



**HAL**  
open science

# Effet du tassement d'un sol forestier sur les flux de méthane et de CO<sub>2</sub>

Fatou-Kine Ndiaye

► **To cite this version:**

Fatou-Kine Ndiaye. Effet du tassement d'un sol forestier sur les flux de méthane et de CO<sub>2</sub>. Sciences de l'environnement. 2014. hal-02106883

**HAL Id: hal-02106883**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-02106883v1>**

Submitted on 23 Apr 2019

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

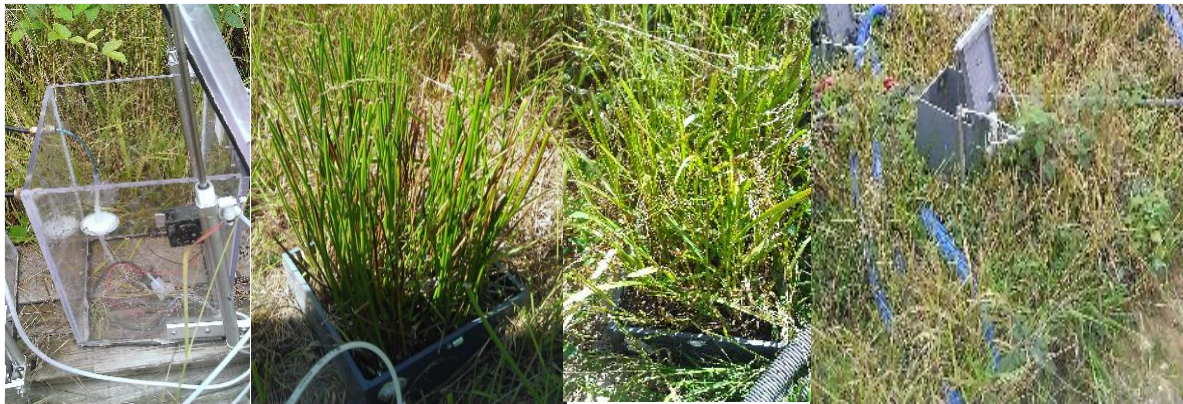
<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

**2013 - 2014**

**Mémoire Master FAGE**

**Biologie et Écologie pour la Forêt, l'Agronomie et  
l'Environnement**  
**Spécialité FGE**

**EFFET DU TASSEMENT D'UN SOL  
FORESTIER SUR LES FLUX DE  
MÉTHANE ET DE CO<sub>2</sub> : RÔLE DE LA  
VÉGÉTATION HERBACÉE  
ACCOMPAGNATRICE**



**NDIAYE FATOU KINÉ**

**MÉMOIRE DE STAGE SOUTENU À NANCY LE 03/09/2014**

**MAÎTRE DE STAGE : CAROLINE PLAIN**, ingénieure d'étude, université de Lorraine

**TUTEUR UNIVERSITAIRE : DANIEL EPRON**, professeur, université de Lorraine

## Remerciements

La fin des études de deuxième cycle est sanctionnée par un travail de recherche devant aboutir à la rédaction d'un mémoire de fin d'études.

Pendant six mois j'ai effectué mon stage au sein de l'unité mixte de recherche « Écologie et Écophysiologie Forestières » (EEF). Au terme de la rédaction de ce mémoire, il m'est particulièrement agréable d'exprimer ma gratitude et mes remerciements à tous ceux qui, par leur enseignement, leur soutien et leurs conseils, m'ont aidée à sa réalisation.

Mon tuteur de stage, ÉPRON Daniel et mon maître de stage PLAIN Caroline m'ont permis de poursuivre mon travail de recherche dans un esprit scientifique rigoureux. Leur écoute attentive et continue, leurs remarques, leurs suggestions ainsi que le partage de leur savoir-faire m'ont été d'une aide précieuse. Je leur adresse mes plus sincères remerciements.

Merci à Caroline et Stéphane pour m'avoir toujours accompagnée sur le terrain.

Enfin merci à mes collègues stagiaires (Nicolas et Céline), à Maxim ainsi que tous les chercheurs de l'unité, basés à la faculté des sciences et technologie pour les repas, les thés et les discussions indispensables à tout stage.

## Table des matières

I.	Introduction .....	1
a.	Contexte .....	1
b.	Structure d'accueil .....	2
c.	Objectif de l'étude .....	2
d.	Hypothèses .....	2
e.	Démarche .....	3
II.	Matériel et méthodes .....	3
a.	Site d'étude .....	3
b.	Mesure des flux de CO <sub>2</sub> et de CH <sub>4</sub> .....	4
1.	Avec les chambres opaques en PVC à fermeture automatique .....	4
2.	Avec les chambres claires à fermeture automatique .....	4
3.	Calcul des flux .....	5
c.	Mesure des paramètres pédoclimatiques .....	6
d.	Traitement et analyse des données .....	6
III.	Résultats .....	7
a.	Evolution temporelle des flux de CO <sub>2</sub> et de CH <sub>4</sub> .....	7
b.	Evolution temporelle des paramètres pédoclimatiques .....	8
c.	Effet des paramètres pédoclimatiques sur les flux de CH <sub>4</sub> et de CO <sub>2</sub> .....	9
1.	Flux de CO <sub>2</sub> et température du sol .....	9
2.	Analyse des résidus de la variante « bas » du traitement tassé .....	10
3.	Flux de CH <sub>4</sub> et humidité du sol .....	11
d.	Influence du traitement sur le cumul des flux de CO <sub>2</sub> et de CH <sub>4</sub> .....	11
e.	Rôle de la végétation sur les flux de CO <sub>2</sub> et de CH <sub>4</sub> .....	12
1.	Variations infra-journalières du PAR et des flux de CO <sub>2</sub> et de CH <sub>4</sub> .....	12
2.	Influence du traitement sur les flux de CO <sub>2</sub> et de CH <sub>4</sub> pour les différentes campagnes .....	14
3.	Influence de la végétation sur les flux de CH <sub>4</sub> .....	17
IV.	Discussion .....	18
a.	Flux de CO <sub>2</sub> et paramètres pédoclimatiques .....	18
b.	Flux de méthane et paramètres pédoclimatiques .....	19
c.	Effet traitement sur le bilan de CO <sub>2</sub> et de CH <sub>4</sub> sur huit (8) mois de mesures .....	20
d.	Effet de la végétation sur les flux de CO <sub>2</sub> .....	21
e.	Effet de la végétation sur les flux de CH <sub>4</sub> .....	22
V.	Conclusion-perspectives .....	23
VI.	Bibliographie .....	23

# I. Introduction

## a. Contexte

Le sol est un système interactif constitué de matière minérale, de matière organique, de micro-organismes, d'eau et d'air. Chacun de ces éléments va déterminer le fonctionnement du sol. Les pores du sol constituent une interface d'échange entre le sol et l'atmosphère. Ils peuvent être occupés par l'eau et/ou l'air. Ils constituent donc un élément important pour le stockage et le transport des fluides.

La quantité de carbone stockée dans le sol dépend du flux entrant c'est-à-dire les chutes de litière et la production de biomasse racinaire d'une part ; du flux sortant qui correspond aux émissions de carbone dues à la décomposition de la matière organique et à la respiration microbienne et racinaire d'autre part. Le flux mesuré à la surface du sol est la somme de la respiration microbienne et racinaire (Luo et Zhou, 2006). La température et l'humidité du sol sont les deux facteurs environnementaux qui contrôlent le plus la variation saisonnière des flux de CO<sub>2</sub> dans le sol (Luo et Zhou, 2006). Une augmentation de la température ne s'accompagne pas toujours d'une augmentation des émissions. En effet, des flux différents ont été observés à des températures similaires (Epron, 1999).

