruit*), il est faiblement surestimé dans la plupart des cas.

La progression de la quantité d'azote dans la plante est convenablement modélisée jusqu'aux alentours de 150 kg N /h. Après, la variable simulée stagne et ne suit plus l'avancement des valeurs mesurées.

Les critères statistiques sont généralement respectés, excepté pour la variable *QNplante*. Cependant, l'efficacité du modèle pour le LAI est très basse, et pour la masse de l'épi est légèrement trop faible. De plus, la déviation de la masse de l'épi est un peu trop haute. Enfin, la simulation de la quantité d'azote dans la plante est largement sous-estimée pour des quantités supérieures à 150 kg N/ha (figure 19).

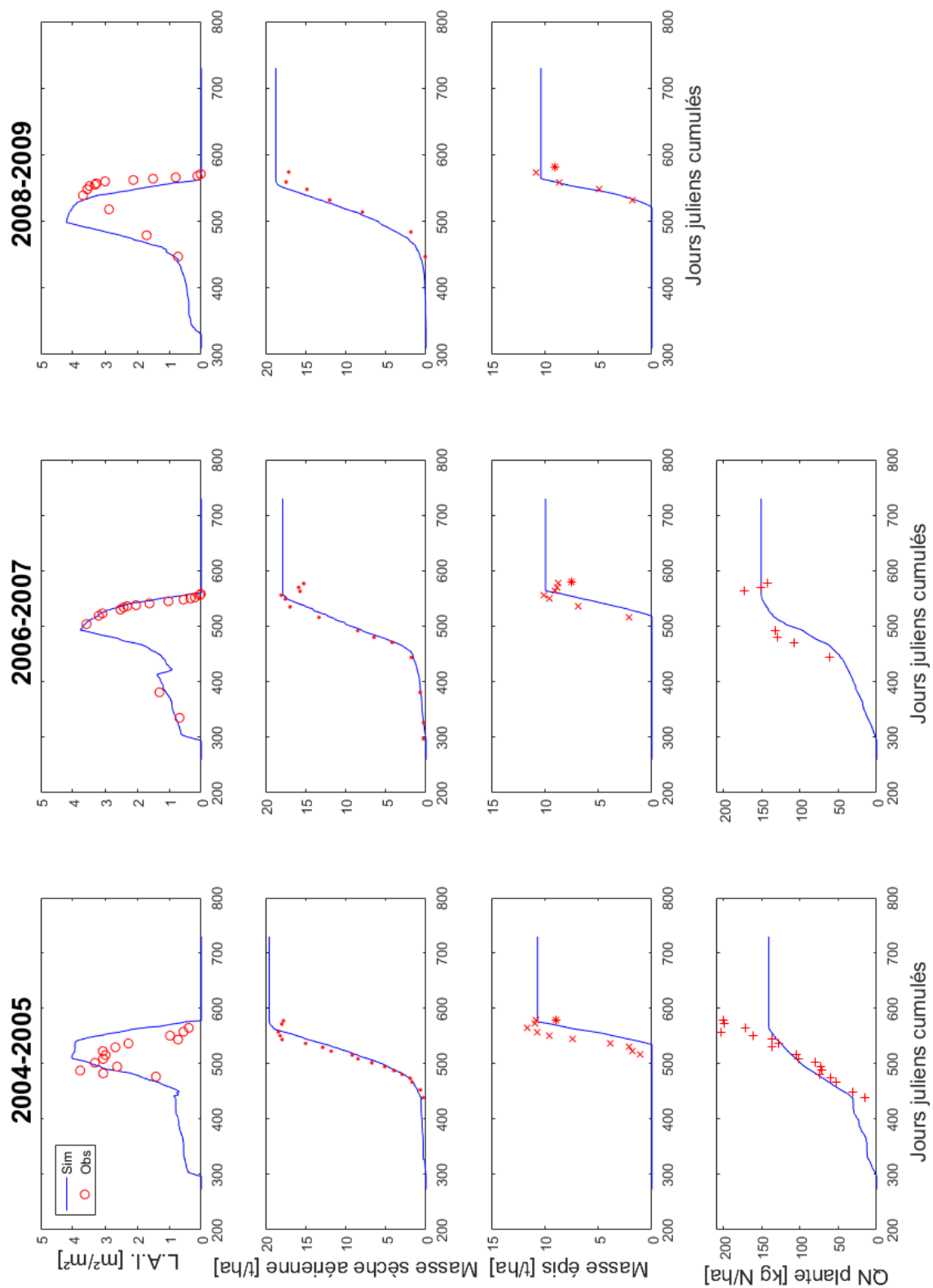


Figure 19 - Comparaisons observations et simulations pour les trois premières années de culture du froment.

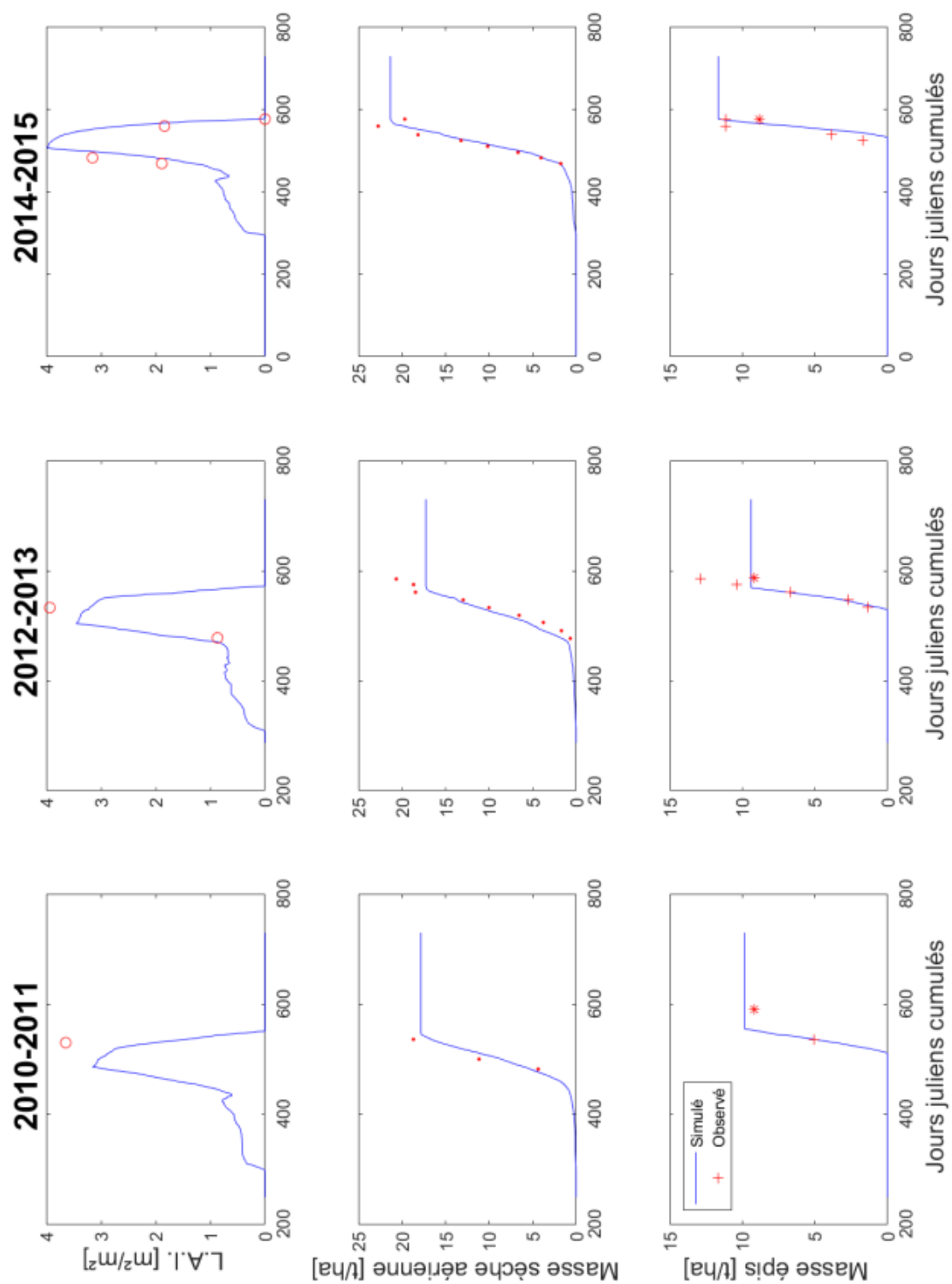


Figure 20 - Comparaisons observations et simulations pour les trois dernières années de culture du froment.

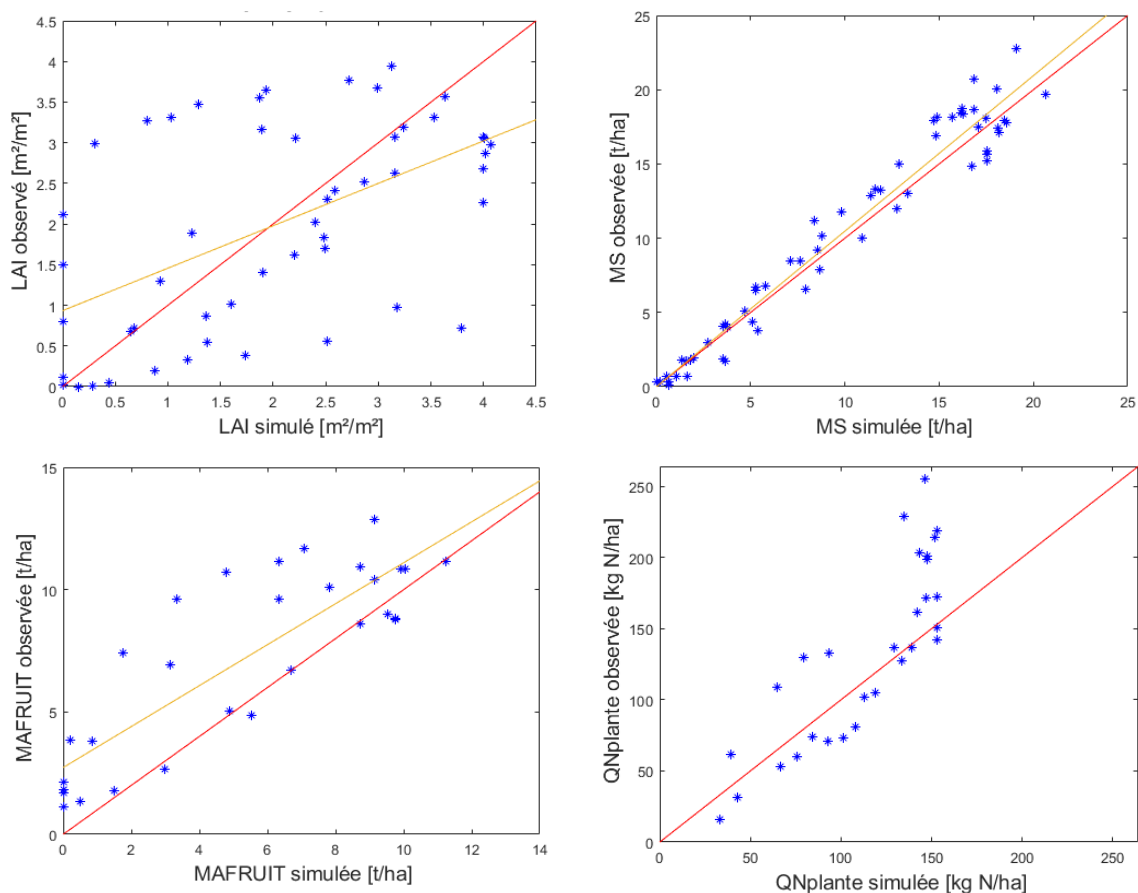


Figure 21 – Comparaison des observations et simulations de la culture du froment.

Tableau 5 - Paramètres statistiques de la modélisation des cultures de froment.

Élément	RMSE	EF	ND
LAI	1.22	0.05	0.01
MS	1.59	0.95	-0.05
Masse épis	2.81	0.44	-0.26
QN plante	119.25	-3.77.10 ³	230.22

Le modèle STICS sous-estime parfois le LAI dans des cas de faible radiation. Cela a un impact sur la masse sèche aérienne qui suit cette tendance à la baisse également (Brisson *et al.*, 2003). Cela se remarque pour les saisons 2010-2011 et 2012-2013. L'annexe 3 présente les variations de la radiation selon les années.

La forme très dispersée du nuage de point du LAI observé en fonction du LAI simulé se retrouve dans d'autres simulations dans la littérature (Baret, Houlès et Guérif, 2007; Falconnier *et al.*, 2019). Cette dispersion et une EF aussi basse peut être expliquée par le léger décalage dans le temps de la

dynamique de croissance et sénescence entre la simulation et l'observation qui a une grande conséquence sur la comparaison (Falconnier *et al.*, 2019).

La sous-estimation de *mafruit* par le modèle est expliquée par l'observation qui comprend la masse de l'épis entier et pas uniquement la masse des grains.

C. Pomme de terre

A chaque saison de culture de pomme de terre, la variété semée est différente : *Spunta* (2006), *Draga* (2010) et un mélange *Draga*, *Bianchidea* et *Kennebec* avec une majorité de *Draga* (2014).

Le tableau 6 présente les paramètres changés dans le modèle avant les simulations. La figure 22 illustre l'évolution et la figure 23, la comparaison entre les données observées et les données modélisées.

Le paramètre *croirac*, intervenant dans la modélisation de la croissance de la racine a copieusement été diminué. Tandis que les valeurs de *durvieF* et *stlevamf* ont été augmentées. Cette dernière module la durée entre les stades ILEV et IAMF (émergence et fin de phase juvénile, cf. tableau 1) (tableau 6).

Globalement, la simulation du LAI est en dessous des mesures. Concernant la masse des nouveaux tubercules de pomme de terre, simulation et observation coïncident jusqu'à environ 7 t/ha (figures 22 et 23). Ensuite, une bifurcation se présente. Une surcroissance en 2010 et une stagnation trop basse en 2014 sont observées. Finalement, la modélisation de la quantité d'azote dans la plante est trop basse.

A la figure 23, les droites de régression sont en dessous des bissectrices. Le tableau 7 présente les paramètres statistiques. Quasiment aucun des critères d'évaluation du modèle n'est respecté.

Tableau 6 - Paramètres modifiés dans STICS pour les simulations de la culture de pomme de terre.

Paramètre	Valeur initiale	2006	2010	2014
<i>croirac</i>	0,09	0,04	0,03	0,05
<i>durvieF</i>	300	400	/	/
<i>stlevamf</i>	150	/	400	300

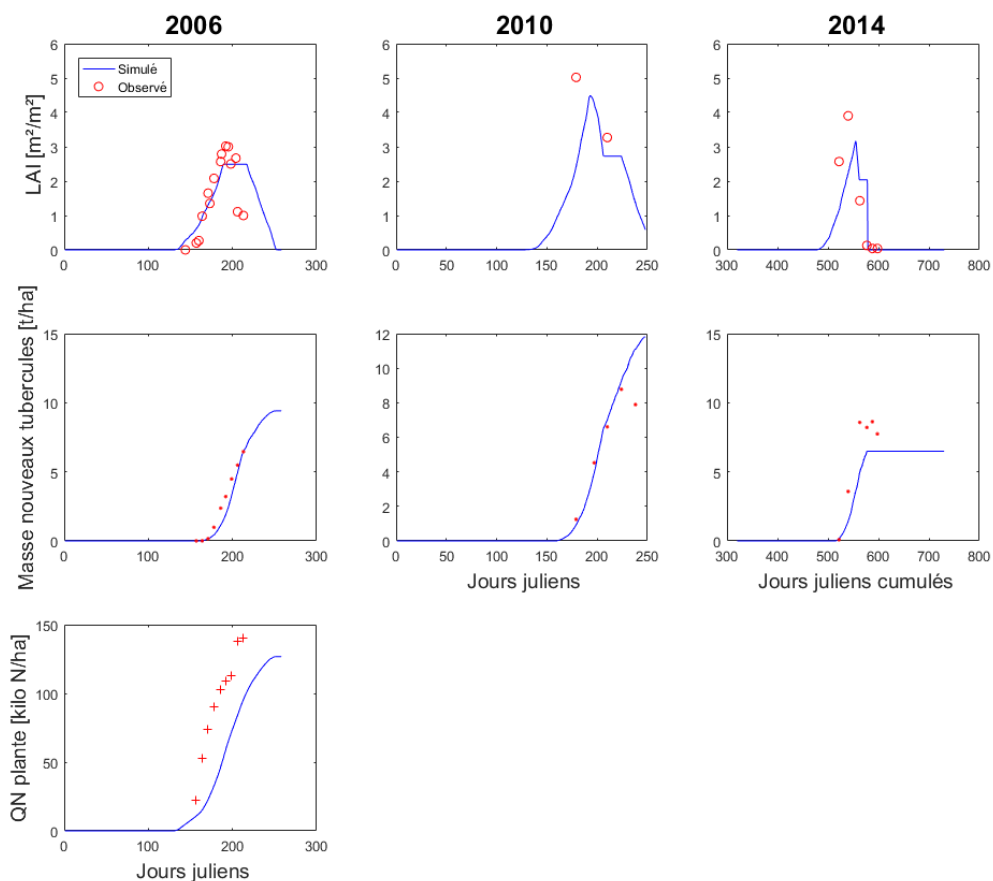


Figure 22 - Comparaisons observations et simulations pour chaque année de culture de pomme de terre.

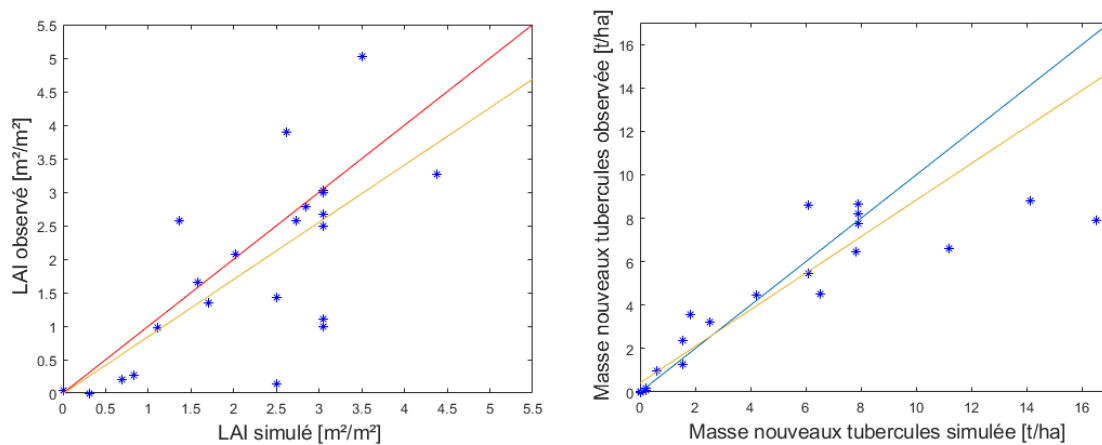


Figure 23 - Comparaison observations et simulations de la culture de pomme de terre.

Tableau 7 - Paramètres statistiques de la modélisation des cultures de pomme de terre.

Élément	RMSE	EF	ND
LAI	0.99	0.47	0.18
MSNVXTUB	2.66	0.31	0.18
QN plante	72.52	-3.97	695.28

Les observations de racines réalisées sur le terrain, montrent que leur profondeur ne dépasse pas 50 centimètres. C'est pour cette raison, que le paramètre *croirac* a été diminué (tableau 6). L'augmentation de *durvieF* a permis d'augmenter la croissance du LAI. La variable *stlevamf* a été rehaussée afin d'atteindre le point maximum des valeurs de LAI mesurées (tableau 6).

D'après une étude de Morissette *et al.*, (2016), la sous-estimation du LAI est grande s'il y a eu une haute fertilisation. Les quantités d'azote liquide appliquées au champ varient de 72 à 120 kg N/ha, respectivement pour la dernière et la première année. L'explication est donc vérifiée pour l'année 2006.

Les grandes erreurs du modèle peuvent être influencées par la variété de la pomme de terre. Effectivement, la variété utilisée par le modèle est *Bintje*. Le tableau suivant (tableau 8) présente les différences entre les variétés. En outre, le coefficient de développement foliaire est plus haut pour la variété *Draga* qui a été cultivée en 2010 et 2014. Ceci justifie l'augmentation du paramètre *stlevamf* et explique le degré bas de qualité de modélisation du LAI.

Tableau 8 – Facteurs caractéristique des variétés de pomme de terre (Source : NIVAP HOLLAND, 2011).

Caractéristiques	Bintje	Spunta	Draga
Développement foliaire	8	8	9
Taille des tubercules	7	9	8.5
Rendement	7.5	8	6

Pour conclure, bien que la littérature contienne de meilleurs résultats, l'efficacité du modèle concernant la simulation de la pomme de terre n'est pas idéale dans ce cas (Morissette *et al.*, 2016). Le fichier « plante » fourni n'est qu'un prototype et nécessite des améliorations de paramétrisation.

D. Moutarde

Pour la simulation de la moutarde, certains paramètres ont été modifiés. Le tableau 9 présente ces modifications. Les paramètres *udlaimax* et *efcroiveg* ont été réduits.

Les données observées concernant la moutarde sont peu nombreuses. La simulation du LAI des saisons de végétation 2009 et 2013 sont illustrées malgré le manque d'observations (figure 24) afin de pouvoir comparer le développement par année. La figure 25 illustre la comparaison des données observées et des données simulées. La courbe simulée serre de manière très proche les seules valeurs de LAI disponibles.

La masse sèche aérienne simulée est constamment légèrement plus haute que les observations (figures 24 et 25). La masse sèche racinaire est parfaitement modélisée en 2009, celle-ci a un taux de croissance trop bas en 2015.

Concernant l'évaluation de la modélisation (tableau 10), seul le paramètre ND pour la masse sèche ne respecte pas le critère inférieur à 0.15 en valeur absolue. Le modèle surestime celle-ci.

Tableau 9 – Paramètres modifiés dans STICS pour les simulations de la culture de moutarde.

Paramètre	Valeur initiale	Valeur utilisée
<i>udlaimax</i>	2,85	2,05
<i>efcroiveg</i>	4,9	3

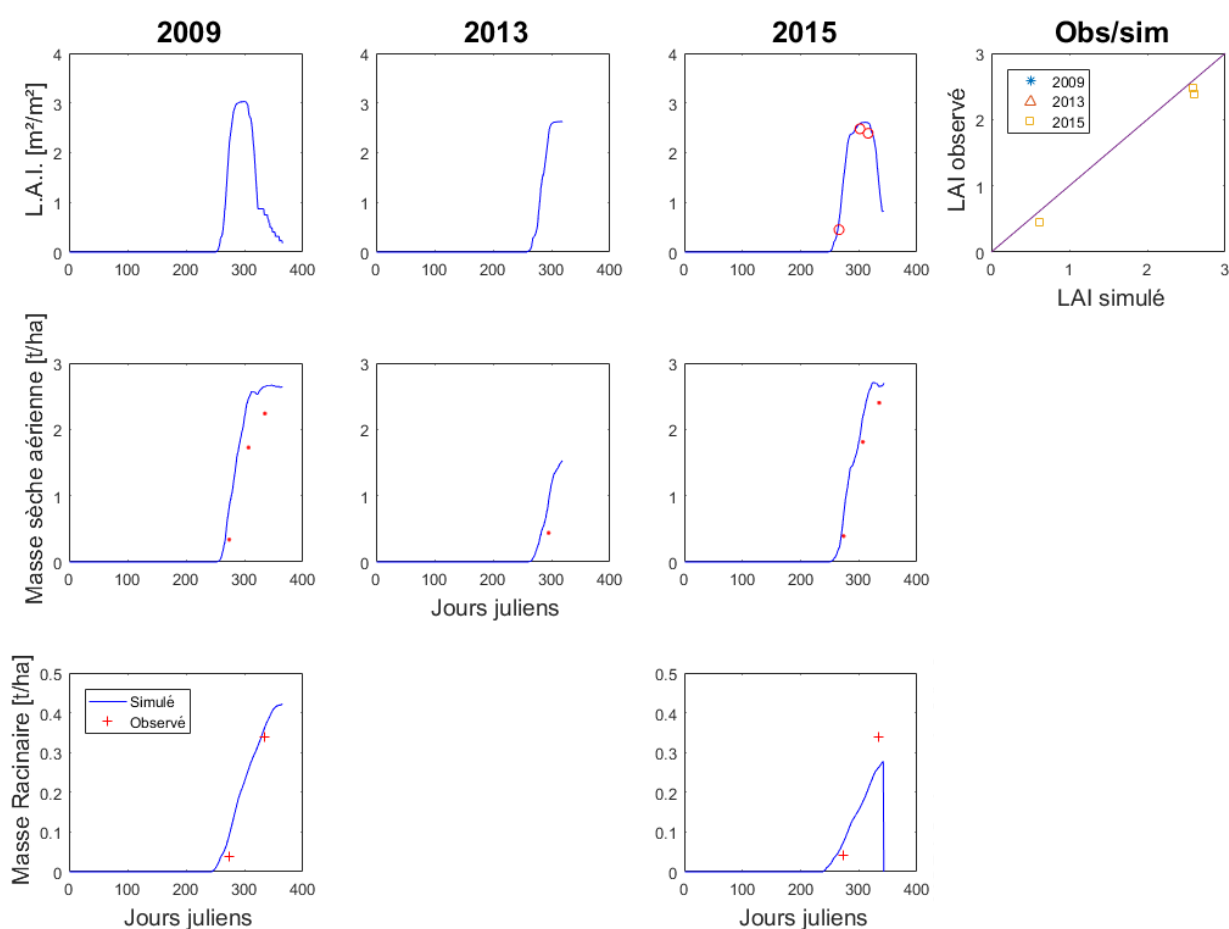


Figure 24 - Comparaisons observations et simulations pour chaque année de culture de moutarde.

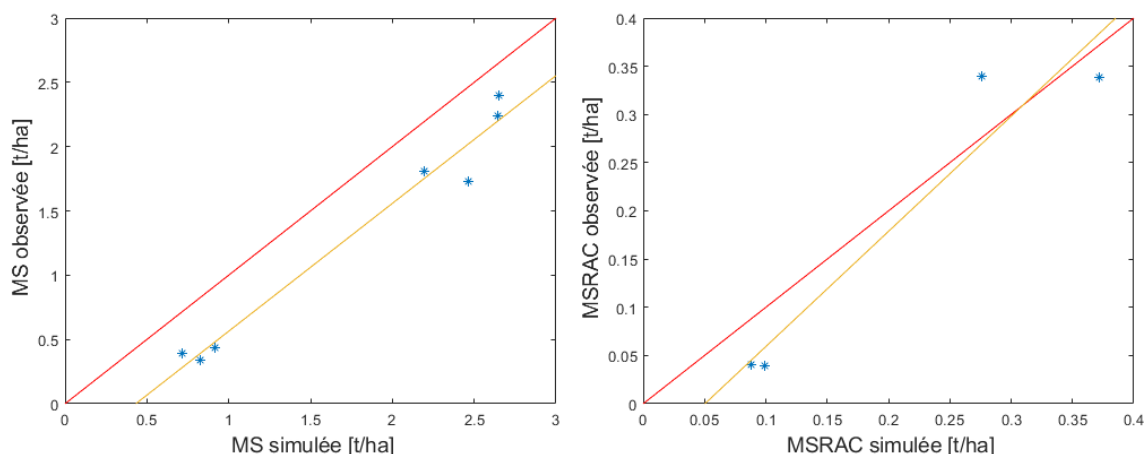


Figure 25 - Comparaison observations et simulations de la culture de moutarde.

Tableau 10 - Paramètres statistiques de la modélisation des cultures de moutarde.

Élément	RMSE	EF	ND
LAI	0.17	0.97	0.09
MS	0.46	0.70	0.33
MSRAC	0.05	0.88	0.10

Le paramètre *udlaimax* représente l'unité de développement du LAI à laquelle le taux de croissance des feuilles diminue. Il a été réduit afin de simuler une senescence des feuilles plus tôt comme le montrent les mesures de 2015 (figure 24).

La variable *efcroiveg* a également été amoindrie. Celle-ci paramétrise la *RUE* maximum pendant la phase végétative (entre AMF et DRP). Ceci permet d'accumuler moins de biomasse dans la partie aérienne.

Pour l'année 2015, le paramètre permettant d'augmenter la partition de biomasse apportée à la partie aérienne ou à la racine (*PROPRAC*) n'est probablement pas assez dirigé vers la racine. Mais ce n'est pas le cas pour 2009.

E. Maïs

Une seule saison de maïs a été réalisée dans les rotations. Elle remplace la betterave au début de la troisième rotation en 2012.

La figure 26 montre l'évolution de la masse sèche aérienne et de la masse des carottes de maïs simulées et observées. La figure 27 compare ces deux jeux de données. La masse sèche simulée est légèrement moindre par rapport aux observations alors que la masse sèche des carottes de maïs est convenable.

D'après le tableau 11, tous les critères statistiques sont respectés

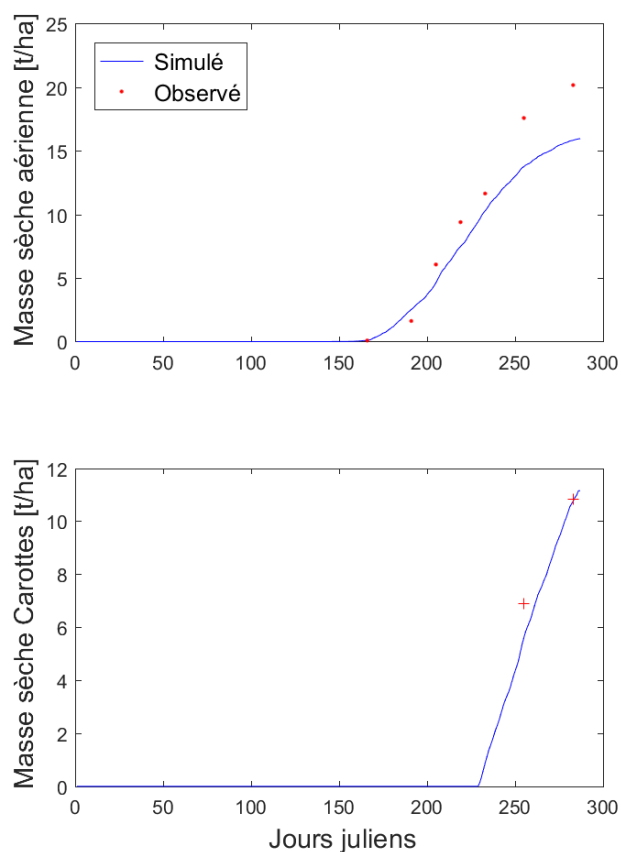


Figure 26 - Comparaison de la masse sèche aérienne et la masse sèche des carottes de maïs (saison 2012), observées et simulées (1).

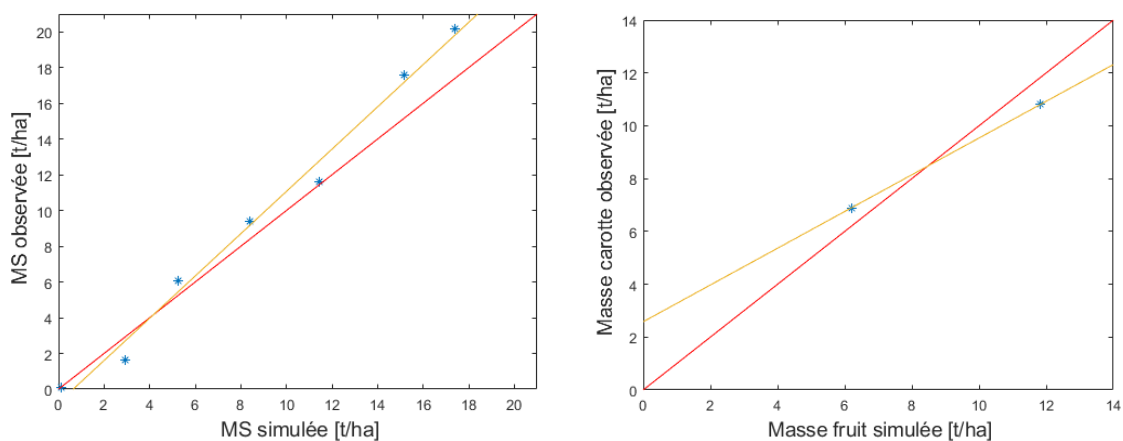


Figure 27 - Comparaison de la masse sèche aérienne et la masse sèche des carottes de maïs (saison 2012), observées et simulées (2).

Tableau 11 - Coefficients statistiques évaluant le modèle pour la simulation Maïs Lonzée 2012.

Variable	RMSE	EF	ND
Masse sèche aérienne	1.54	0.96	0.10
Masse sèche fruit	0.87	0.99	-0.02

L'évaluation de la modélisation ne peut pas être complète concernant la masse de carottes car il y a peu d'observations disponibles.

La sous-estimation de la biomasse sèche aérienne est remarquée dans d'autres études comme dans Jégo *et al.* (2011) et Sansoulet *et al.* (2012). Cette diminution peut-être due à un stress hydrique, dû à un creux dans les précipitations après le jour 225 qui n'est pas simulé par le modèle (voir annexe 4).

4.1.2. Variables environnementales

A. Échanges de dioxyde de carbone

Seules les données de 2004 à 2013 ont été comparées. Pour commencer, l'évolution entre la respiration de l'écosystème et la variable CO_{2sol} , modélisée par STICS est mise en parallèle. Ensuite, l'approximation de la respiration hétérotrophe et l'évolution du LAI, en plus de la variable modélisée sont illustrées.

Premièrement, les figures 28, 29 et 30 représentent l'évolution des flux de CO_2 mesurés et simulés au cours du temps et au cours de chaque rotation. Seuls les flux issus de la respiration du sol sont simulés tandis que la respiration de l'écosystème entier est mesurée par la méthode d'EC.

Globalement, les mesures sont au-dessus des émissions prédites par le modèle. La dynamique des flux mesurés est régie par la présence ou non de respiration autotrophe ou non. Les mesures sont plus importantes chaque fois qu'un froment d'hiver ou un maïs est cultivé. Concernant les flux modélisés, les dynamiques de production de CO_2 sont liées aux récoltes (annexe 1). Le point des émissions simulées le jour de chaque récolte correspond au sommet de la série de la simulation. Ce dernier est supérieur aux mesures dans la plupart des cas. Dans les autres cas, les mesures sont nulles mais le modèle continue à prédire la respiration.

En rotation 1, en 2004, après le pic maximum simulé, la dynamique entre les simulations et les mesures est la même. Elle tend à la diminution.

En 2005, autour du jour julien cumulé 450, deux fertilisations sont réalisées, ceci amène à une augmentation jusqu'à environ 10 kg/ha/jour de production de CO_2 prédite. Le même phénomène mais avec une double intensité est observé autour du jour 450 en 2009. La même amplitude est observée après le jour 436 en 2011. Par contre, en 2012, un pic est mesuré autour du jour julien 140. Il intervient après une fertilisation et n'est pas aussi accentué dans les simulations.

La montée des points de mesures entre le jour 450 et 550 en 2005 suit les mêmes petites variations sur la simulation. Il en est de même pour la descente. Ce phénomène se répète de manière plus ou moins marquée pour chaque saison de végétation. Au jour 581, la récolte émet un peu plus d'émissions. Mais le gros pic habituel est décalé dans le temps.