On retrouve aussi dans le sol un gaz de la famille des hydrocarbures : le méthane (CH<sub>4</sub>). Ce dernier, tout comme le CO<sub>2</sub>, fait partie des gaz à effet de serre (GIEC, 2007). Sa concentration dans l'air sec est de 1,7 ppm, il a une forte capacité à absorber les rayonnements infrarouges, ce qui lui donne un pouvoir de réchauffement 15 à 30 fois supérieur à celui du CO<sub>2</sub> (Le Mer et Roger, 2003).

Dans le sol, on peut avoir une production et une consommation de méthane (flux net) qui sont les résultantes de deux activités microbiennes : la méthanogénèse et la méthanotrophie (Le Mer et Roger, 2003).

Les bactéries méthanogènes sont responsables de la production de méthane dans le sol. Cette production se fait par dégradation de la matière organique en conditions anaérobie, c'est à dire lorsque les concentrations en oxygène sont faibles (Luo et Zhou, 2006). Les éléments essentiels à la production de méthane sont donc l'état d'oxygénation du sol mais également la disponibilité en matière organique du sol et la quantité de bactéries méthanogènes.

Le méthane ainsi produit peut passer directement dans l'atmosphère par diffusion ou par ébullition, sous forme de bulles. Le flux diffusif dépend du gradient de concentration de gaz entre le sol et l'atmosphère (Janssens, 1999). Le flux diffusif pour un gaz donné est décrit par la première loi de Fick comme étant proportionnel au gradient de sa concentration. Le méthane peut aussi être oxydé par les bactéries méthanotrophes, en conditions aérobie, qui l'utilisent comme source d'énergie. Cette source d'énergie peut aussi provenir directement du méthane atmosphérique, lorsque la concentration atmosphérique est supérieure à celle du sol, permettant au méthane de diffuser de l'atmosphère vers le sol (figure 1).

En général, les sols forestiers sont considérés comme des puits de méthane. La consommation nette de méthane atmosphérique est généralement influencée par des facteurs biotiques et abiotiques tels que : l'humidité du sol, la densité apparente, l'acidité du sol, la structure, l'activité des bactéries méthanotrophes et la texture du sol (Guckland, 2009). Cependant, selon Kruse et Al (1996), l'humidité du sol en influant sur le coefficient de diffusion, serait le principal facteur régulant la consommation de méthane dans le sol. En effet, le coefficient de diffusion qui traduit la capacité diffusive d'un gaz est faible pour des humidités fortes (Ndiaye, 2013).

Les plantes peuvent aussi affecter les quantités de méthane émises. Elles peuvent transporter le méthane produit vers les zones aérobies de leur rhizosphère à travers leurs racines, leurs tiges et leurs feuilles (Bhullar et Al, 2013). Plus il y a de racines plus la quantité de méthane émise est importante (Henneberg et Al, 2012). Les plantes peuvent également transporter l'oxygène.

Depuis le début des années 1950, l'homme est passé de l'utilisation de chevaux et de quelques rares tracteurs à des engins spécialisés. L'utilisation de ces derniers se justifie par une réduction du temps de travail et de l'effort fourni, mais également par un besoin d'augmenter le rendement. En milieu forestier, des engins lourds sont utilisés lors de l'exploitation. Ces derniers entraînent des contraintes physiques sur le sol : le tassement, c'est-à-dire une réduction du volume de sols sans modification de la masse (Renouf, 2009). En France, nous assistons de plus en plus à une mécanisation généralisée des opérations agricoles et sylvicoles (Richard, 2012), ce qui peut augmenter le risque de tassement des sols. Le tassement affecte l'humidité du sol (Barik et al, 2014) en modifiant sa porosité. La quantité d'air du sol diminue avec une augmentation de la teneur en eau du sol (Richard et Al, 1999). Ce qui peut affecter la diffusion des gaz. Le gaz diffuse mieux dans un sol non tassé que dans un sol tassé (Ndiaye, 2013). Cependant, cette diminution du coefficient de diffusion va engendrer une modification de l'activité biologique du sol. En effet, une diminution de la quantité d'oxygène va entraîner une réduction de la respiration racinaire et microbienne, et par conséquent une diminution du flux de CO<sub>2</sub>. Une diminution de la diffusion du méthane atmosphérique, sera moins favorable à l'activité des bactéries méthanotrophes.

Le tassement affecte donc les propriétés physiques et l'activité biologique des sols ; avec des effets potentiels sur la fertilité et la croissance des peuplements forestiers.

#### **b. Structure d'accueil**

Ce stage, effectué au sein de l'Unité Mixte de Recherche Écologie et Écophysologie Forestières (UMR EEF), a été financé sur un projet du programme REACTIF de l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie). L'unité de recherche EEF est constituée de personnels de l'INRA et de l'Université de Lorraine. Cette étude entre dans le cadre du projet EMEFOR (Emission de CO<sub>2</sub> et de Méthane par les sols FOREstiers) qui étudie les effets du tassement sur la production, le transfert et l'émission de CO<sub>2</sub> et de méthane par un sol forestier. L'objectif est de mesurer en continu les flux nets de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> d'une parcelle forestière sensible au tassement (site expérimental d'Azerailles, Soere F-ORE-T) pour deux modes d'exploitation, l'un respectant la structure du sol et l'autre utilisant des engins lourds conduisant à un tassement du sol.

#### **c. Objectif de l'étude**

Deux objectifs sont visés :

- En s'appuyant sur les relations entre les flux et les paramètres climatiques et édaphiques ; montrer que la réduction de la porosité du sol due au tassement affecte les flux nets de méthane et de CO<sub>2</sub> ;
- Vérifier le rôle de la végétation herbacée accompagnatrice sur les flux nets de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> du traitement tassé.

#### **d. Hypothèses**

Pour atteindre ces objectifs, trois hypothèses ont été testées :

- Le tassement entraîne une diminution des flux nets de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> ;
- La présence de végétation affecte le flux net de CO<sub>2</sub> ;



- La présence de végétation entraîne pour le méthane une augmentation du flux net de production.

Dans le cadre de cette étude, nous avons mesuré les flux nets c'est-à-dire sans séparer les flux liés à la production des flux liés à la consommation. Un flux négatif traduit une consommation supérieure à la production et vice versa.

### e. Démarche

Tout d'abord, nous avons mis en évidence l'évolution des flux au cours du temps ; ensuite nous avons cherché le type de relation qui pouvait exister entre les flux mesurés et les paramètres pédoclimatiques ; enfin nous nous sommes intéressés à la quantification et à la comparaison des flux nets de méthane et de dioxyde de carbone, en comparant le traitement contrôle (non tassé) et le traitement tassé, au sein duquel nous avons distingué deux variantes.

Des études antérieures, associant émissions de méthane et végétation, ont surtout concerné les zones humides (Roger et Le Mer, 1999 ; Banker, 1995) ou ont été réalisées en laboratoire (Bhullar et al, 2013). Ici, nous nous proposons d'étudier in situ, le rôle que pourrait avoir la végétation herbacée accompagnatrice de notre site expérimental (forêt domaniale d'Azerailles) sur les flux nets de CO<sub>2</sub> et de méthane du traitement tassé ; en ciblant particulièrement deux espèces herbacées (le *Juncus effusus* et le *Glyceria striata*).