En 2006, le point simulé le plus haut correspond au jour de broyage de la betterave. Il est suivi par un petit sommet. Le même phénomène est observé après le broyage de la betterave en 2008.

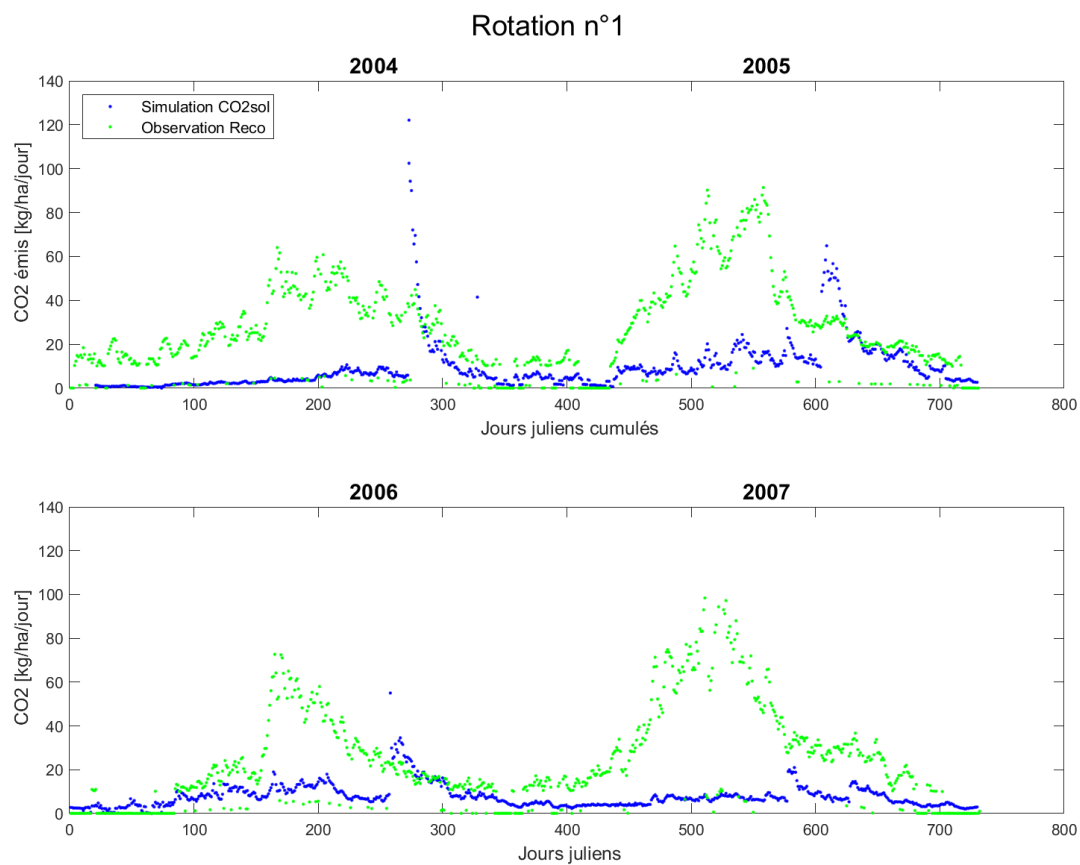


Figure 28 - Evolution journalière de l'émission de CO₂ simulée et observée pendant la première rotation.

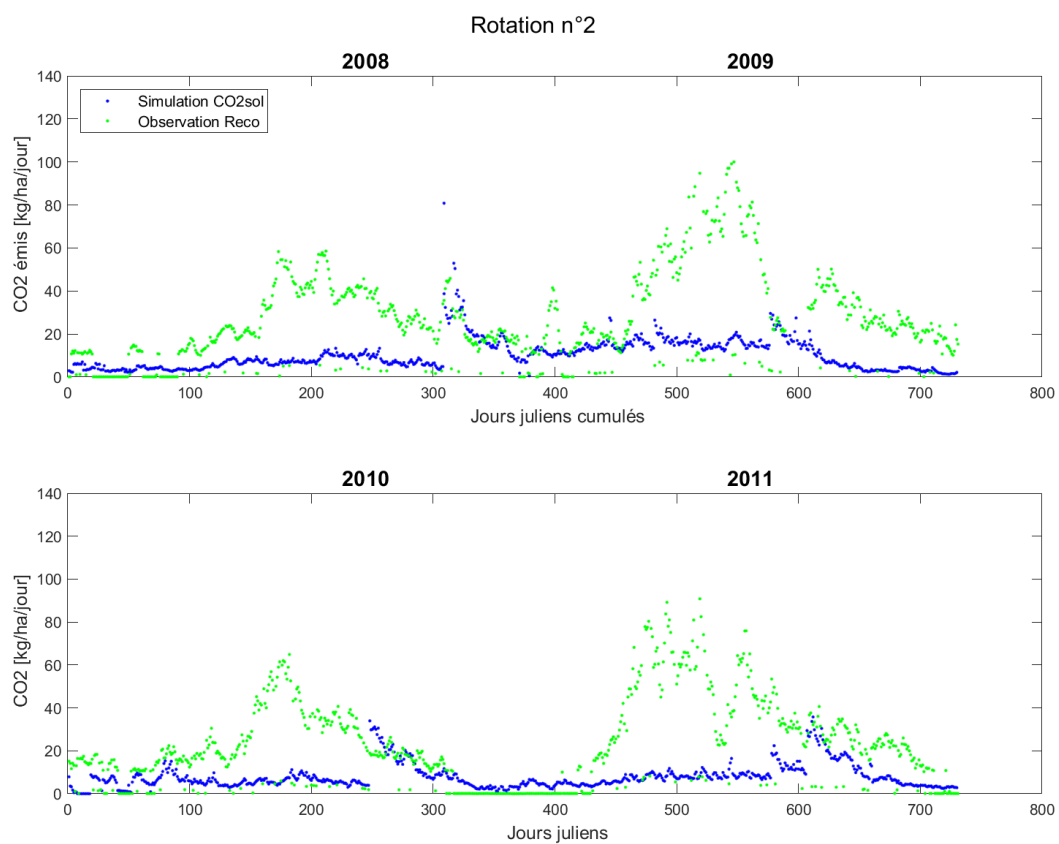


Figure 29 - Evolution journalière de l'émission de CO₂ simulée et observée pendant la deuxième rotation

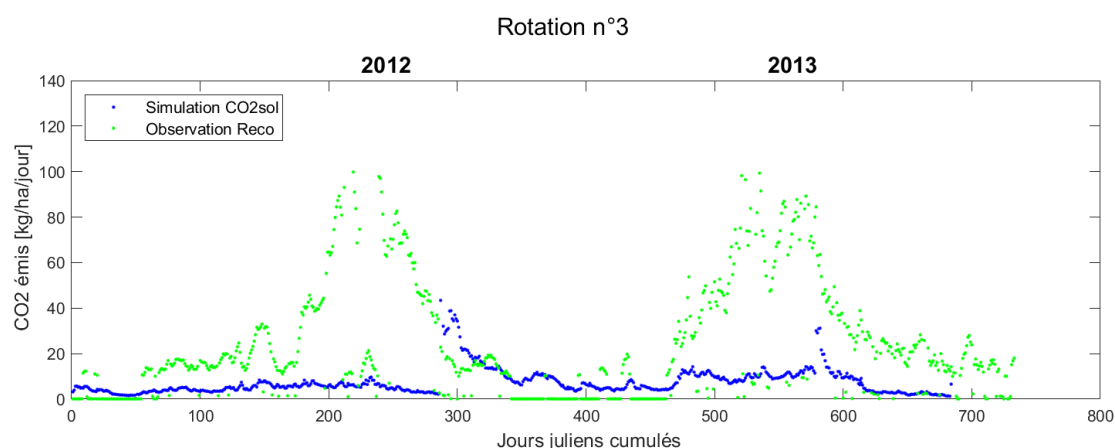


Figure 30 - Evolution journalière de l'émission de CO₂ simulée et observée pendant les deux premières années de la troisième rotation.

Tout d'abord, l'ordre de grandeur des émissions correspond à des émissions observées dans la littérature pour une simulation de blé (de Noblet-Ducoudré *et al.*, 2004). Ceci conforte dans l'idée que la simulation n'est pas aberrante.

Les fortes émissions simulées après récolte ou broyage sont dues à la décomposition des résidus. Par exemple pour les betteraves, elles sont dues aux feuillets et collets qui restent à la surface du sol et qui commencent à se décomposer. La quantité de résidus modélisée (*QRESSUITE*) est fonction du paramètre *RESSUITE* encré dans le modèle. Celui-ci diffère selon les plantes (Brisson *et al.*, 2008). En général la betterave aura plus de résidus que les autres cultures de la rotation (Buisse *et al.*, 2017). Cependant, le modèle surestime probablement la valeur de *QRESSUITE*. En effet, la valeur de *QRESSUITE* est presque 3 fois plus grande pour le broyage de la betterave en 2004 que pour d'autres cultures alors que les données issues de Buisse *et al.* (2017) ne montrent pas cette tendance. Une autre hypothèse est la sous-estimation du ratio C/N des résidus suite à la sous-estimation de la variable *QNplante* de la betterave. La sous-estimation de ce dernier est confirmée dans les résultats pour les autres plantes (figure 19 et 22). En effet, comme expliqué au paragraphe suivant, cette erreur provoque une surproduction de CO₂ modélisée.

Après les fertilisations en jour 450 en 2005, l'émission simulée et mesurée augmente. La fertilisation apporte de l'azote. La production de CO₂ prédite est fonction notamment du ratio C/N des résidus. Ce ratio diminue avec la fertilisation. Le paramètre *KRES* (figure 12) diminue également. Pour rappel, celui-ci répartit le carbone entre l'émission de dioxyde de carbone et la minéralisation. Si *KRES* se réduit, la part des émissions rétrécit.

Les deux fertilisations en 2005 sont de 35 et 45 kg N/ha. Celles de 2009 sont de 80, 40 et 90 kg N/ha. Cette différence explique notamment la hauteur 2 fois plus grande des émissions simulées. Or, en 2011, les émissions sont au même niveau qu'en 2005 mais les fertilisations sont de 59, 39 et 81 unités N/ha. Cependant, d'après Mo *et al.* (2018), la fertilisation réduit la respiration du sol car elle rend les nutriments facilement accessibles.

De plus, le pic mesuré avant la respiration du maïs, lié à son semis et sa fertilisation (de 117 kg N/ha) en jour 135 de 2012, est très peu marqué dans la simulation.

Entre les jours 450 et 550, hormis la montée des mesures liées à la respiration autotrophe, les courbes sont liées par le même facteur : la température (Brisson *et al.*, 2008; Suleau *et al.*, 2011). La température étant le principal facteur gérant la respiration hétérotrophe d'après Suleau *et al.* (2011).

Lorsque le blé commence à sécher (à partir du jour 550), le LAI diminue et il respire moins (figure 19). Les mesures diminuent mais l'évolution est toujours la même pour les deux séries de points.

Le décalage dans le temps du pic d'émissions simulées après la récolte du froment en 2005 est certainement dû à la montée des températures plus tard dans le temps (annexe 5).

En 2006, le petit sommet après la récolte est lié au travail du sol effectué 4 jours plus tard. Une analyse entre labour conventionnel à 25 cm et labour réduit à 10 cm a été faite. En moyenne, les mesures d'émissions de CO₂ après un labour conventionnel sont plus hautes que celles modélisées. Or, c'est l'inverse pour les labours réduits, excepté pour le premier (32^{ème} jour de simulation en 2004). En mesure, comme en simulation, les labours réduits ont émis plus de CO₂. Mais au niveau des simulations, le facteur émissions réduites/émissions conventionnelles est beaucoup plus haut qu'en réalité.

Cependant, le problème qui peut causer cette divergence entre les émissions de CO₂ observées et les émissions simulées est le suivant : la méthode utilisée pour mesurer n'est pas efficace car elle ne permet pas de mesurer directement la respiration hétérotrophe de la rotation. Une étude avec des chambres de mesures au sol permettrait de réduire les mesures à Rab + Rh mais elle est également erronée lorsque les racines de la végétation sont présentes et respirent (Moureaux, Bodson et Aubinet, 2008).

Cependant, une étude de Suleau *et al.* (2011) a montré que la partie respirant de la plante est principalement la racine (60-80%).

Des mesures de séparation de la respiration des racines et du biotope du sol doivent être effectuées. Des méthodes permettent de réaliser ce partitionnement (Kou *et al.*, 2007). De plus, l'erreur de traitement de mesure est également à mettre en cause.

Les graphiques aux figures 31, 32 et 33 reprennent les mêmes valeurs que celles des trois précédents (figure 28, 29 et 30) en y ajoutant l'évolution du LAI et en multipliant Reco (la respiration de l'écosystème) par 0.35 lorsque le LAI est supérieur à zéro.

Dans les figures 31, 32 et 33 l'évolution du LAI est représentée en bleu clair. Il est important de noter que les échelles sont différentes selon les rotations et les années. Le LAI est représenté car les plantes respirent principalement par les stomates des feuilles.

Pendant les périodes « avec végétation », le coefficient de 65% est correct pour la betterave en 2004 et 2008, le froment en 2005, la moutarde en 2009 et en 2012, et la pomme de terre en 2006 et en 2010. Néanmoins, pour les froments en 2007, 2009, 2011 et 2013, lors de la deuxième phase de croissance rapide du LAI, ce coefficient est trop bas. Il en est de même pour le maïs en 2012.

Pour conclure, le modèle STICS prédit correctement les dynamiques d'évolution de la respiration du sol durant les saisons avec végétation également.

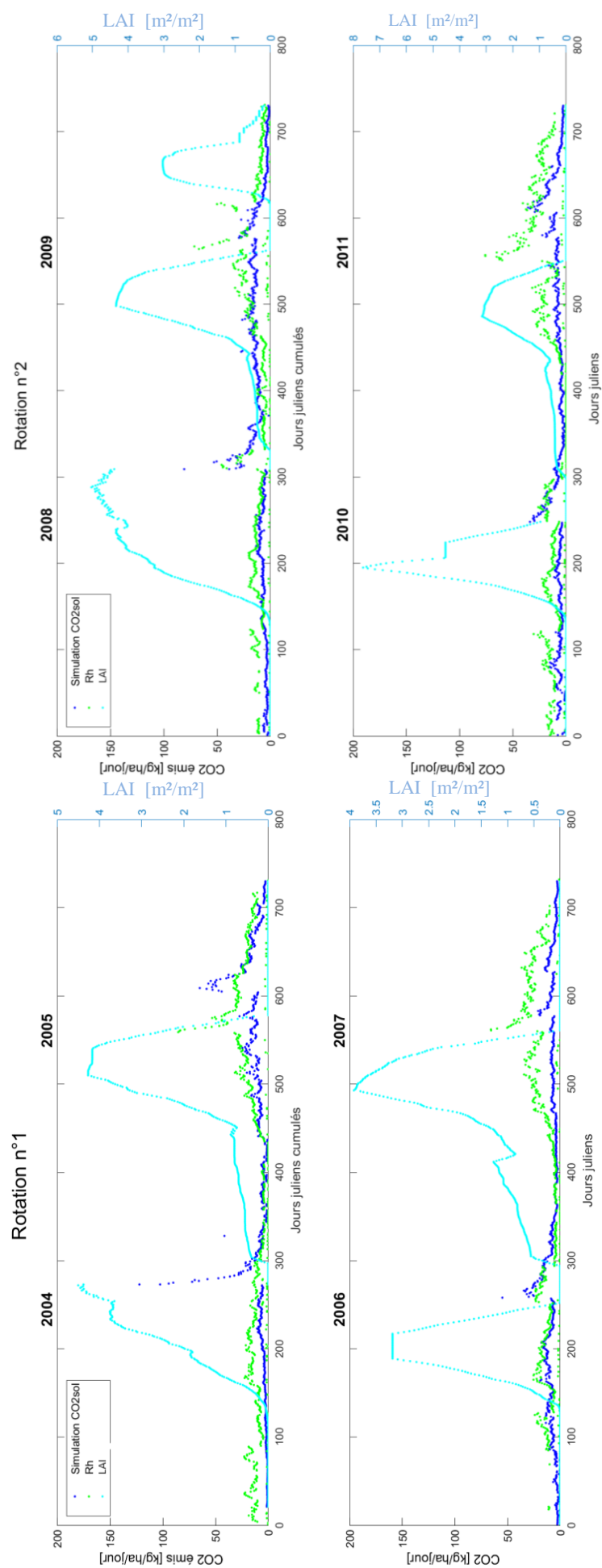


Figure 31 - Evolution journalière de l'émission de CO₂ simulée et observée, ainsi que celle du LAI simulé pendant la première rotation.