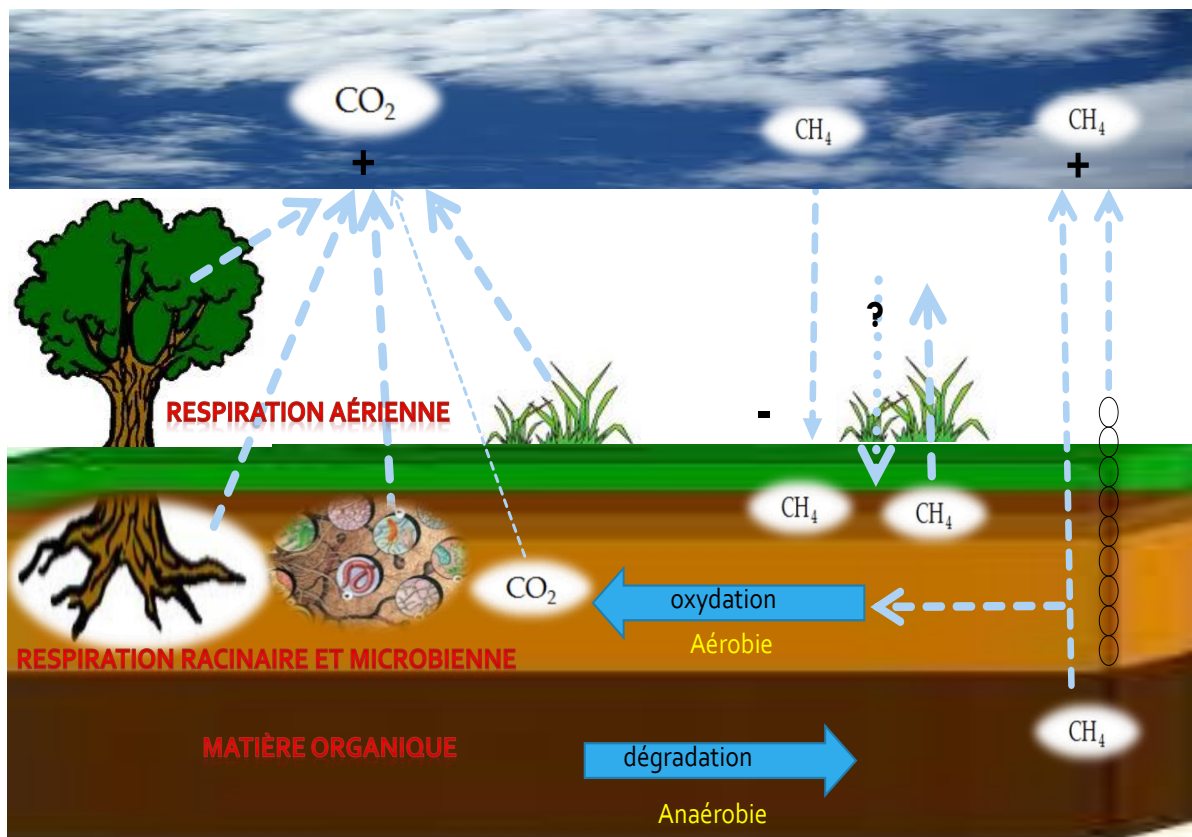


Figure 1 : production et consommation de méthane et de CO<sub>2</sub> par un sol forestier

## II. Matériel et méthodes

### a. Site d'étude

Cette étude a été effectuée dans la forêt domaniale des Hauts-Bois à Azerailles (à la latitude 48°29'19" Nord et à la longitude 6°41'43" Est), dans le département de Meurthe et



Moselle. La pluviométrie et la température moyenne annuelle sont de 950 mm et de 8,5°C, respectivement.

Le sol présente une texture limoneuse en surface et argileuse en profondeur (vers 50 cm). L'humus est de type mésomull et le sol est sensible au tassement (Ranger et al, 2012).

Le site est divisé en trois blocs. Sur chaque bloc, on peut distinguer un traitement tassé et un traitement non tassé (contrôle). Le tassement du sol a été effectué de manière contrôlée sur une bande de 30 m de largeur et 50 m de longueur avec un porteur VALMET 8 roues habituellement utilisé en milieu forestier. De part et d'autre de la bande tassée, deux bandes non tassées de 10 m de large et 50 m de longueur ont été laissées. Le fluage du sol lors du dernier passage du porteur a engendré des différences de microtopographie formant des bourrelets. La formation de ces bourrelets a permis de définir deux variantes au traitement tassé : un tassé haut et un tassé bas (figure 2).

Après tassement, 1600 plants de chêne sessile par hectare ont été plantés. Une forte mortalité a été observée sur le traitement tassé (Ranger et al 2012).



**Figure 2 : tassement du sol et les différents traitements**

## **b. Mesure des flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>**

### **1. Avec les chambres opaques en PVC à fermeture automatique**

Avec les chambres en PVC, fixées sur des embases préalablement enfoncées dans le sol, l'augmentation des concentrations de méthane et de dioxyde de carbone sur sol nu ont été mesurées d'octobre 2013 à juin 2014 à l'aide d'un analyseur rapide de gaz (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et H<sub>2</sub>O), FGGGA de Los Gatos Research lorsque les chambres sont fermées. L'analyseur est relié aux 12 chambres de dimensions 20 cm x 20 cm x 20 cm. Ces dernières sont réparties sur les deux traitements en tenant compte des deux variantes du traitement tassé : 4 sur Tassé Haut (TH), 4 sur Tassé Bas (TB) et 4 sur Contrôle (C) (figure 3). L'analyseur mesure en continu toutes les secondes les concentrations de méthane, de dioxyde de carbone, de vapeur d'eau ainsi que la température et la pression. La durée de mesure dans une chambre est de 15 minutes, ce qui correspond à un cycle de 3 heures pour mesurer les 12 chambres. L'air circule en circuit fermé entre la chambre fermée et l'analyseur. Des électrovannes permettent de mesurer une chambre après l'autre. Dans les 15 minutes de mesure, les deux à trois premières minutes sont éliminées, correspondant à la purge des tubes et à la fermeture de la chambre. L'analyseur est calibré en utilisant deux gaz de calibration (méthane et CO<sub>2</sub>) qui passent toutes les 3 heures. Le premier gaz de calibration a une concentration de 0 ppm en CO<sub>2</sub> et 0 ppm en CH<sub>4</sub> et le second a une concentration de 400 ppm en CO<sub>2</sub> et 2 ppm en CH<sub>4</sub>.

### **2. Avec les chambres claires à fermeture automatique**

Installées de la même façon que les chambres en PVC, les chambres claires de dimensions 20 cm x 20 cm x 30 cm (figure 3), ont permis de mesurer les flux de méthane et

de CO<sub>2</sub> en incluant la couverture végétale (*Juncus effusus* et *Glyceria striata*) des traitements tassés. Six chambres sont réparties entre les deux variantes « haut (TH) » et « bas (TB) » du traitement tassé, trois sur le jonc en TH, et trois sur la glycérie en TB. Le choix du traitement pour chacune des espèces correspond au maximum de sa répartition sur le site. Les six chambres sont également reliées à l'analyseur avec le même principe de mesure. La durée d'une mesure dans une chambre claire est de 5 minutes. Au total, nous avons réalisé cinq campagnes de mesures de mai à juillet 2014.



Figure 3: Matériel de mesure des flux : a=Analyseur de gaz (Los Gatos Research) b=Chambre en PVC c=Chambre claires

### 3. Calcul des flux

Les flux nets de méthane et de CO<sub>2</sub> ont été calculés en utilisant la fonction droite de régression sur Excel grâce avec laquelle on détermine la pente correspondant aux variations temporelles des concentrations de méthane et de CO<sub>2</sub> dans la chambre en ppm (figure 4).