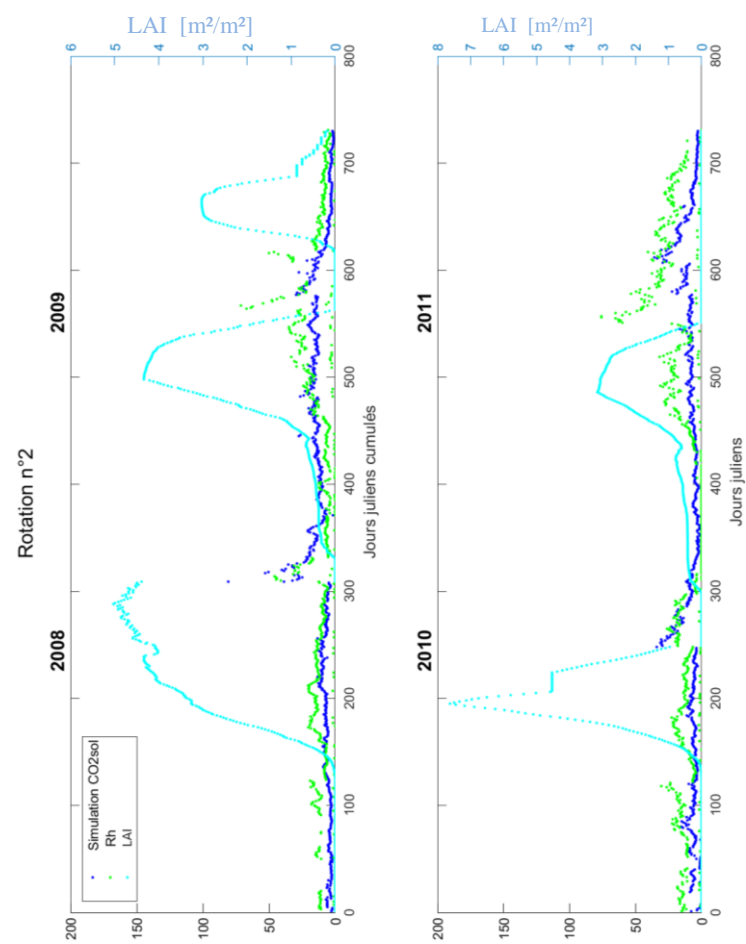


Figure 32 - Evolution journalière de l'émission de CO₂ simulée et observée, ainsi que celle du LAI simulé pendant la deuxième rotation.

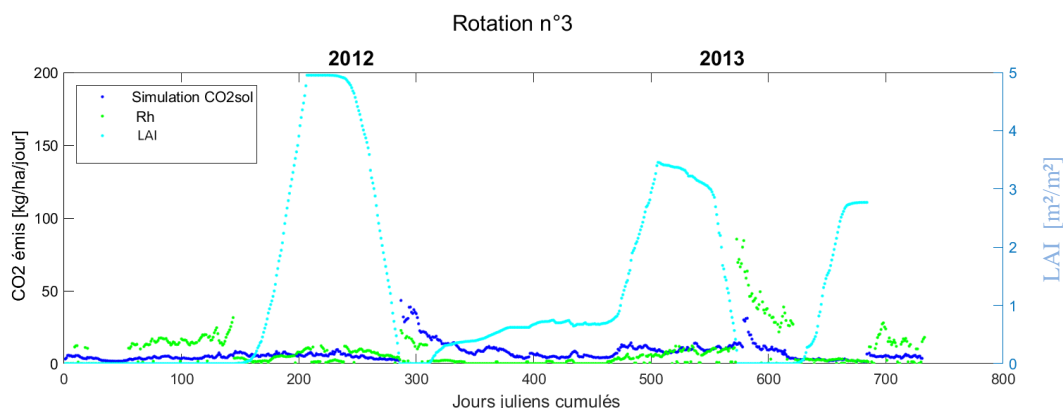


Figure 33 - Evolution journalière de l'émission de CO₂ simulée et observée, ainsi que celle du LAI simulé pendant la troisième rotation.

Comme l'estiment Aubinet *et al.* (2009) et Suleau *et al.* (2011), la respiration autotrophe vaut pour au moins 65% de la respiration totale de l'écosystème. Ce coefficient pourrait être relevé à la hausse pour certaines périodes étant donné que toutes les plantes ne respirent pas autant les unes que les autres et que leur respiration dépend du stade de développement auquel elles se trouvent (Moureaux *et al.*, 2011).

La respiration hétérotrophe aurait également pu être calculée autrement. Celle-ci était égale à la NEE à laquelle la NPP est retirée. La NEE est mesurée par Eddy Covariance et la NPP est calculée à partir de STICS. Le poids sec multiplié par le contenu en carbone des plantes (QN_{plante}) est égal à la NPP (Moureaux, Bodson et Aubinet, 2008). Cependant, comme précédemment observé, QN_{plante} est largement surestimé par le modèle. Ce paramètre n'est donc pas assez correctement modélisé pour être utilisé.

Le graphique 34 représente la comparaison entre valeur simulée et valeur observée approximée.

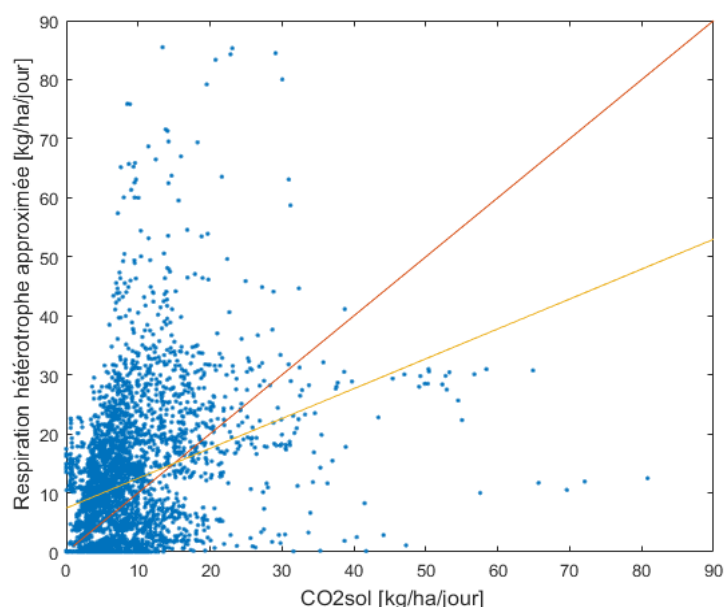


Figure 34 - Comparaison entre la respiration hétérotrophe approximée et la variable CO₂sol.

Bien que les petites variations de l'émission de dioxyde de carbone soient bien simulées par le modèle, la différence d'amplitude des variations malgré l'approximation n'est pas suivie par les valeurs de

sorties du modèle. A part les pics de récoltes, la majorité des émissions simulées restent en dessous de 25 kg de CO₂/ha/jour. Or, les émissions sont sur une gamme plus large.

Le modèle ne prédit pas toujours correctement l'amplitude des flux de la respiration hétérotrophe du sol. Cependant, les dynamiques liées à la variation de température, à l'effet des récoltes ou du labour sont décemment simulées.

B. Évolution du stock de carbone dans le sol

Afin de répondre aux analyses sur l'évolution du stock de carbone dans le sol de Tanguy Manise en 2007, et 2017 (Tanguy Manise, *Etude Stock de carbone ICOS*, 2017). Certains paramètres du sol (*norg*, *C/N* et *DAF* dans le premier horizon) ont été modifiés. La figure 35 montre l'évolution du stock de carbone dans le sol sur 10 ans. Les colonnes représentent la variable *Chumt*, le stock total de carbone organique dans le sol. Les lignes représentent les mesures. En jaune, la mesure directe de Tanguy Manise. En violet, les mêmes mesures mais en considérant une densité du sol de 1.4 g/cm³ comme dans les données Aardewerk. Chaque mesure est accompagnée de son intervalle de confiance.

Il faut savoir que le modèle STICS ne simule pas la modification de la densité du sol. Ici, la variation de stock de carbone dans les mesures est principalement due au changement de celle-ci liée à la compaction du sol. En effet, elle passe de 1.4 à 1.5 g/cm³ en 10 ans.

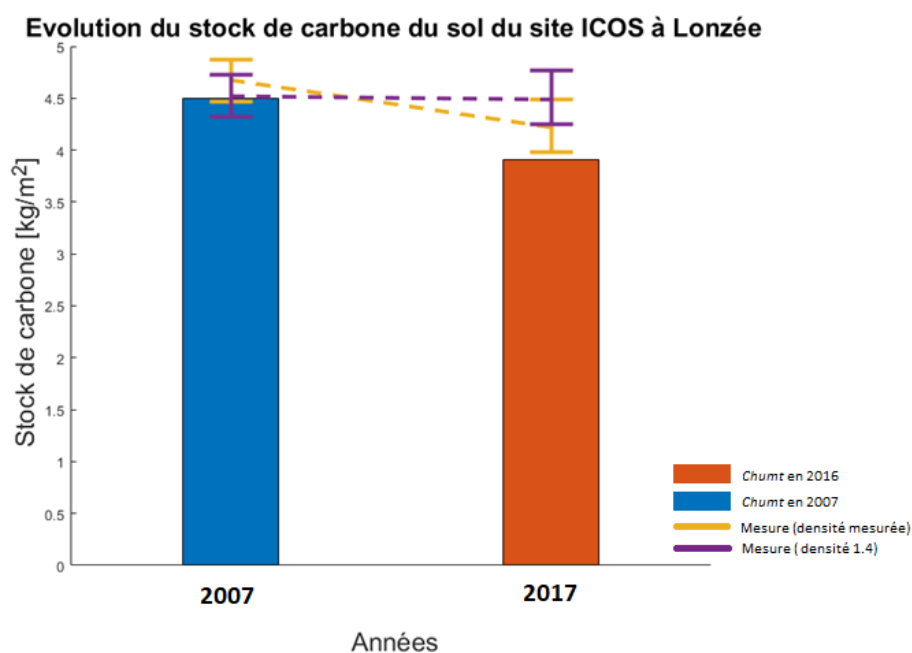


Figure 35 - Evolution modélisée et mesurée du stock de carbone du sol de la parcelle étudiée.

D'après la figure 33, la variation du stock de carbone dans le sol et de la variable *Chumt* prédite est équivalente. Il faut remarquer que cette variable est très sensible au contenu en eau du sol, qui lui-même est très sensible à la densité dans le modèle.

Comme STICS le modélise, le sol à Lonzée a perdu du carbone. Il est donc identifié comme une source de 0.59 kg/m² sur 10 ans donc de 59 g /m²/an. Ce chiffre est du même ordre de grandeur que celui décrit dans l'étude réalisée par Buysse *et al.*(2017).

C. Échanges d'azote

Les figures 36 et 37 ainsi que le tableau 12 subséquent comparent les mesures par Eddy covariance et la simulation des émissions de N_2O en 2016.

En premier lieu, en figure 36, trois pics majoritaires sont présents dans les mesures. Ceux-ci réapparaissent bien dans les simulations. Globalement, le modèle STICS reproduit correctement la dynamique des émissions de N_2O . Toutefois, comme pour le dioxyde de carbone mais à moindre échelle, l'amplitude des pics n'est souvent pas correctement modélisée et l'évolution est parfois décalée dans le temps. En effet, les paramètres EF et ND ne respectent pas les critères (tableau 12). Les hautes valeurs sont surestimées et les petites légèrement sous-estimées. Afin de compléter l'analyse, l'annexe 6 présente l'évolution des températures maximales et minimales ainsi que l'évolution des précipitations en 2016.

Pour évaluer la dynamique du modèle par rapport à celle des mesures, la figure 37 illustre les comparaisons des émissions cumulées entre observations et prédictions. La somme cumulée totale des émissions simulées est de 2.15 et mesurées de 1.56 kg/ha. On a donc une erreur de surplus de 51.6%. Cependant, cette dernière valeur est différente de celles de Lognoul et al. (2019 (1.83+/-0.21 kg/ha)). Des traitements supplémentaires ont certainement dû être réalisés après leurs envois.

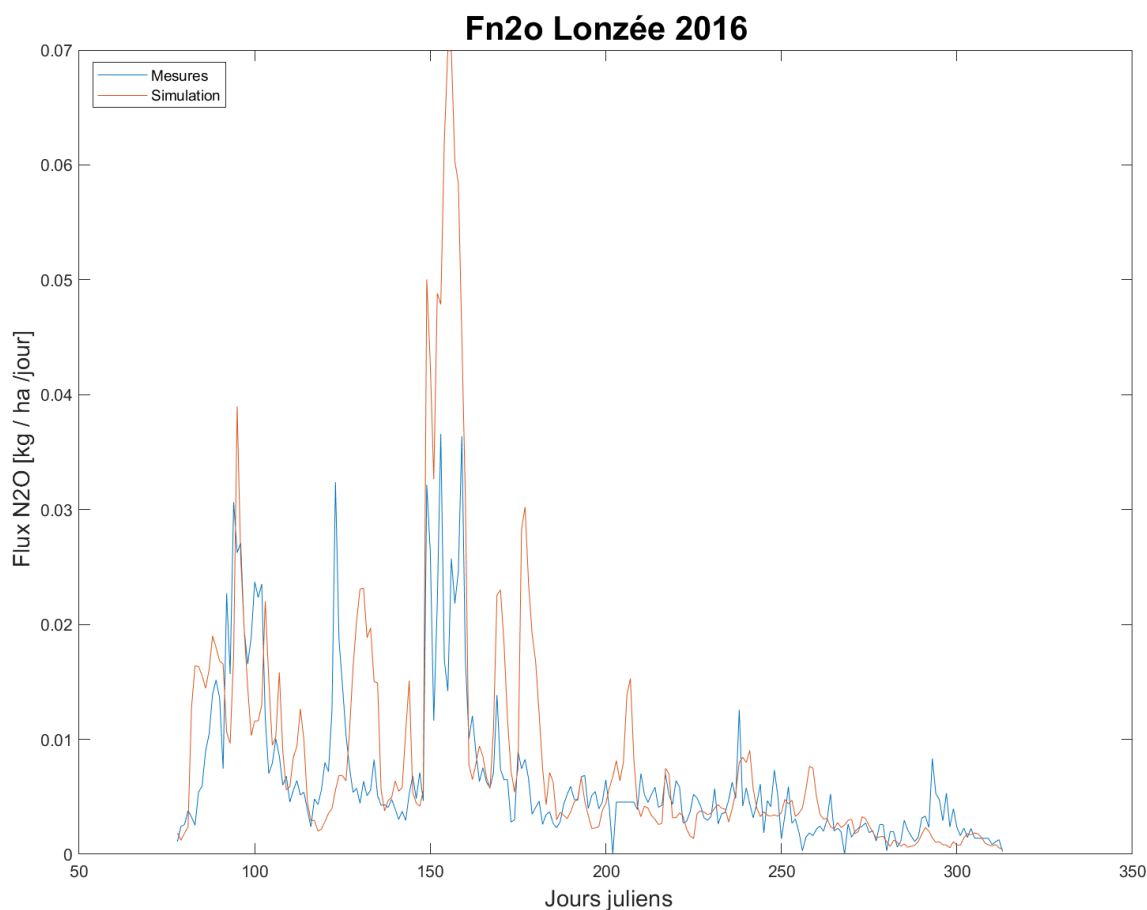


Figure 36 - Comparaison mesures et simulations des émissions de N_2O en 2016.

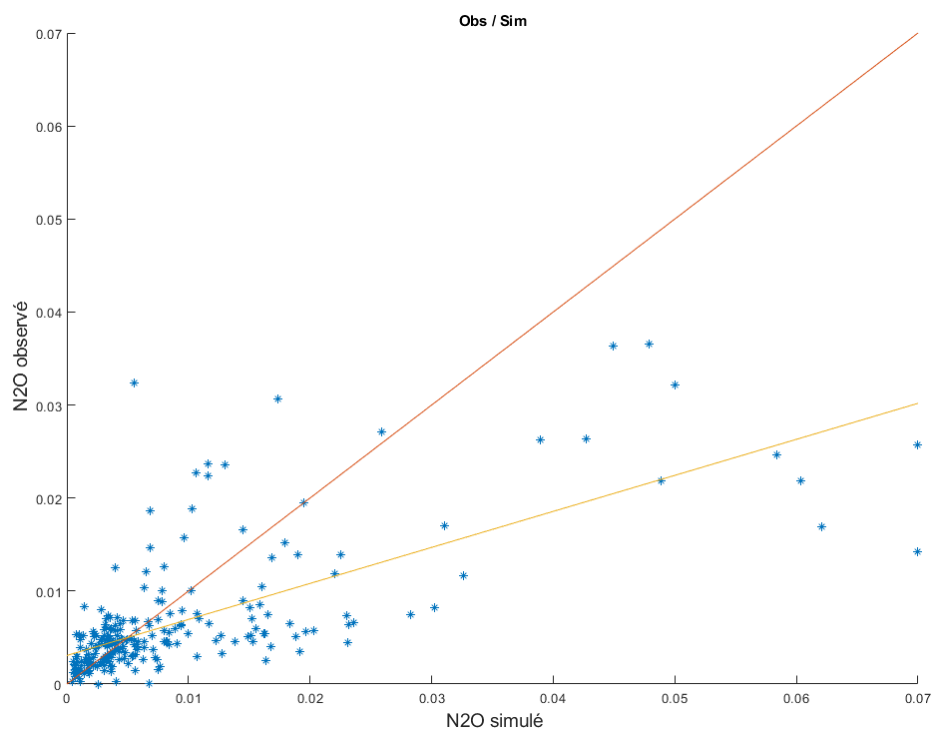


Figure 37 - Evolution des flux de N_2O mesurés et simulés en 2016.

Tableau 12 - Paramètres statistiques des émissions de N_2O en 2016.

EF	ND	RMSE
0.01	0.38	0.01

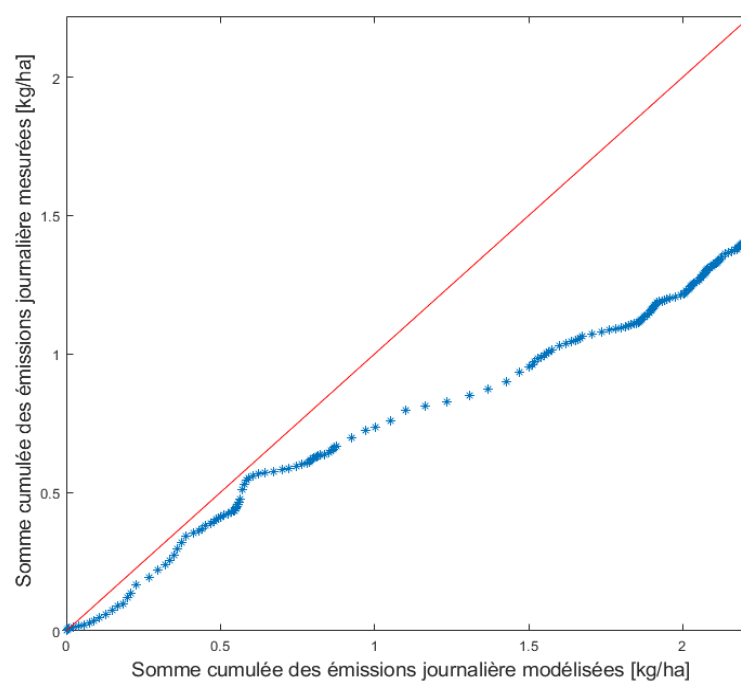


Figure 38 - Somme cumulée des émissions de N_2O mesurées en fonction des émissions simulées.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette différence d'amplitude :

- La mauvaise simulation de variables précédant le calcul des émissions de protoxyde d'azote. Par exemple, les simulations de la variable *QNplante* modélisant la quantité d'azote absorbée par la plante, sont constamment sous-estimées par le modèle. Cela peut provenir de la trop faible quantité initiale présente dans le sol. Une modélisation équivalente réalisée par Le Gall *et al.* (2014) a constaté les mêmes résultats sur une culture de blé d'hiver. Ou encore, une revue d'Hénault *et al.* (2012) explique que le modèle reproduit difficilement les variations de stock d'azote du sol, notamment pour de hautes contenances. Une mesure du stock d'azote du sol aurait pu permettre de déterminer si cette hypothèse est correcte.
- La mauvaise simulation du contenu en eau du sol (annexe 7). D'après Lognoul *et al.* (2019), le facteur principal influant les grosses émissions est la teneur en eau à 5 centimètres de profondeur tandis que les petites variations sont plutôt liées à la température de surface du sol. D'autres modèles comme DNDC ou APSIM, montrent une surestimation des émissions. Celle-ci est expliquée par une mauvaise prédiction du transport d'eau et de chaleur dans le sol qui affecte la prédiction des processus liés à l'émission de protoxyde d'azote (Vogeler *et al.*, 2011).

Les figures 39, 40 et 41 traduisent la part des émissions simulées qui provient de la nitrification ou de la dénitrification. La période de simulation a été divisée en trois selon que la nitrification ou la dénitrification participe le plus aux émissions simulées.

Le graphique de la figure 39 illustre l'évolution des émissions de N_2O mesurées et simulées dues à la nitrification. L'émission liée à la nitrification donne la tendance de la courbe de simulation de N_2O totale. Le modèle surestime globalement les émissions.

La suite de la description se réalise par portion de quelques jours. D'abord, le pic simulé entre les jours 80 et 85 n'est pas mesuré. Dans cette période, l'analyse entre les jours 92 et 104 révèle une estimation plus faible mais qui dure plus dans le temps dans la réalité alors que le modèle STICS simule un pic un peu plus haut sur une plus courte durée.

Enfin, la dynamique de la suite de la période 1 se simule correctement, avec la surestimation habituelle, mais avec un décalage d'un jour par rapport aux mesures.

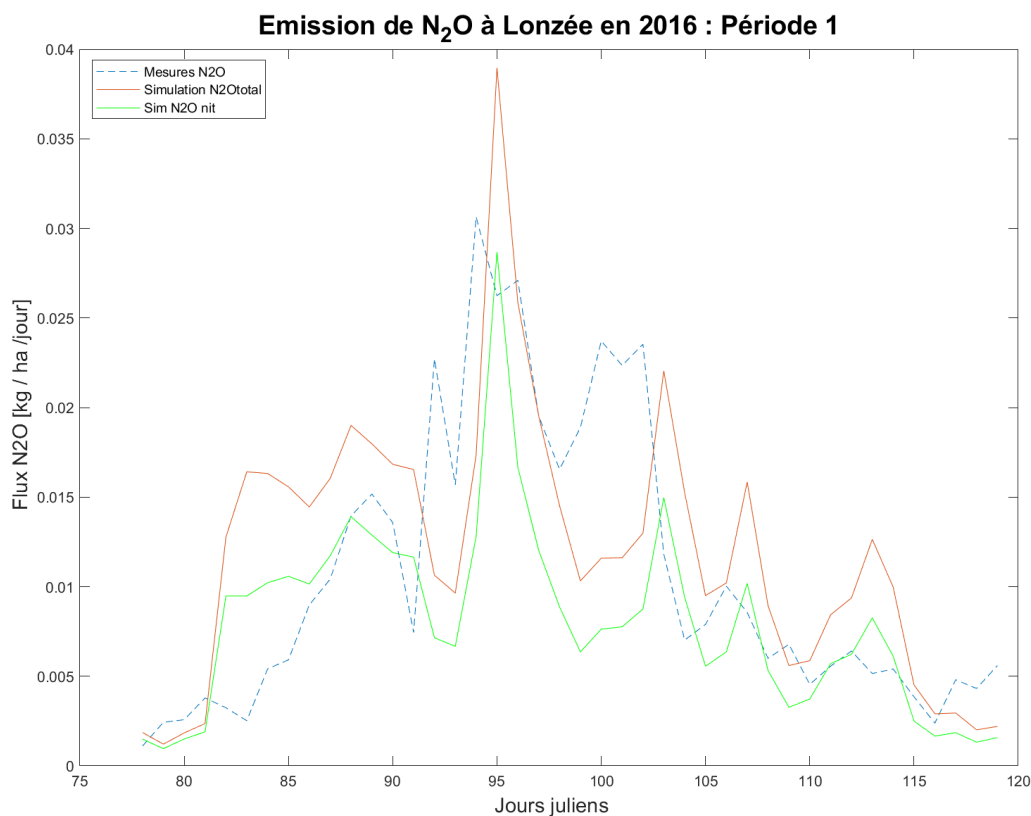


Figure 39 - Evolution des émissions de N₂O mesurées, simulées totales et simulées issues de la nitrification en 2016 (Période 1).

La part de N₂O émis par la nitrification augmente avec le paramètre WFPS et celle venant de la dénitrification diminue avec ce paramètre (Léonard, 2016). La simulation du contenu en eau de la couche de sol supérieur montre une diminution pendant cette période (annexe 6).

Le 82^{ième} jour julien de 2016, une fertilisation azotée a été réalisée (136.5 unités N /ha). Trois jours après cette fertilisation et jusqu'au jour julien 121, les précipitations n'ont pas cessé (figure 39, annexe 6). Ceci a continuellement gardé le contenu en eau du sol à 32% minimum (Lognoul *et al.*, 2019). A cette période, les simulations sont surestimées. Cela peut provenir du paramètre lié à l'effet de WFPS sur la vitesse de nitrification ou à d'autres. Il était certainement un peu trop élevé.

Le graphique de la figure 40 montre que le N₂O issu de la dénitrification est cette fois la principale part de l'émission simulée. Ce changement de phase peut-être expliqué par une diminution de la teneur en eau du sol. En effet, la part d'émission de protoxyde d'azote liée à la nitrification augmente exponentiellement avec la teneur en eau du sol, alors que celle liée à la dénitrification diminue avec cette dernière (Bessou *et al.*, 2010). Le modèle STICS simule bien ce changement de phase.

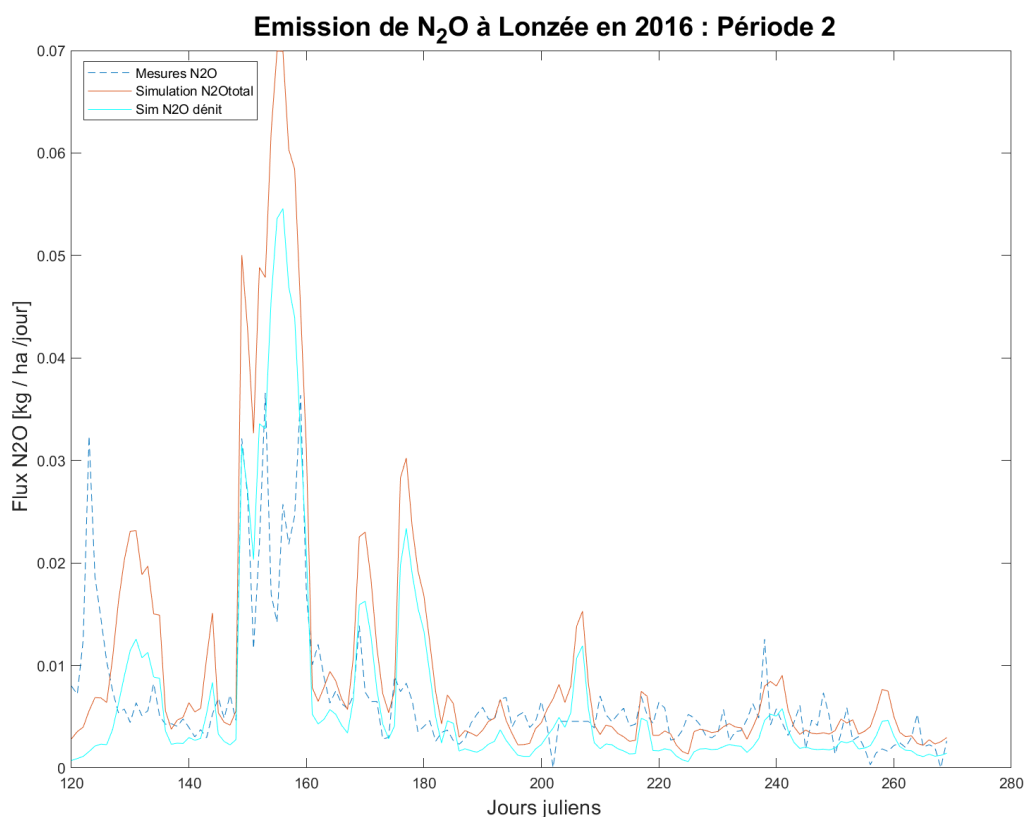


Figure 40 - Evolution des émissions de N_2O mesurées, simulées totales et simulées issues de la dénitrification en 2016 (Période 2).

Entre les jours juliens 150 et 180 (mois de juin) il y a eu beaucoup de précipitations. Les pics élevés y sont liés. Il y a eu ensuite un assèchement graduel du sol jusqu'aux environs du jour 289 (Lognoul *et al.*, 2016). Ceci explique la diminution des émissions mesurées. La simulation suit bien cette tendance à la diminution.

Le pic d'amplitude le plus élevé peut être dû à cette fertilisation. Une température et une humidité optimale aux environs du jour 152 a causé une importante émission de N_2O . En effet, la comparaison des émissions et des précipitations montre une corrélation. Il en est de même pour la température.

A l'exception de quelques pics, les émissions restent en dessous de deux centièmes de kilogramme par hectares et par jour. Lors du changement de phase entre la nitrification comme source principale de protoxyde d'azote et la dénitrification comme source principale, les mesures simulées sont plus basses que les mesures observées.

De plus, au jour 122, un pic mesuré n'est simulé que 5 jours après. Cette fois, l'effet inverse est observé. Les émissions modélisées s'étalent sur plusieurs jours à de plus faibles amplitudes alors que les mesures se réalisent en un pic d'un jour. Au niveau des mesures, ce pic est dû à une haute teneur en eau et une montée des températures (Lognoul, 2017). Il est probable que les émissions ne sont pas corrélées à ce moment-là car le ratio r (taux d'émission lié à la dénitrification) n'est pas fonction de la température.

Après, entre les jours 150 et 160, un pic de plus haute amplitude est observé. Même si elles restent faibles, les émissions simulées sont d'une amplitude deux fois plus haute que celles mesurées.

Enfin, les pics aux jours 170 et 179, peuvent être liés à une sous-estimation du contenu en eau du sol. Ces pics sont liés à la fertilisation de 4 unités par hectare réalisée le jour julien 163.

En résumé, le modèle sur-estime surtout les émissions après une fertilisation azotée.

Un élément discutable est la profondeur jusqu'à laquelle les microorganismes produisent le N_2O ou la variable *prohum* dans le modèle STICS. Celle-ci a été fixée à 25 cm de profondeur. Or, d'après Lognoul (2017), ceux-ci sont concentrés dans la partie supérieure du sol. En effet, à l'échelle journalière, la dynamique des émissions est corrélée avec l'évolution de la température de surface et les émissions s'arrêtent après le semis à Lonzée en 2016 (Lognoul, 2017).

De plus, l'effet de la préparation du lit de semence est un facteur important d'après Lognoul *et al.* (2019). Cet effet n'est pas pris en compte par le modèle.

La figure 41 est identique à la figure 39, mais couvre une période différente. Sur cette dernière période, les mesures sont majoritairement supérieures aux valeurs modélisées. L'échelle est dans ce cas de $9.10^{-3} \text{ kg.ha}^{-1}.\text{jour}^{-1}$.

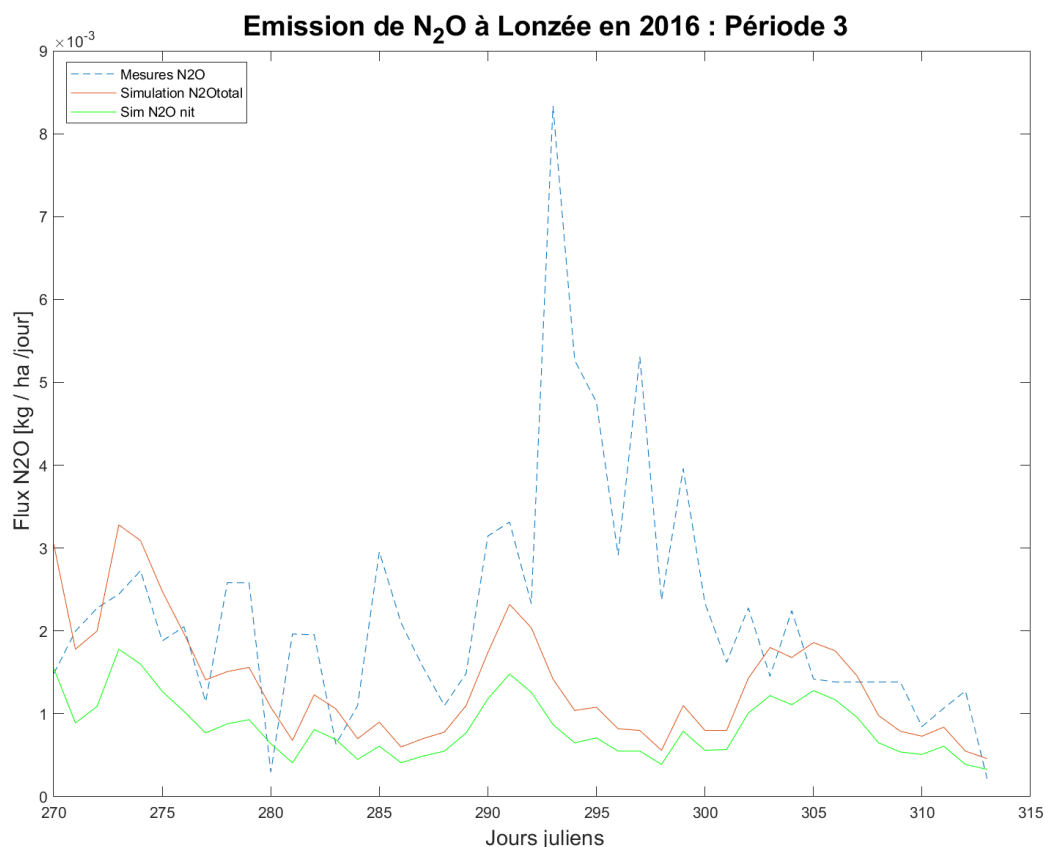


Figure 41 - Evolution des émissions de N_2O mesurées, simulées totales et simulées issues de la nitrification en 2016 (Période 3).

Les jours qui suivent le jour 190 (figure 36 et 41), l'émission est très faible. Comme le montre Lognoul (2017), une fois que la croissance de la plante a commencé, les valeurs de N_2O restent basses. Effectivement, l'évolution du LAI de la betterave sucrière en 2016 en figure 18 révèle un début de croissance aux environs du 190^{ème} jour julien. Ce phénomène est suivi par les simulations.

4.2. Analyse d'impact de scénarios climatiques

L'option de simuler à l'horizon 2070-2100 a été choisie. Les RCP 4.5 et 8.5 ont été simulés. Donc, seuls les paramètres météorologiques ont été changés pour prédire la rotation dans le futur. Les 12 années simulées sont de 2084 à 2096.

De plus, l'option « changement climatique » est activée pour ces simulations. De ce fait, l'effet de la concentration atmosphérique du CO₂ sur l'assimilation du carbone a un impact et est décrite par l'équation 5. La figure 10 (page 17) illustre cet effet.

Les concentrations atmosphériques moyennes sont de 390 ppm pour les données actuelles, 525 ppm pour le scénario RCP 4.5 et 775 ppm pour le scénario RCP 8.5.

4.2.1. Variables agronomiques

Le graphique suivant illustre la différence de rendement cumulé des cultures de la rotation selon la période actuelle (2004-2016) et les scénarios RCP4.5 et 8.5 à l'horizon 2085.

La somme de tous les rendements des cultures de toute la rotation est la plus haute pour le scénario RCP 8.5, suivi de manière proche par la modélisation actuelle. Le scénario RCP 4.5 donne un rendement cumulé d'environ 40 t/ha en moins que les autres.

La comparaison par culture montre que la pomme de terre a la plus grande diminution de rendement, notamment avec le RCP 4.5. La betterave sucrière subit également une diminution mais moins importante pour le scénario 4.5. Cependant, celle-ci augmente pour le RCP 8.5. Au contraire, la productivité du froment d'hiver augmente pour les deux scénarios futurs. Concernant le maïs, la production diminue pour le RCP 8.5 par rapport à l'actuel et est même nulle pour le RCP4.5. Le froment est donc la seule culture qui globalement accroît sa productivité avec le changement climatique selon tout scénario.