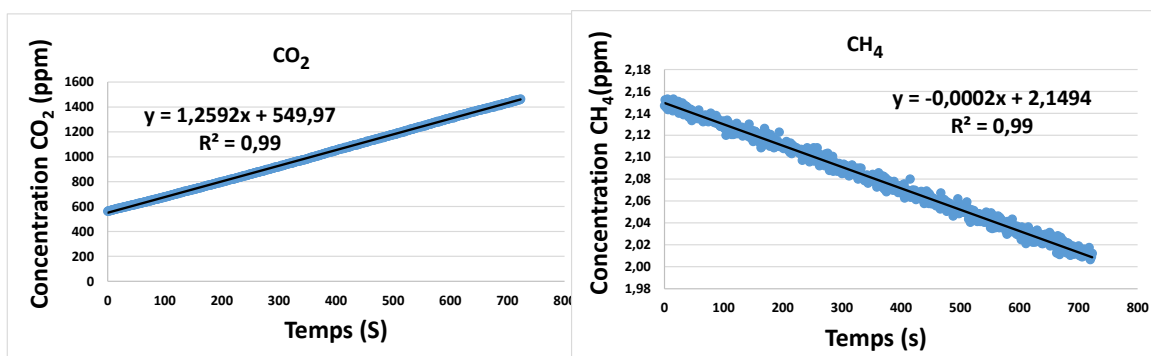


Figure 4 : Evolution des concentrations de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> en fonction du temps

La pente ainsi obtenue est intégrée dans le calcul du flux selon la formule suivante :

$$F_s = \frac{\Delta C}{\Delta t} \times \frac{P \times V_c}{R \times T \times S_c}$$

F<sub>s</sub> : flux de CO<sub>2</sub> (μmol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>), flux de CH<sub>4</sub> (nmol.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>) ;

ΔC/Δt: évolution des concentrations de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> dans la chambre au cours du temps (ppm/s);

V<sub>c</sub> : volume de la chambre (m<sup>3</sup>) ;

S<sub>c</sub> : surface de sol couverte par la chambre (m<sup>2</sup>) ;

P : pression atmosphérique (101300 Pa) ;

T : température dans la chambre (K) ;

R : constante des gaz parfait (8,314 JK/mol).

### c. Mesure des paramètres pédoclimatiques

Des sondes d'humidité et de température ont été insérées à différentes profondeurs du sol : 10 cm, 25cm et 40 cm. Les données d'humidité et de température du sol sont enregistrées toutes les 5 ou 15 minutes par une centrale d'acquisition de données de type CR3000.

Au-dessus de la cabane, et donc de la couronne des chênes, un capteur PAR (Rayonnement Photosynthétiquement Actif) a été installé. Ce dernier mesure l'énergie lumineuse reçue sur le site au moment de la mesure des flux. Nous l'avons utilisée comme référence pour séparer les flux mesurés avec les chambres claires durant le jour (flux diurnes : PAR>1) et durant la nuit (flux nocturnes : PAR<1).

### d. Traitement et analyse des données

Lorsque le coefficient de détermination permettant le calcul de la variation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans une chambre est inférieur à 0,97, la donnée est rejetée. Sur certains cycles journaliers, il manquait ainsi des données pour certaines chambres. Normalement sur une journée de mesures, une chambre est mesurée huit (8) fois. Lorsqu'il ne manquait qu'une ou deux valeurs, nous avons néanmoins considéré la moyenne journalière comme valide. Cependant, s'il nous manquait plus de deux valeurs, nous avons recalculé la moyenne journalière du flux de la chambre soit :

- en tenant compte de la variabilité spatiale et temporelle :

$$\text{flux } C1\text{jour}_x = \frac{\text{moyenne flux } C1(\text{jour}_x - 1 \text{ et } \text{jour}_x + 1) * \text{moyenne flux } C234\text{jour}_x}{\text{moyenne}(\text{moyenne flux } C234\text{jour}_x - 1 \text{ et } \text{jour}_x - 1)}$$

C1, C2, C3 et C4 correspondent aux quatre chambres d'un même traitement.

- Sinon pour chaque chambre, on a utilisé l'équation donnée par la relation entre le flux de CO<sub>2</sub> et la température :  $Y = Ae^{BT}$ , et entre le flux CH<sub>4</sub> et l'humidité du sol :  $Y = aX + a$ , avec les moyennes journalières validées (figure 5).

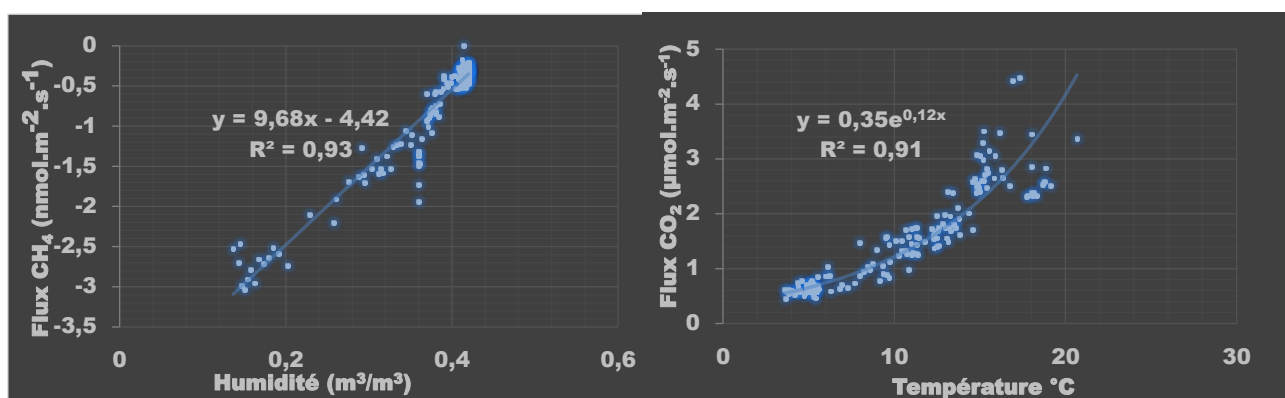


Figure 5: relation entre flux et paramètres pédoclimatiques utilisée pour recalculer les flux

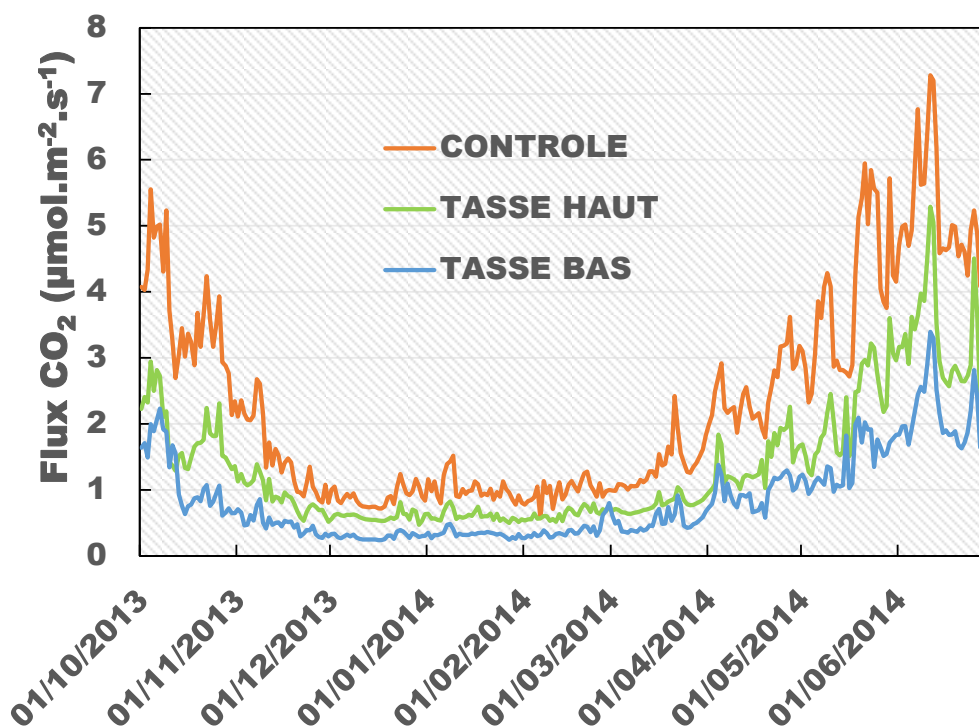
Après avoir ainsi estimé toutes les moyennes journalières manquantes pour chacune des chambres, nous avons mis en évidence l'évolution des flux moyens journaliers au cours du temps du 1<sup>er</sup> octobre 2013 au 30 juin 2014. Nous avons testé l'effet des paramètres pédoclimatiques sur les flux moyens journaliers. Un cumul sur huit (8) mois des flux nets de méthane et de CO<sub>2</sub> par traitement a également été calculé. Enfin, pour étudier le rôle de la