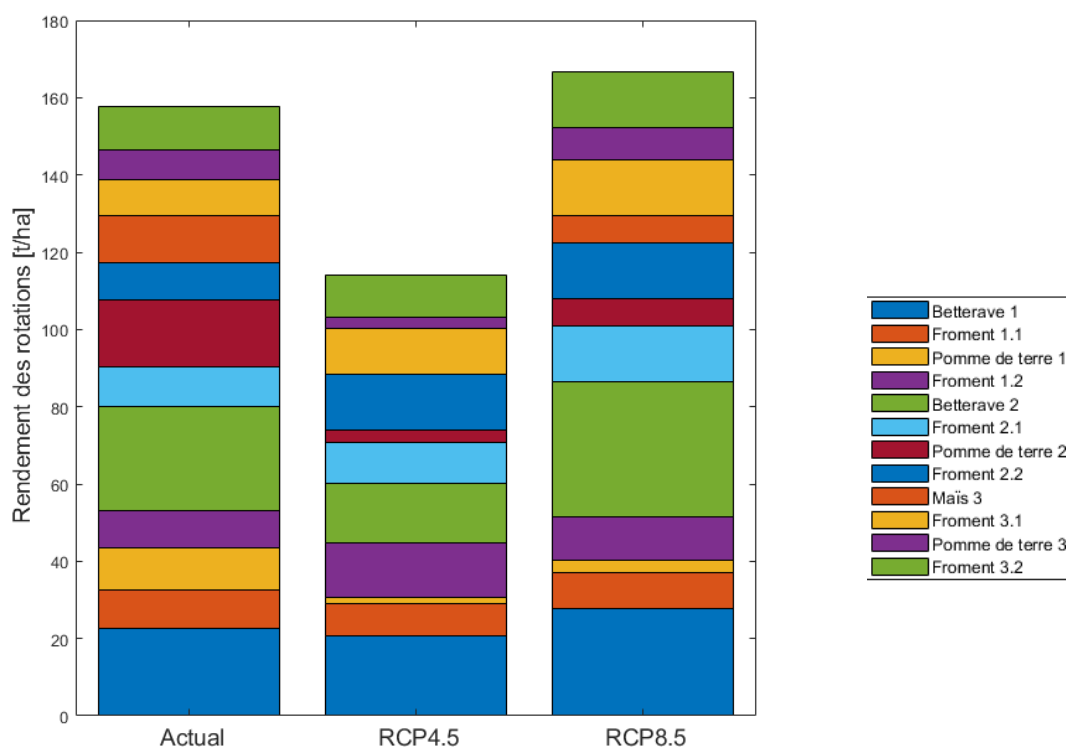


Figure 42 - Rendement cumulé des rotations actuelles et selon les RCP 4.5 et 8.5 à l'horizon 2085.

Les cultures de printemps comme la pomme de terre sont pénalisées par le changement climatique. L'augmentation de la fréquence des sécheresses de printemps explique ce phénomène.

Les cultures d'hiver (froment d'hiver) s'adaptent ou seront même plus productives d'après la simulation. Selon le RCP 8.5, l'augmentation de la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone entraîne un rendement plus élevé (Parry *et al.*, 2004; Seguin, 2010; Olesen *et al.*, 2011). L'importante augmentation du rendement du froment (plante en C4) s'explique par sa capacité à assimiler plus de carbone que les plantes en C3 quand la concentration en carbone augmente (cf. figure 10). Cela s'explique également par l'augmentation de température notamment l'hiver (Jones et Moberg, 2003).

Cependant, il était prévu la même chose pour le RCP 4.5. Ceci est lié à la diminution de l'efficacité d'assimilation du carbone par les plantes avec la montée de température (Gray et Brady, 2016b).

4.2.2. Variables environnementales

A. Echanges de dioxyde de carbone

Les figures 43, 44 et 45 illustrent les émissions de CO₂ simulées en fonction du temps. L'évolution journalière simulée actuelle (de 2004 à 2016) et les évolutions futures (de 2084 à 2096) sont illustrées selon les scénarios. La figure 43 représente la première rotation, la figure 44, la deuxième et la figure 45, la troisième. Ensuite, la somme cumulée des émissions est établie en fonction des scénarios à la figure 46.

Evolution temporelle

Les émissions de la première rotation sont particulièrement importantes. Celles de la deuxième rotation sont un peu moins élevées. La rotation numéro trois est surtout marquée par l'apparition de plus de pics sur les simulations futures.

En rotation 1, les scénarios ont plus ou moins la même émission jusqu'à la récolte. Les pics sont plus hauts pour le pire scénario (RCP 8.5). En jour 320, un pic d'émission d'une journée est présent sur la rotation actuelle mais pas sur les futures. Les émissions après la récolte de froment sont plus hautes pour le RCP 8.5 et plus basses pour le RCP 4.5. Mais en 2006-2086, la simulation actuelle dépasse toutes les autres.

En rotation 2, la plupart du temps, les émissions en RCP 8.5 sont plus élevées. De plus, un deuxième pic est présent dans les scénarios futurs après la récolte de froment en 2009 mais inexistant dans le scénario actuel. Celui-ci intervient au moment du semis de la betterave. Ensuite, pour la deuxième partie de la rotation, les émissions sont plus faibles. Par contre, le pic après la récolte de froment est encore plus élevé pour les RCP8.5 et un peu moins pour le RCP 4.5.

En rotation 3, les mêmes phénomènes sont remarqués, l'analyse et la figure ne sont donc pas reprises ci-dessous. Néanmoins, le graphique présentant l'évolution des émissions de la rotation est présent en annexe 8.

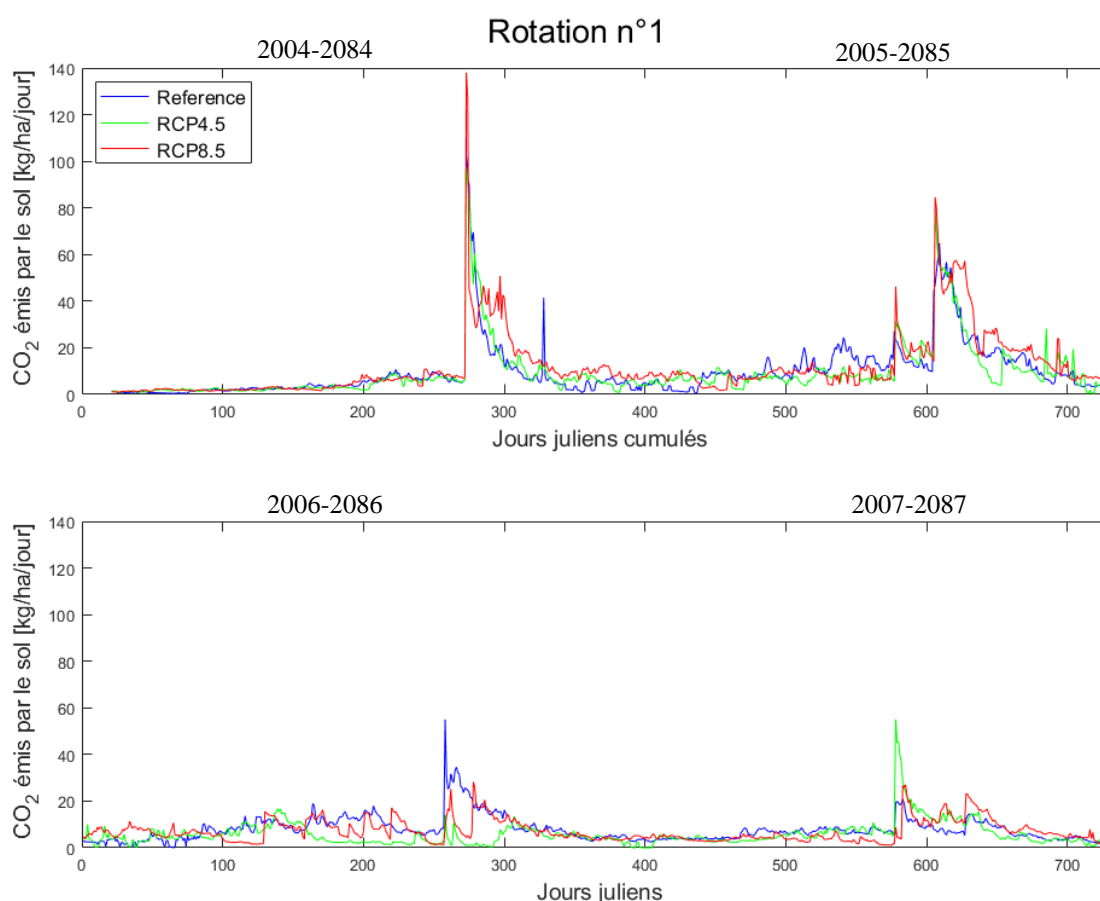


Figure 43 - Evolution des émissions de CO₂ simulées de la première rotation selon les RCP4., RCP8.5 et la référence.

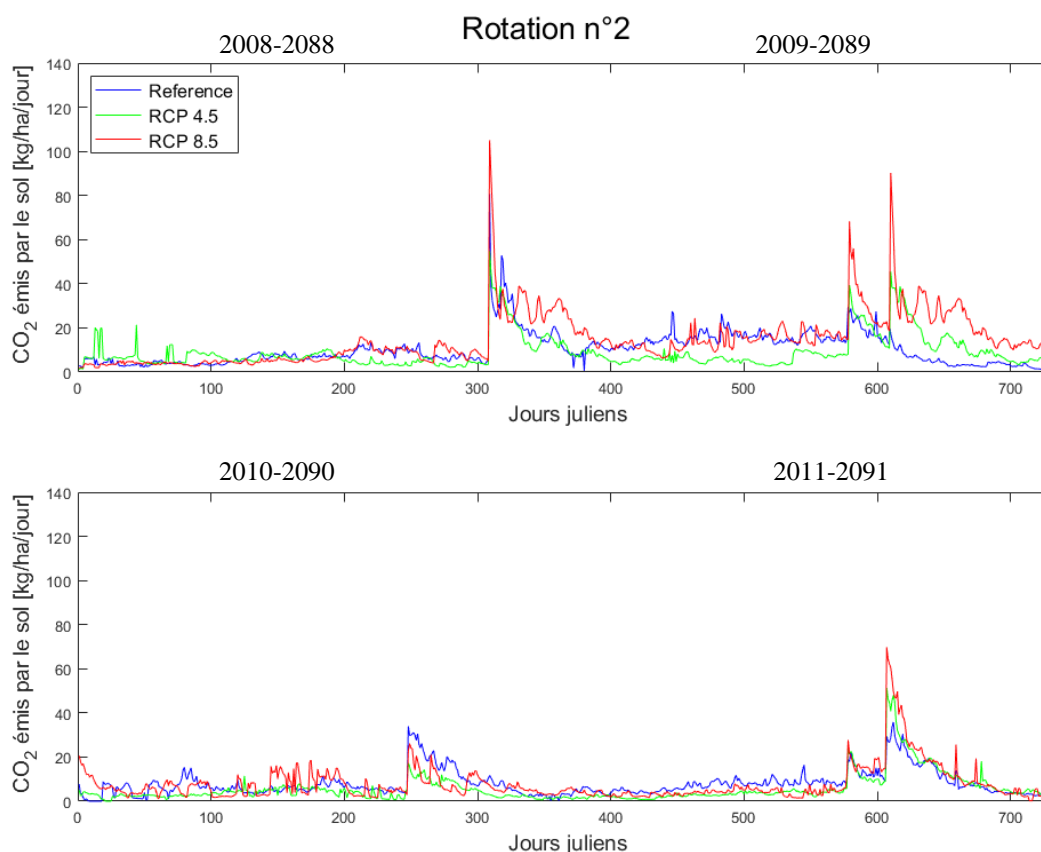


Figure 44 - Evolution des émissions de CO₂ simulées de la deuxième rotation selon les RCP4., RCP8.5 et la référence.

En général, l'amplitude des petites variations est plus importante dans le futur.

C'est surtout au moment de la récolte que se libère le N₂O. Avec notamment des pics de RCP 8.5 deux fois équivalents à l'actuel. Ceci est la conséquence d'un développement de biomasse plus important qui augmente la quantité de résidus émis après la récolte.

Le labour profond du jour 693 pour le froment d'hiver 2005-2085 a plus d'impact sur les émissions selon les scénarios futurs qu'avec la simulation actuelle. Or, le labour réduit en jour 262 (2006-2086) est plus ressenti par l'actuel que les futur.

En 2089, les résidus de moutarde prédits sont beaucoup plus élevés que ceux des émissions actuelles.

Bilan

Les différences sont dues aux modifications de comportement des micro-organismes suite au changement de température et d'humidité selon les scénarios (Mandal et Neenu, 2014).

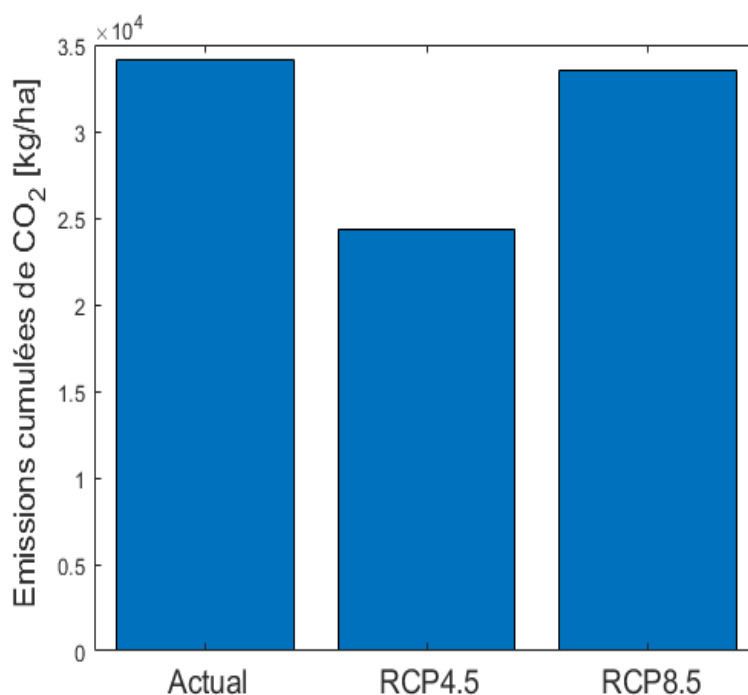


Figure 45 - Emissions cumulées de CO₂ simulées selon les RCP4.5 et 8.5 et la référence actuelle.

Les différents $\Delta Chumt$ ont été calculés. Entre 2004 et 2016, le modèle simule une perte de carbone de 6,304 T/m². Avec la simulation à l'horizon 2070-2100 selon les deux RCP, la perte de carbone est plus faible. Elle est de 5,2 T/m² et 5.51 T/m², respectivement pour le RCP 4.5 et 8.5.

En résumé, avec le RCP 4.5, le sol a perdu moins de carbone. En effet (figure 45), les émissions et la production sont moindres. Avec le RCP 8.5, la perte dans le sol est un peu plus importante mais toujours moins élevée que pour le scénario actuel. Il a émis quasi la même quantité de CO₂ mais a produit plus de rendement.

L'augmentation du rendement selon le RCP 8.5 est liée à l'augmentation de CO₂. Cela compense l'effet du stress hydrique et de la température plus importants pour ce scénario.

B. Echanges de protoxyde d'azote

Les figures 46, 47 et 48 illustrent les émissions de N₂O simulées en fonction du temps. L'évolution journalière simulée actuelle (de 2004 à 2016) et les évolutions futures (de 2084 à 2096) sont illustrées selon les scénarios. La somme cumulée des émissions est établie en fonction des scénarios à la figure 48.

Evolution temporelle

Les émissions de la première rotation sont faibles. Celles de la deuxième rotation sont plus élevées notamment en 2009-2089. La rotation numéro trois est surtout marquée par de nombreux pics de la simulation RCP 8.5. Il faut remarquer que l'échelle de la première partie de la figure 47 est beaucoup plus grande que les autres. Il en a été décidé ainsi pour ne pas rendre illisibles les autres graphiques.

L'émission maximale journalière simulée est de 1.3 kg/ha. Elle est calculée par le modèle après le 600^{ième} jour julien de la deuxième année de la deuxième rotation (figure 47).

La première rotation est marquée par plus de pics d'émissions futures que d'émissions actuelles (figure 46). Au commencement, les émissions sont négligeables, jusqu'à la fertilisation de la betterave au jour 92. Ensuite, elles se réduisent après le jour 300 et réapparaissent de nouveau après la fertilisation du froment en jour 447 et 468. Le même déroulement s'est reproduit en 2006-2086 avec le semis et la fertilisation de la pomme de terre en jour 121. Il en est de même pour la culture de froment et sa fertilisation en jour 441, 467 et 493.

La même dynamique est présente pour la deuxième rotation (figure 47). La deuxième rotation est marquée par des émissions plus importantes en général. Au jour 603, en 2009 le pic maximum apparaît.

Cependant, la rotation 3 est marquée par des émissions plus fortes pour le RCP 8.5 lors des périodes qui sont normalement creuses (figure 48).

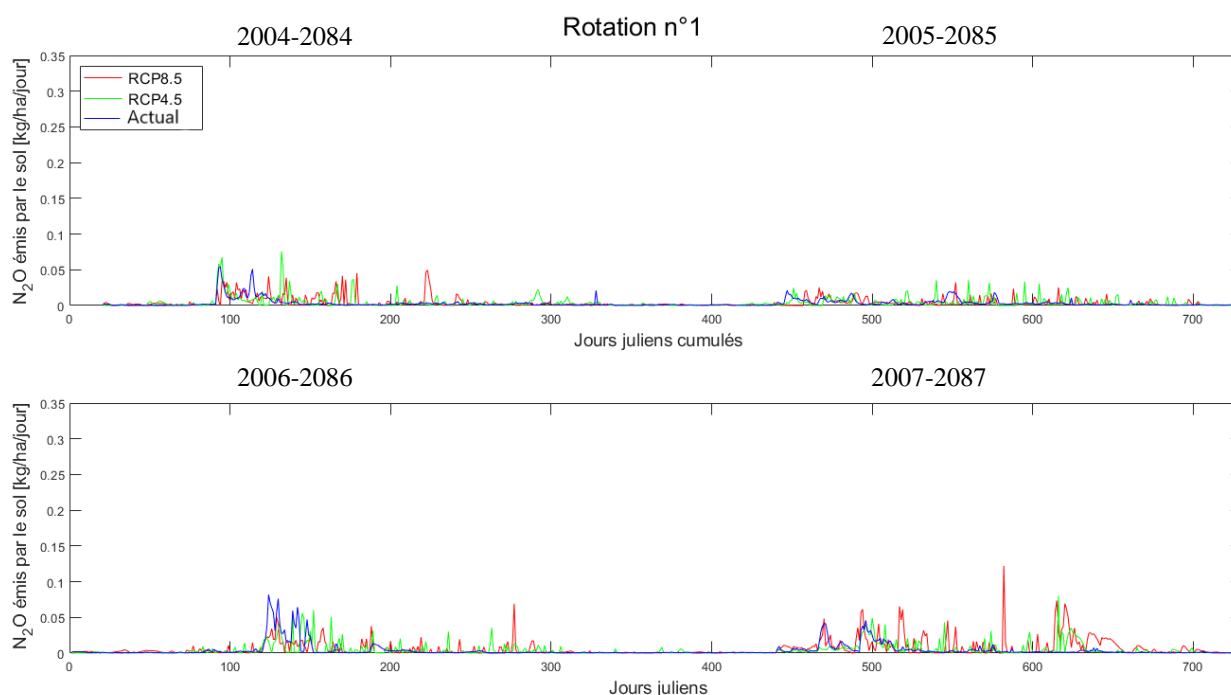


Figure 46 - Evolution des émissions de N₂O simulées de la première rotation selon les RCP4.5, RCP8.5 et la référence.

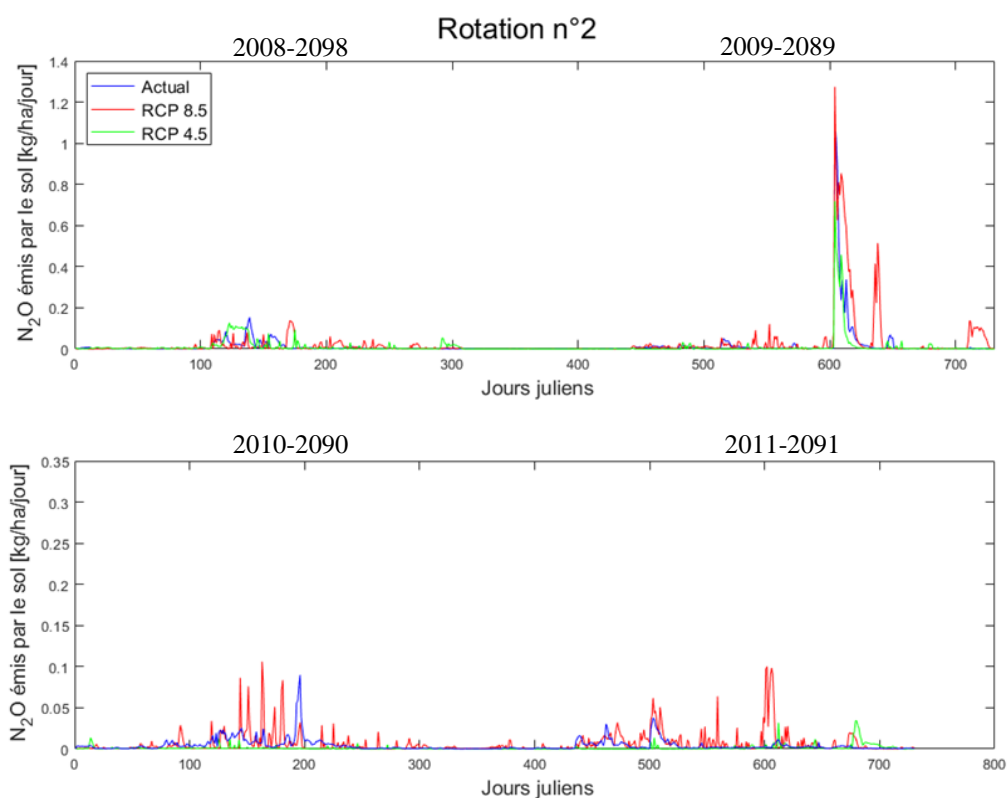


Figure 47 - Evolution des émissions de N_2O simulées de la deuxième rotation selon les RCP4.5, RCP8.5 et la référence.

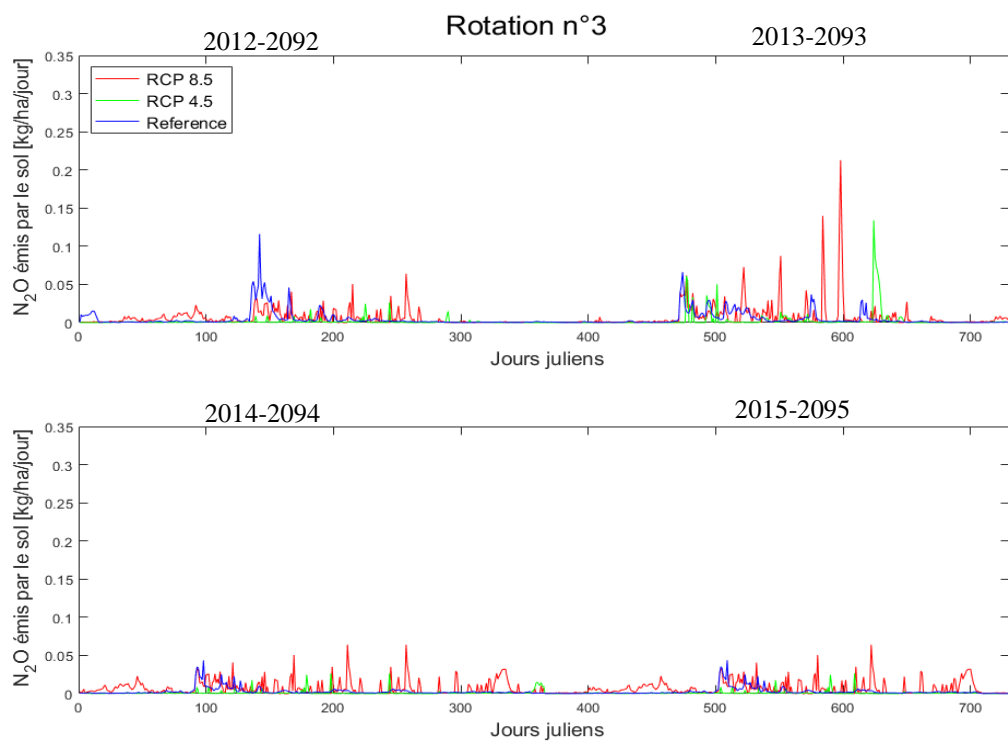


Figure 48 - Evolution des émissions de N_2O simulées de la troisième rotation selon les RCP4.5, RCP8.5 et la référence.

Au jour 603, en 2009 l'itinéraire technique comprend un étalement de fumier. La plus haute émission est liée à l'étalement de celui-ci pour toutes les simulations. Le pic d'émission maximum de N_2O est de 1kg/ha/jour pour le scénario actuel, 0.7 kg/ha pour le scénario RCP 4.5 et 1.2 kg/ha pour le RCP 8.5. La fertilisation est de 32 kg N/ha.

Bilan

Pour conclure, il faut retenir que les émissions prédites par STICS sont surestimées mais la dynamique des émissions est présumée correcte. Dès lors, le modèle prédit que les émissions diminueront de 65% si le RCP 4.5 se produit et augmenteront de 55% si le RCP 8.5 se produit tout en gardant le même management de culture. Une étude d'He *et al.* (2018) montre une augmentation également pour le RCP 8.5 mais il montre aussi une augmentation pour le RCP 4.5, selon les mêmes horizons temporels.

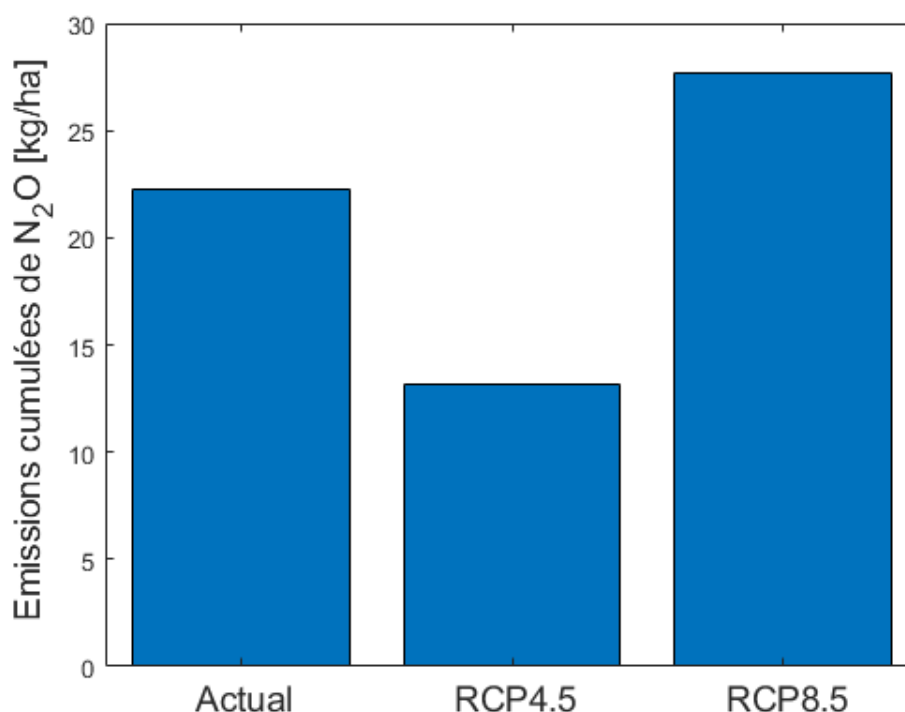


Figure 49 - Emissions cumulées de N_2O simulées selon les RCP4.5 et 8.5 et la référence actuelle.

La somme totale des fertilisants azotés étalés sur le champ en 12 ans est de 1748.6 kg N/ha. Le GIEC (2006) utilise par défaut le facteur d'émissions de 1% pour les émissions directes de N_2O provenant de la fertilisation. Les émissions sont supérieures de 5kg/ha pour le scénario actuel et 17 kg/ha pour le scénario RCP 8.5.

Farina *et al.* (2018) prédit des émissions supplémentaires de N_2O négligeables dans le futur. Ces simulations ont été réalisées avec le modèle EPIC et à l'horizon 2030. De plus, il n'y est pas question des émissions liées au fumier.

Pour conclure, la simulation de la culture sur 12 ans selon le scénario RCP 4.5 donne un rendement total et des émissions de gaz à effet de serre beaucoup plus faibles par rapport à la simulation actuelle. Par contre, selon le RCP 8.5, le rendement total est un peu plus haut, les émissions de CO₂ quasi équivalentes mais les émissions de N₂O sont supérieures de 5.43 kg/ha en plus que les émissions simulées actuelles. Le scénario RCP 8.5 émet donc environ 1620 PRG en plus.

Si le scénario RCP 8.5 venait à se réaliser, il faudrait donc apporter une importance toute particulière à la quantité d'azote incorporée au champ.

5. Conclusion et perspectives

Les objectifs de ce travail étaient de tester et d'évaluer le modèle STICS, pour simuler la croissance des plantes et les échanges des gaz CO_2 et N_2O qui y sont associés, à l'échelle d'une rotation, ainsi que de prédire le rendement et les variables environnementales selon différents scénarios climatiques, actuels et futurs.

Pour conclure, le test du modèle STICS pour la simulation de la croissance des plantes de la rotation betterave sucrière/froment d'hiver/pomme de terre/froment d'hiver est satisfaisant, excepté pour la modélisation de la pomme de terre. Le fichier « plante » de cette dernière culture nécessite des améliorations. De plus, le formalisme lié à la prédiction de la quantité d'azote dans les plantes nécessite des changements.

Concernant les échanges de dioxyde de carbone, l'évaluation du modèle est difficile. Le CO_2 mesuré ne correspond pas à ce que le modèle simule. Pour pallier à cela, une approximation a été réalisée sur les mesures afin de déterminer la respiration hétérotrophe simulée par le modèle STICS. Une autre approche aurait été de déterminer la production primaire nette à l'aide de la variable QN_{plante} si celle-ci avait été correctement modélisée.

Les résultats montrent que l'amplitude des émissions simulées est parfois trop élevée parfois trop faible. Cependant, la dynamique des courtes variations est convenablement reproduite par le modèle. De plus, la diminution du stock de carbone dans le sol de la parcelle étudiée est décemment représentée par le modèle malgré qu'il ne simule pas de changement de densité de sol.

Enfin, l'évolution des sorties de la modélisation concernant la production de protoxyde d'azote est comparée avec les mesures uniquement pendant l'année 2016. Comme pour le CO_2 , les variations d'émission sont correctement simulées mais l'amplitude des pics est parfois trop importante.

La seconde partie de ce travail consiste en la simulation du rendement et des échanges de gaz à effet de serre à l'horizon 2070-2100 selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5. Les prédictions selon le RCP 4.5, montrent une forte diminution des émissions de gaz liée à une ferme réduction des rendements cumulés. Selon le RCP 8.5, la prédiction des rendements tend à une légère hausse de production avec une même quantité de CO_2 émise que pour la simulation actuelle. Néanmoins, les émissions de N_2O prédites sont plus importantes.

Finalement, il faut retenir que la prédiction d'un modèle n'est jamais parfaite. Le modèle STICS nécessite encore des améliorations concernant les formalismes liés aux émissions de gaz à effet de serre associées à la gestion d'une rotation culturale.

6. Bibliographie

- A. A. Suleiman et J. T. Ritchie (2001) « Estimating Saturated Hydraulic Conductivity from Soil Porosity », *Transactions of the ASAE*, 44(2). doi: 10.13031/2013.4683.
- Andriulo, A., Mary, B. et Guerif, J. (1999) « Modelling soil carbon dynamics with various cropping sequences on the rolling pampas », *Agronomie*. EDP Sciences, 19(5), p. 365-377. doi: 10.1051/agro:19990504.
- Aubinet, M. *et al.* (2009) *CO₂ fluxes exchanged by a 4-year crop rotation cycle*, *Geophysical Research Abstracts*.
- Baey, C. *et al.* (2012) « Evaluation of the predictive capacity of five plant growth models for sugar beet », in *Proceedings - 2012 IEEE 4th International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications, PMA 2012*, p. 30-37. doi: 10.1109/PMA.2012.6524809.
- Bale, J. S. *et al.* (2002) « Herbivory in global climate change research: Direct effects of rising temperature on insect herbivores », *Global Change Biology*, 8(1), p. 1-16. doi: 10.1046/j.1365-2486.2002.00451.x.
- Banhölzer, S., Kossin, J. et Donner, S. (2014) « The impact of climate change on natural disasters », in *Reducing Disaster: Early Warning Systems for Climate Change*. doi: 10.1007/978-94-017-8598-3_2.
- Baret, F., Houlès, V. et Guérif, M. (2007) « Quantification of plant stress using remote sensing observations and crop models: The case of nitrogen management », *Journal of Experimental Botany*, 58(4), p. 869-880. doi: 10.1093/jxb/erl231.
- Bernoux, M. *et al.* (1998) « Bulk Densities of Brazilian Amazon Soils Related to Other Soil Properties », *Soil Science Society of America Journal*. Soil Science Society of America, 62(3), p. 743. doi: 10.2136/sssaj1998.03615995006200030029x.
- Bessou, C. *et al.* (2010) « Modelling soil compaction impacts on nitrous oxide emissions in arable fields », *European Journal of Soil Science*, 61(3), p. 348-363. doi: 10.1111/j.1365-2389.2010.01243.x.
- Bregaglio, S. *et al.* (2015) « New multi-model approach gives good estimations of wheat yield under semi-arid climate in Morocco », *Agronomy for Sustainable Development*, 35(1), p. 157-167. doi: 10.1007/s13593-014-0225-6.
- Brisson, N. *et al.* (1998) « STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn », *Agronomie*. EDP Sciences, 18(5-6), p. 311-346. doi: 10.1051/agro:19980501.
- Brisson, N. *et al.* (2003) *An overview of the crop model STICS*. Disponible sur: www.elsevier.com/locate/eja.
- Brisson, N. *et al.* (2008) *Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model*.
- Brisson, N. et Mary, B. (2002) « Notice concepts et formalismes - STICS Version 5 ».
- Brisson, N. et Mary, B. *STICS*. Disponible sur: www6.paca.inra.fr. (consulté en mars 2019)
- Buysse, P. *et al.* (2017) « Carbon budget measurement over 12 years at a crop production site in the silty-loam region in Belgium », *Agricultural and Forest Meteorology*. doi: 10.1016/j.agrformet.2017.07.004.
- Choudhury, Apurba Kanti *et al.* (2018) « Calibration and Validation of DSSAT Model for Simulating Wheat Yield in Bangladesh Cereal System Initiative in South Asia View project Nutrient Management for Growing Four Crops in a Year View project Haya: The Saudi Journal of Life Sciences (SJLS) Calibration and Validation of DSSAT Model for Simulating Wheat Yield in Bangladesh ». doi: 10.21276/haya.2018.3.4.3.