végétation sur les flux, nous avons mis en évidence la variation journalière et nocturne des flux de CO<sub>2</sub> et de méthane. Les résultats ainsi obtenus ont fait l'objet d'analyses statistiques (cumul, effet végétation 24 h, jour et nuit). Après avoir vérifié la normalité des données et leur homoscedasticité, un test non paramétrique (Kruskal-Wallis) et une ANOVA à deux facteurs ont été réalisés sur les données chambres opaques et chambres claires respectivement. Afin de mettre en évidence les différences entre les groupes, une comparaison multiple entre les différents traitements a été faite après le test de Kruskal -Wallis en utilisant le package Pgirmess (Kruskalmc) et un test de Tukey a été utilisé après l'ANOVA. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R 3.01.

### III. Résultats

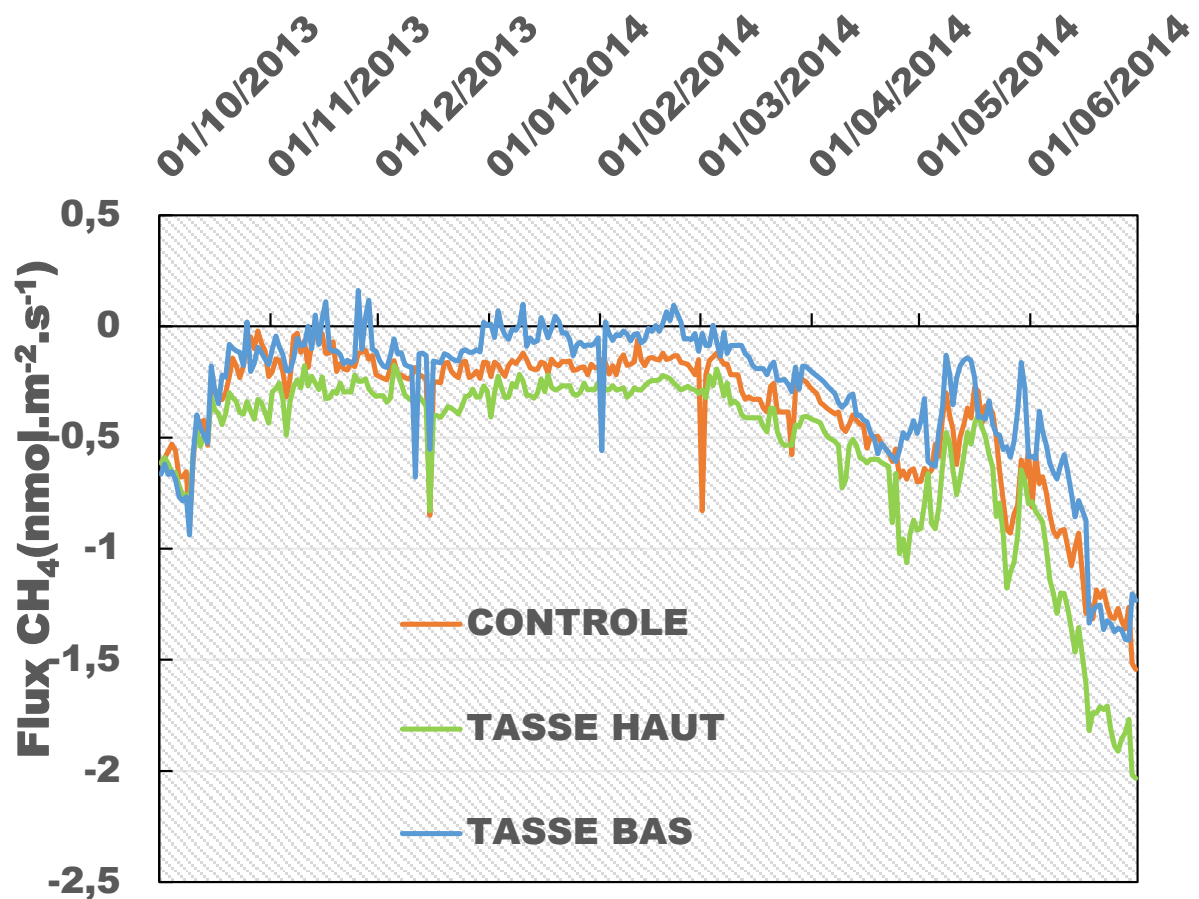
#### a. Evolution temporelle des flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>

Avec les données recalculées, nous avons évalué l'évolution temporelle de la moyenne journalière des flux de CO<sub>2</sub>. La figure 6 montre pour les trois traitements une tendance similaire durant la période de mesures. La valeur moyenne de flux par date et par traitement était comprise entre 0,24 et 7,27  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . Pour tous les traitements, les flux mesurés en automne (octobre - 20 décembre), printemps (20 mars - 20 juin) et début de l'été sont restés supérieurs aux flux mesurés en hiver (21 décembre - 19 mars). Cependant, les flux de CO<sub>2</sub> du contrôle sont restés supérieurs aux flux des deux variantes « haut » et « bas » du traitement tassé. La variante « tassé bas » a montré le flux de CO<sub>2</sub> le plus faible.



**Figure 6: variations saisonnières des flux de CO<sub>2</sub> par traitement**

La figure 7 montre pour les traitements contrôle et la variante « haut » du traitement tassé un flux net négatif durant toute la période de mesures, c'est-à-dire une consommation de méthane supérieure à la production. Pour la variante « tassé bas », on a observé pour certaines périodes d'automne et d'hiver une production de méthane supérieure à la consommation. Les consommations les plus importantes ont été observées au printemps et en début d'été pour tous les traitements.



*Figure 7: variations saisonnières des flux de CH<sub>4</sub> par traitement*

#### b. Evolution temporelle des paramètres pédoclimatiques

La figure 8a montre une évolution de l'humidité du sol au cours du temps. En automne et au printemps, on a observé une variation de l'humidité du sol à -10 cm pour tous les traitements. En automne, la teneur en eau du tassé bas était supérieure à celle des traitements tassé haut et contrôle. L'humidité du tassé haut reste constante en hiver. Les humidités faibles ont été observées en début d'été. La température du sol à 10 cm de profondeur montre une nette tendance saisonnière (figure 8b), avec en automne des températures qui ont chuté de 15 à 7 °C ; en hiver, qui ont varié entre 1 à 6 °C , et au printemps, qui ont varié de 6 à 15 °C puis en été, qui ont cru de 15 à 21 °C. La valeur minimale a été observée sur la « variante bas » du traitement tassé et la valeur maximale sur le traitement contrôle.