- Commission européenne (2018) *Commission Européenne*. Disponible sur: https://europa.eu/european-union/index_fr. (consulté en février 2019)
- Delogu, E. (2011) *Modélisation de la respiration du sol dans les agro-écosystèmes. Sciences de la Terre. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2013. Français. fftel-00953712f*. Disponible sur: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00953712>.
- Eagle, N., Macy, M. et Claxton, R. (2010) « Network diversity and economic development », *Science*, 328(5981), p. 1029-1031. doi: 10.1126/science.1186605.
- ECSSS (European Confederation of soil societies) (2012) « European confederation of soil science societies (ecsss) 2-6 », (July), p. 2-6.
- F.A.O. (2010) *F.A.O.* Disponible sur: <http://www.fao.org/faostat/fr/#home>. (consulté en février 2019)
- Falconnier, G. N. *et al.* (2019) « Calibration and evaluation of the STICS soil-crop model for faba bean to explain variability in yield and N₂ fixation », *European Journal of Agronomy*. Elsevier B.V., 104, p. 63-77. doi: 10.1016/j.eja.2019.01.001.
- Farina, R. *et al.* (2011) « Soil carbon dynamics and crop productivity as influenced by climate change in a rainfed cereal system under contrasting tillage using EPIC », *Soil and Tillage Research*, 112(1), p. 36-46. doi: 10.1016/j.still.2010.11.002.
- Farina, R. *et al.* (2018) « Do Crop Rotations Improve the Adaptation of Agricultural Systems to Climate Change? A Modeling Approach to Predict the Effect of Durum Wheat-Based Rotations on Soil Organic Carbon and Nitrogen. World soil Resources Report No. 106. », in *Soil Management and Climate Change: Effects on Organic Carbon, Nitrogen Dynamics, and Greenhouse Gas Emissions*. Elsevier Inc., p. 221-236. doi: 10.1016/B978-0-12-812128-3.00015-X.
- Ferchaud, F. (2018) *Forum STICS - soil*. Disponible sur: <https://www6.paca.inra.fr/stics/Support/Forum-des-utilisateurs>. (consulté en mai 2019)
- Fortuna, A. *et al.* (2003) « Seasonal changes in nitrification potential associated with application of N fertilizer and compost in maize systems of southwest Michigan », *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Elsevier, 97(1-3), p. 285-293. doi: 10.1016/S0167-8809(02)00232-3.
- Le Gall, C. *et al.* (2014) *Analyser et estimer les émissions de N₂O dans les systèmes de grandes cultures français, Innovations Agronomiques*.
- Gastal, F. et Lemaire, G. (2001) *N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective*. Disponible sur: <https://academic.oup.com/jxb/article-abstract/53/370/789/537168>.
- Giot, O. *et al.* (2016) « Validation of the ALARO-0 model within the EURO-CORDEX framework », *Geoscientific Model Development*, 9(3), p. 1143-1152. doi: 10.5194/gmd-9-1143-2016.
- Goudriaan, J. et Van Laar, H. H. (1994) *Modelling Potential Crop Growth Processes*. Dordrecht: Springer Netherlands (Current Issues in Production Ecology). doi: 10.1007/978-94-011-0750-1.
- Gray, S. B. et Brady, S. M. (2016) « Plant developmental responses to climate change », *Developmental Biology*. Academic Press Inc., p. 64-77. doi: 10.1016/j.ydbio.2016.07.023.
- Greenwood, D. J., Stone, D. A. et Draycott, A. (1990) « Weather, nitrogen-supply and growth rate of field vegetables », *Plant and Soil*, 124(2), p. 297-301. doi: 10.1007/BF00009276.
- Grelle, A. et Lindroth, A. (1996) « Eddy-correlation system for long-term monitoring of fluxes of heat, water vapour and CO₂ », *Global Change Biology*. Blackwell Publishing Ltd., 2(3), p. 297-307. doi: 10.1111/j.1365-2486.1996.tb00081.x.
- van Groenigen, J. W. *et al.* (2010) « Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: A case study for arable crops », *European Journal of Soil Science*. doi: 10.1111/j.1365-2389.2009.01217.x.
- Hagemann, M. et Bauwe, H. (2016) « Photorespiration », in *Encyclopedia of Applied Plant Sciences*. Elsevier Inc., p. 86-89. doi: 10.1016/B978-0-12-394807-6.00094-0.

- Hamdi, S., Chevallier, T. et Bernoux, M. (2012) « Testing the application of an agronomic concept to microbiology: A degree-day model to express cumulative co2 emission from soils », *European Journal of Agronomy*. Elsevier, 43, p. 18-23. doi: 10.1016/J.EJA.2012.05.003.
- Hashimoto, S. *et al.* (2015) « Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database », *Biogeosciences*. Copernicus GmbH, 12(13), p. 4121-4132. doi: 10.5194/bg-12-4121-2015.
- Haverkort, A. J. et Verhagen, A. (2008) « Climate change and its repercussions for the potato supply chain », *Potato Research*, 51(3-4), p. 223-237. doi: 10.1007/s11540-008-9107-0.
- He, W. *et al.* (2018) « Estimating the impacts of climate change on crop yields and N2O emissions for conventional and no-tillage in Southwestern Ontario, Canada », *Agricultural Systems*. Elsevier Ltd, 159, p. 187-198. doi: 10.1016/j.agsy.2017.01.025.
- Hénault, C. *et al.* (2012) « Nitrous Oxide Emission by Agricultural Soils: A Review of Spatial and Temporal Variability for Mitigation », *Pedosphere*. doi: 10.1016/S1002-0160(12)60029-0.
- Hoben, J. P. *et al.* (2011) « Nonlinear nitrous oxide (N2O) response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest », *Global Change Biology*, 17(2), p. 1140-1152. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02349.x.
- Hoogenboom, G. (2000) *Contribution of agrometeorology to the simulation of crop production and its applications, Agricultural and Forest Meteorology*.
- Hoogenboom, G. *et al.* (2012) « Experiments and Data for Model Evaluation and Application », in *Improving Soil Fertility Recommendations in Africa using the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)*. Dordrecht: Springer Netherlands, p. 9-18. doi: 10.1007/978-94-007-2960-5_2.
- I.P.C.C. *et al.* (2007) *Summary for Policymakers. AR4. Working groups III to the forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- I.P.C.C. (2014) *Summary for Policymakers, Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]*. Geneva, Switzerland. doi: 10.1017/CBO9781107415324.
- I.P.C.C. (2018) *GLOBAL WARMING OF 1.5 °C an IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*. William Solecki. Disponible sur: https://www.climat.be/files/4115/3900/0027/181008_IPCC_sr15_spm.pdf (Consulté le: 15 mai 2019).
- ICOS (sans date) *ICOS BELGIUM*. Disponible sur: <http://www.icos-belgium.be/ICOSbelgium.html> (Consulté le: 20 septembre 2003).
- IRM (2019) *IRM - Le climat à l'horizon 2100*. Disponible sur: <https://www.meteo.be/fr/climat/le-climat-a-lhorizon-2100> (Consulté le: 21 mai 2019).
- Jégo, G. *et al.* (2011) « Evaluation of the STICS crop growth model with maize cultivar parameters calibrated for Eastern Canada », *Agronomy for Sustainable Development*, 31(3), p. 557-570. doi: 10.1007/s13593-011-0014-4.
- Jones, J. W. *et al.* (2017) « Brief history of agricultural systems modeling », *Agricultural Systems*, 155, p. 240-254. doi: 10.1016/j.agsy.2016.05.014.
- Jones, P. D. et Moberg, A. (2003) « Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2001 », *Journal of Climate*, 16(2), p. 206-223. doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<0206:HALSSA>2.0.CO;2.

- Kang, Y., Khan, S. et Ma, X. (2009) « Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security - A review », *Progress in Natural Science*. Science Press, p. 1665-1674. doi: 10.1016/j.pnsc.2009.08.001.
- Kersebaum, K. C. *et al.* (2015) « Analysis and classification of data sets for calibration and validation of agro-ecosystem models », *Environmental Modelling and Software*. Elsevier Ltd, 72, p. 402-417. doi: 10.1016/j.envsoft.2015.05.009.
- Kirschbaum, M. U. F. (1995) *THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF SOIL ORGANIC MATTER DECOMPOSITION, AND THE EFFECT OF GLOBAL WARMING ON SOIL ORGANIC C STORAGE*, *Soil Bid. Biochem.*
- Kou, T. *et al.* (2007) « Effect of elevated atmospheric CO₂ concentration on soil and root respiration in winter wheat by using a respiration partitioning chamber », *Plant and Soil*, 299(1-2), p. 237-249. doi: 10.1007/s11104-007-9380-8.
- Kutsch, W. L., Bahn, M. et Heinemeyer, A. (2010) *Soil carbon dynamics: An integrated methodology*, *Soil Carbon Dynamics: An Integrated Methodology*. doi: 10.1017/CBO9780511711794.
- Léonard, J. (2016) « Nitrification, dénitrification et émissions de N₂O dans STICS_Joel_Leonard_2016 ».
- Linquist, B. *et al.* (2011) « An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops », *Global Change Biology*. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02502.x.
- Loague, K. et Green, R. E. (1991) *Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application*, *Journal of Contaminant Hydrology*.
- Lobell, D. B. et Burke, M. B. (2010) « On the use of statistical models to predict crop yield responses to climate change », *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(11), p. 1443-1452. doi: 10.1016/j.agrformet.2010.07.008.
- Lognoul, M. *et al.* (2017) « N₂O eddy covariance fluxes: From field measurements to flux analysis », in.
- Lognoul, M. *et al.* (2019) « N₂O flux short-term response to temperature and topsoil disturbance in a fertilized crop: An eddy covariance campaign », *Agricultural and Forest Meteorology*. doi: 10.1016/j.agrformet.2019.02.033.
- Lüthi, D. *et al.* (2008) « High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present », *Nature*. doi: 10.1038/nature06949.
- Mandal, A. et Neenu, S. (2014) *Impact of climate change on soil biodiversity-A review KVK, Harda & Biochar use of crop production View project Recycling of coconut biomass residues View project*. Disponible sur: <https://www.researchgate.net/publication/236155953>.
- McDonald, R. E. (2011) « Understanding the impact of climate change on Northern Hemisphere extra-tropical cyclones », *Climate Dynamics*, 37(7-8), p. 1399-1425. doi: 10.1007/s00382-010-0916-x.
- Meyer, N., Welp, G. et Amelung, W. (2018) « The Temperature Sensitivity (Q₁₀) of Soil Respiration: Controlling Factors and Spatial Prediction at Regional Scale Based on Environmental Soil Classes », *Global Biogeochemical Cycles*. Blackwell Publishing Ltd, 32(2), p. 306-323. doi: 10.1002/2017GB005644.
- Min, S. K. *et al.* (2011) « Human contribution to more-intense precipitation extremes », *Nature*. Nature Publishing Group, 470(7334), p. 378-381. doi: 10.1038/nature09763.
- Moncrieff A*, J. B. *et al.* (1997) *A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide*, *Journal of Hydrology ELSEVIER Journal of Hydrology*.
- Morissette, R. *et al.* (2016) « Simulating potato growth and nitrogen uptake in eastern Canada with the STICS model », *Agronomy Journal*. American Society of Agronomy, 108(5), p. 1853-1868. doi: 10.2134/agronj2016.02.0112.

- Moureaux, C. *et al.* (2006) *Carbon balance of a Belgian crop*, *Geophysical Research Abstracts*.
- Moureaux, C. *et al.* (2008) « Carbon balance assessment of a Belgian winter wheat crop (*Triticum aestivum* L.) », *Global Change Biology*, 14(6), p. 1353-1366. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01560.x.
- Moureaux, C. *et al.* (2011) *Carbon balance of crops: overview of 7 years of investigation*, *Geophysical Research Abstracts*.
- Moureaux, C., Bodson, B. et Aubinet, M. (2008) *Mesure des flux de CO₂ et bilan carboné de grandes cultures : état de la question et méthodologie*. Gembloux. doi: <http://www.pressesagro.be/base/text/v12n3/303.pdf>.
- Nicolardot, B., Recous, S. et Mary, B. (2001) *Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C:N ratio of the residues*, *Plant and Soil*. Disponible sur: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023%2FA%3A1004813801728.pdf> (Consulté le: 24 juillet 2019).
- NIVAP HOLLAND (2011) « Netherlands catalogue of potato varieties ». Disponible sur: www.nivap.nl.
- de Noblet-Ducoudré, N. *et al.* (2004) « Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Scheme ORCHIDEE to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets », *Agronomie*. EDP Sciences, 24(6-7), p. 397-407. doi: 10.1051/agro:2004038.
- Norton, J. M., Schepers, J. S. et Raun, W. R. (2008) « Nitrification in Agricultural Soils », in. doi: 10.2134/agronmonogr49.c6.
- Olesen, J. E. *et al.* (2011) « Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change », *European Journal of Agronomy*, p. 96-112. doi: 10.1016/j.eja.2010.11.003.
- Parry, M. L. *et al.* (2004) « Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios », *Global Environmental Change*. Elsevier Ltd, 14(1), p. 53-67. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2003.10.008.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L. et McMahon, T. A. (2007) *Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification* *Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification*, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* Disponible sur: www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/4/439/2007/.
- Petkeviciene, B. (2009) *The effects of climate factors on sugar beet early sowing timing*.
- Pohanková, E. *et al.* (2015) « Calibration and validation of the crop growth model daisy for spring barley in the Czech Republic », *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*. Mendel University of Agriculture and Forestry Brno, 63(4), p. 1177-1186. doi: 10.11118/actaun201563041177.
- Ponce de León, M. A. et Bailey, B. N. (2019) « Evaluating the use of Beer's law for estimating light interception in canopy architectures with varying heterogeneity and anisotropy », *Ecological Modelling*. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2019.04.010.
- Ripoche-Wachter, D. et Lecharpentier, P. (2017) *JavaStics 1.40/STICS v8.50*. Disponible sur: https://w3.avignon.inra.fr/forge/attachments/download/1656/JavaStics_documentation.pdf.
- Sansoulet, J. *et al.* (2012) *PERFORMANCE EVALUATION OF STICS CROP MODEL TO SIMULATE CORN GROWTH ATTRIBUTES IN RESPONSE TO N RATE AND CLIMATE VARIATIONS*.
- Schulze, E.-D. *et al.* (2010) « The European Carbon and Greenhouse Gas Balance Revisited », *Global Change Biology*. Wiley, p. 1451. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02215.xi.
- Science-Climat-Energie.be*. Disponible sur: www.science-climat-energie.be. (consulté en juin 2019)
- Seguin, B. (2010) « Le changement climatique : conséquences pour les végétaux », *Quaderni*. OpenEdition, (71), p. 27-40. doi: 10.4000/quaderni.525.

- Seneviratne, S. I. *et al.* (2018) « Climate extremes, land-climate feedbacks and land-use forcing at 1.5°C », *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. Royal Society Publishing, 376(2119). doi: 10.1098/rsta.2016.0450.
- Sihi, D. *et al.* (2018) « Merging a mechanistic enzymatic model of soil heterotrophic respiration into an ecosystem model in two AmeriFlux sites of northeastern USA », *Agricultural and Forest Meteorology*. Elsevier B.V., 252, p. 155-166. doi: 10.1016/j.agrformet.2018.01.026.
- Smith, J. W., Anderson, D. H. et Moore, R. L. (2012) « Social Capital, Place Meanings, and Perceived Resilience to Climate Change », *Rural Sociology*, 77(3), p. 380-407. doi: 10.1111/j.1549-0831.2012.00082.x.
- Snyder, C. S. *et al.* (2009) « Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects », *Agriculture, Ecosystems and Environment*, p. 247-266. doi: 10.1016/j.agee.2009.04.021.
- Stockle, C. O. *et al.* (1992) « A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part I-Modification of the EPIC model for climate change analysis », *Agricultural Systems*, 38(3), p. 225-238. doi: 10.1016/0308-521X(92)90067-X.
- Suleau, M. *et al.* (2011) « Respiration of three Belgian crops: Partitioning of total ecosystem respiration in its heterotrophic, above- and below-ground autotrophic components », *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(5), p. 633-643. doi: 10.1016/j.agrformet.2011.01.012.
- Tardieu, F. (2003) « Virtual plants: modelling as a tool for the genomics of tolerance to water deficit », *Trends in Plant Science*, 8(1), p. 9-14. doi: 10.1016/S1360-1385(02)00008-0.
- Termonia, P. *et al.* (2018) « The CORDEX.be initiative as a foundation for climate services in Belgium », *Climate Services*. Elsevier B.V., 11, p. 49-61. doi: 10.1016/j.cliser.2018.05.001.
- Trenberth, K. E. *et al.* (2014) « Global warming and changes in drought », *Nature Climate Change*, 4(1), p. 17-22. doi: 10.1038/nclimate2067.
- De Troch, R. *et al.* (2013) « Multiscale performance of the ALARO-0 model for simulating extreme summer precipitation climatology in Belgium », *Journal of Climate*, 26(22), p. 8895-8915. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00844.1.
- Vogeler, I. *et al.* (2011) *Comparison of models for predicting nitrification, denitrification and nitrous oxide emissions in pastoral systems*. Disponible sur: <http://mssanz.org.au/modsim2011>.
- Willems, P. *et al.* (2017) « Multidecadal convection permitting climate simulations over Belgium: sensitivity of future precipitation extremes », *Atmospheric Science Letters*. doi: 10.1002/asl.720.
- Willmott, C. J. *et al.* (1985) « Statistics for the evaluation and comparison of models », *Journal of Geophysical Research*. American Geophysical Union (AGU), 90(C5), p. 8995. doi: 10.1029/jc090ic05p08995.
- Yin, X. et Schapendonk, A. H. C. M. (2016) *Simulating the partitioning of biomass and nitrogen between roots and shoot in crop and grass plants*. doi: 10.1016/S1573-5214(04)80005-8.
- Van Ypersele, J.-P. (2017) *Climate Change: from Global to Local*.
- Zhang, D. D. *et al.* (2007) « Global climate change, war, and population decline in recent human history », *Proceedings of the National Academy of Sciences*. National Academy of Sciences, 104(49), p. 19214-19219. doi: 10.1073/PNAS.0703073104