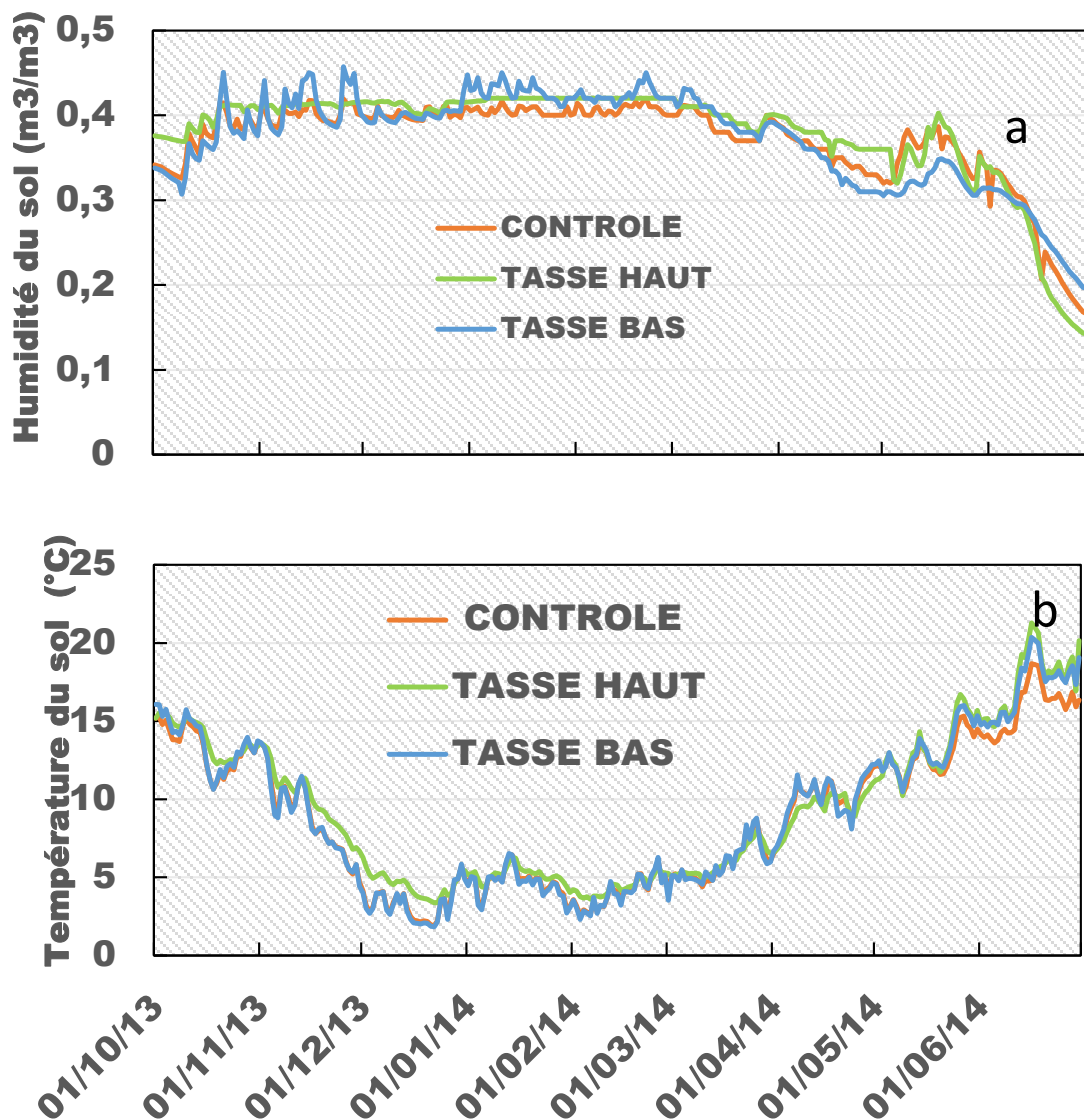


Figure 8: variations saisonnières de l'humidité et de la température du sol à 10 cm de profondeur

### c. Effet des paramètres pédoclimatiques sur les flux de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub>

#### 1. Flux de CO<sub>2</sub> et température du sol

L'influence de la température du sol à 10 cm de profondeur sur les flux de CO<sub>2</sub> a été évaluée. Nous avons choisi la température à 10 cm de profondeur parce qu'elle donnait le meilleur résultat avec le flux de CO<sub>2</sub>. La fonction appliquée ici est une fonction exponentielle ( $Y = Ae^{BT}$ ) où B est le facteur de sensibilité équivalent au Q<sub>10</sub> ( $Q_{10} = e^{10B}$ ). Le Q<sub>10</sub> est le facteur par lequel la respiration augmente lorsque la température augmente de 10 °C. Cette fonction exponentielle est souvent utilisée pour étudier l'effet de la température sur la respiration du sol. La figure 9 montre pour tous les traitements, une augmentation du flux de CO<sub>2</sub> avec une augmentation de la température. La respiration sur le traitement contrôle reste supérieure à celle des traitements tassé haut et tassé bas. Les Q<sub>10</sub> des trois traitements étaient assez proches : 4,4, 3,6 et 3,6 respectivement pour le contrôle, le tassé haut et le tassé bas. Cependant, lorsque l'évolution du flux de CO<sub>2</sub> pour les traitements contrôle et tassé haut (figure 9, a et b) étaient bien expliquée par les variations saisonnières de température ( $R^2 =$



0,94 et  $R^2 = 0,90$  respectivement), seule 71 % de la variation du flux était expliquée par la température pour la variante « bas » du traitement tassé (figure 9c).

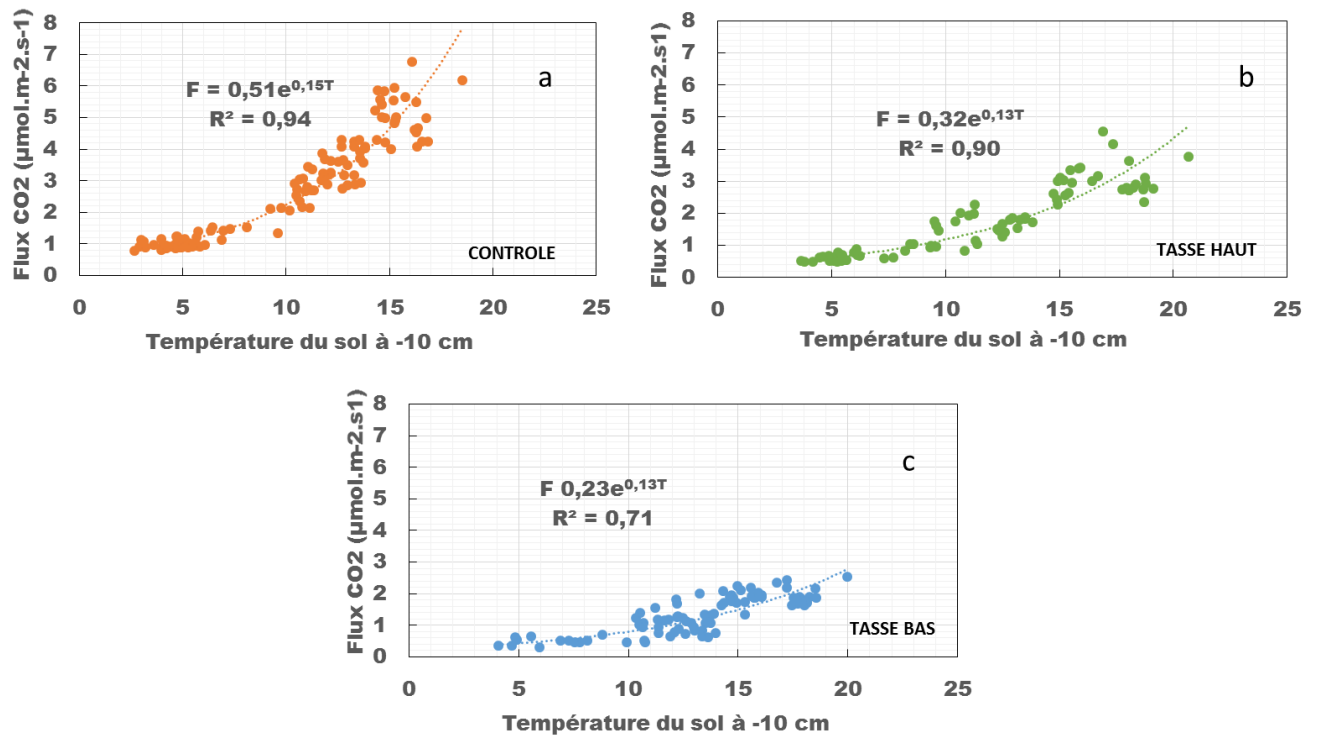


Figure 9: relation entre flux de CO<sub>2</sub> et température du sol à 10 cm de profondeur

## 2. Analyse des résidus de la variante « bas » du traitement tassé

Les résidus qui sont égaux à la valeur mesurée moins la valeur prédite par la relation entre le flux de CO<sub>2</sub> et la température du sol ne sont pas distribués de manière monotone avec la teneur en eau du sol pour le traitement tassé bas. L'optimum de respiration se situe à une humidité de 0,30. Lorsque l'humidité était faible ou forte, la respiration était faible. Les résidus négatifs traduisent une surestimation du flux par le modèle ( $Y = Ae^{BT}$ ) et les résidus positifs, une sous-estimation du flux par le modèle (figure 10).

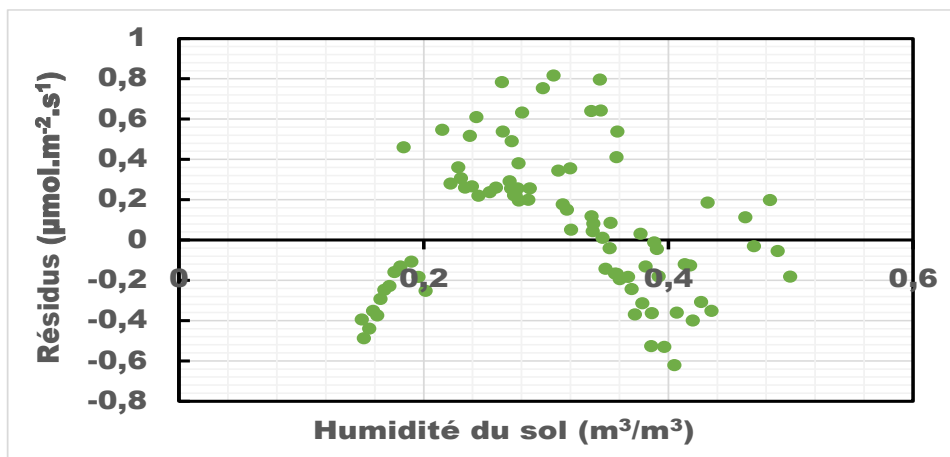


Figure 10 : résidus du flux de CO<sub>2</sub> en fonction de l'humidité du sol.

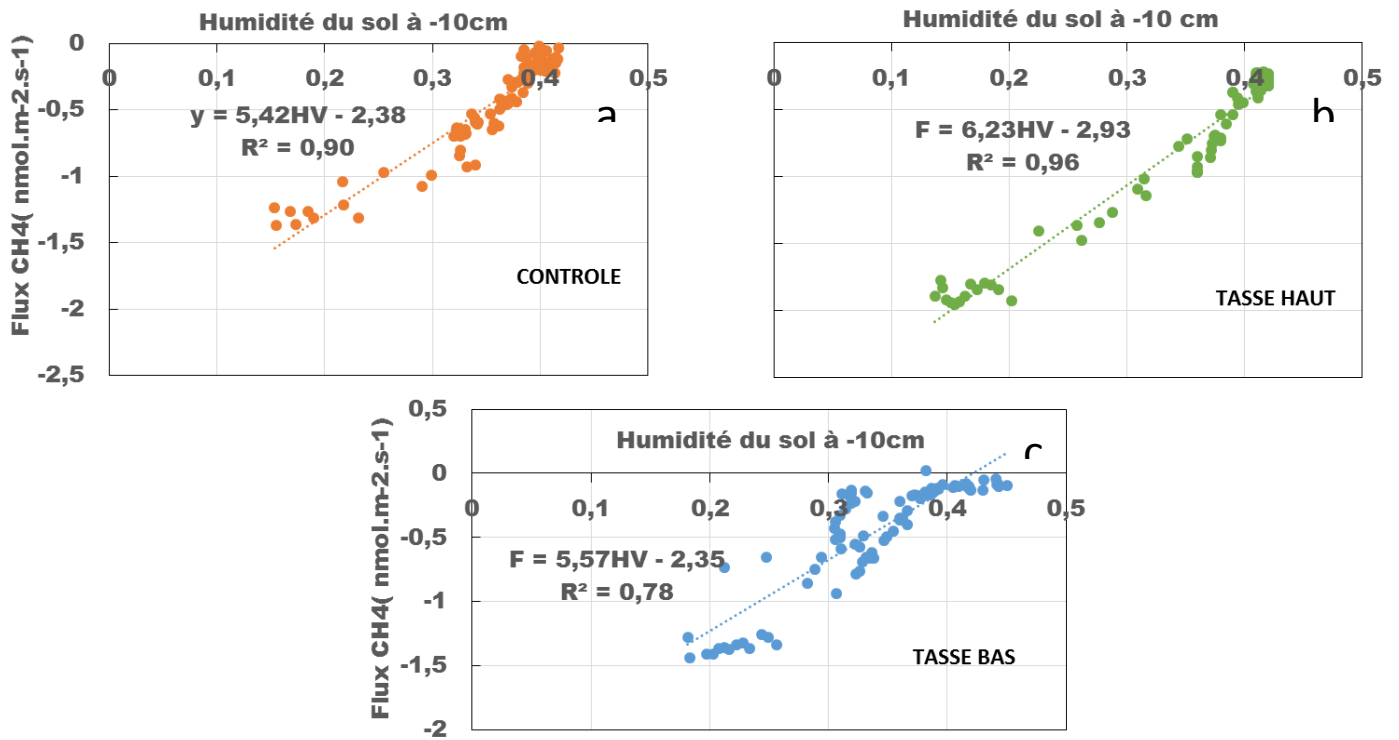


Figure 11: relation entre flux de CH<sub>4</sub> et humidité du sol à 10 cm de profondeur

#### d. Influence du traitement sur le cumul des flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>

Après avoir estimé les données manquantes, nous avons cumulé les flux journaliers pour établir un bilan des flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> sur l'ensemble de la période de mesures. Sur huit (8) mois de mesures, le flux net de CO<sub>2</sub> des traitements contrôle et des variantes « haut » et « bas » du traitement tassé, étaient respectivement de 57, 33 et de 21 mol/m<sup>2</sup> (figure 12a). Les tests statistiques révèlent des différences significatives (p-value = 0,02) entre les traitements. Le test de comparaison multiple (kruskalmc) a révélé une différence significative entre le traitement contrôle et la variante « bas » du traitement tassé. Cependant, la variante « haut » n'est pas significativement différente du contrôle et du tassé bas.

Pour le méthane, les flux nets sur huit (8) mois des traitements sont : -9,7, -13,5 et -7,2 mmol/m<sup>2</sup>, respectivement pour le contrôle, le tassé haut et le tassé bas (figure 12b). Durant cette période de mesures, la consommation était supérieure à la production pour tous les traitements. Il n'existe pas de différences significatives entre les trois traitements (p-value = 0,2).

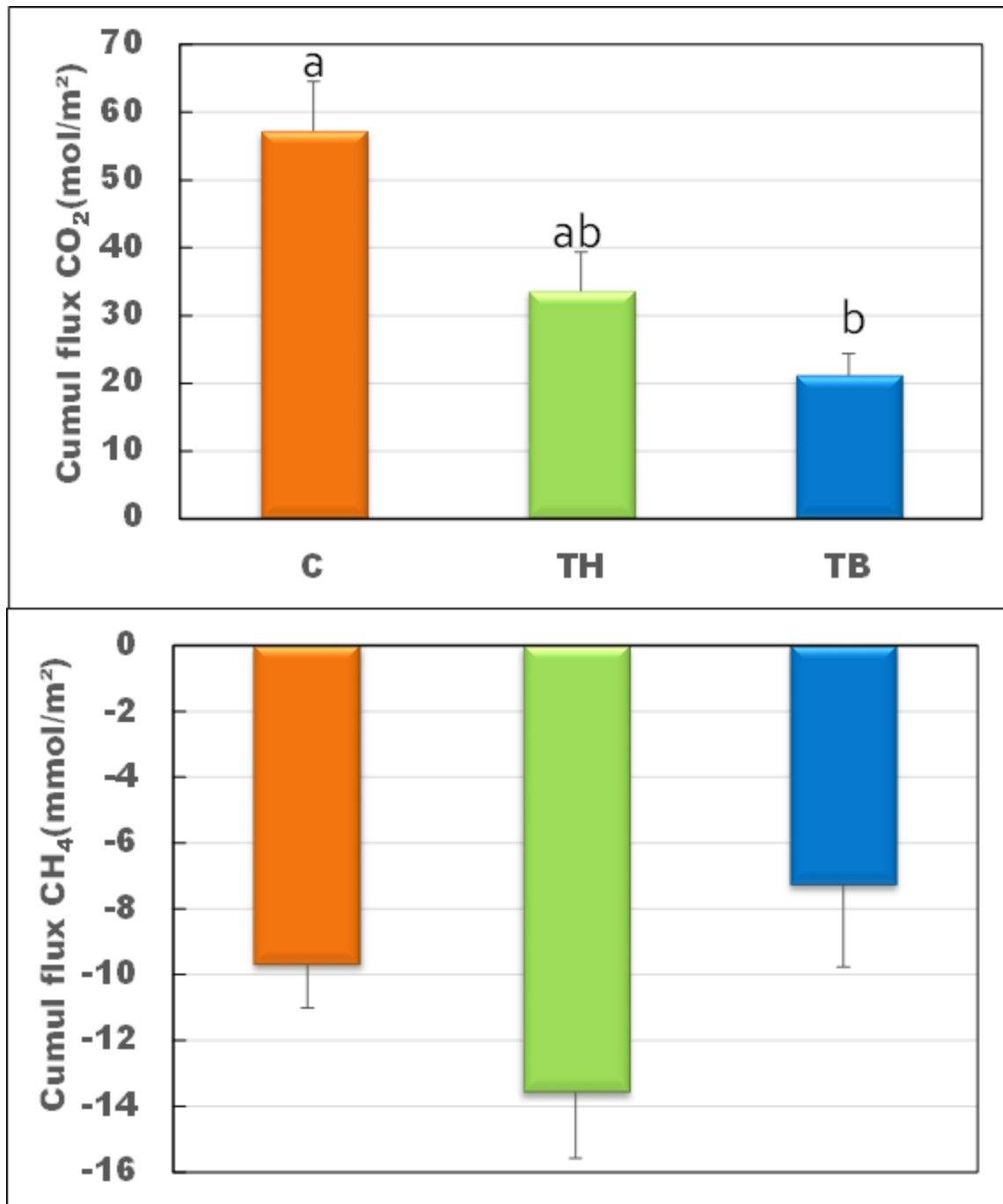
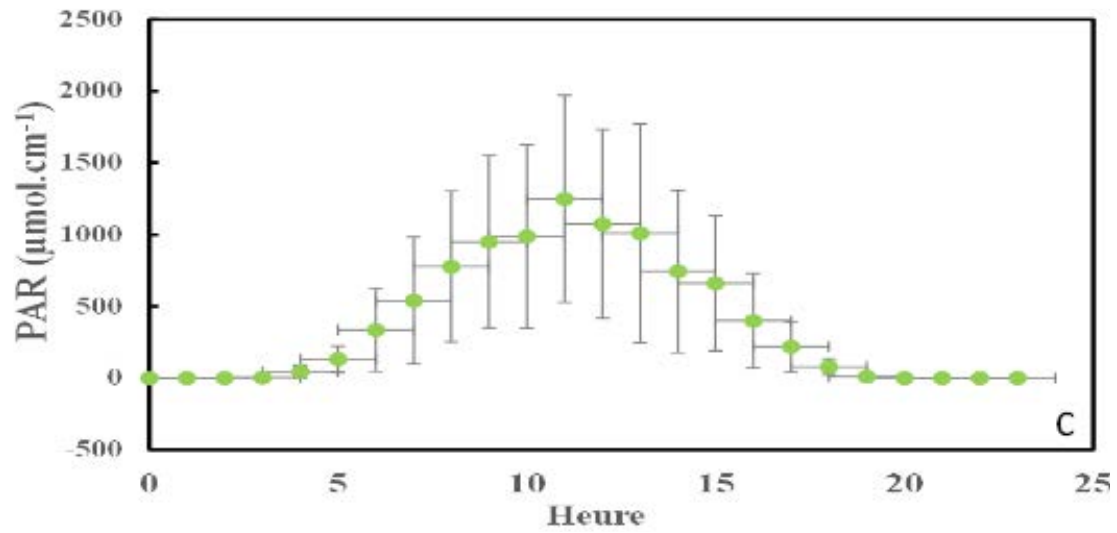
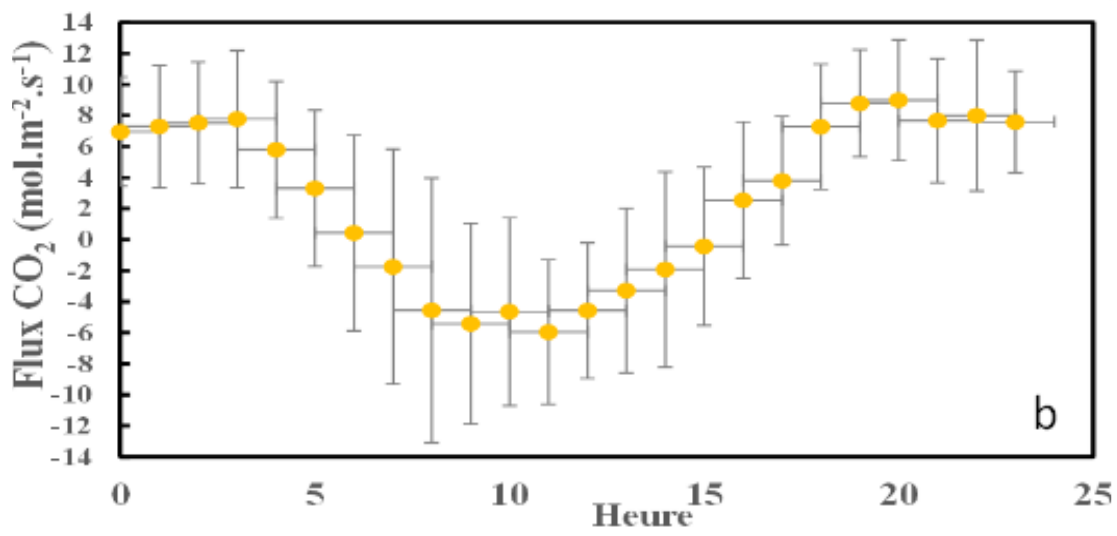
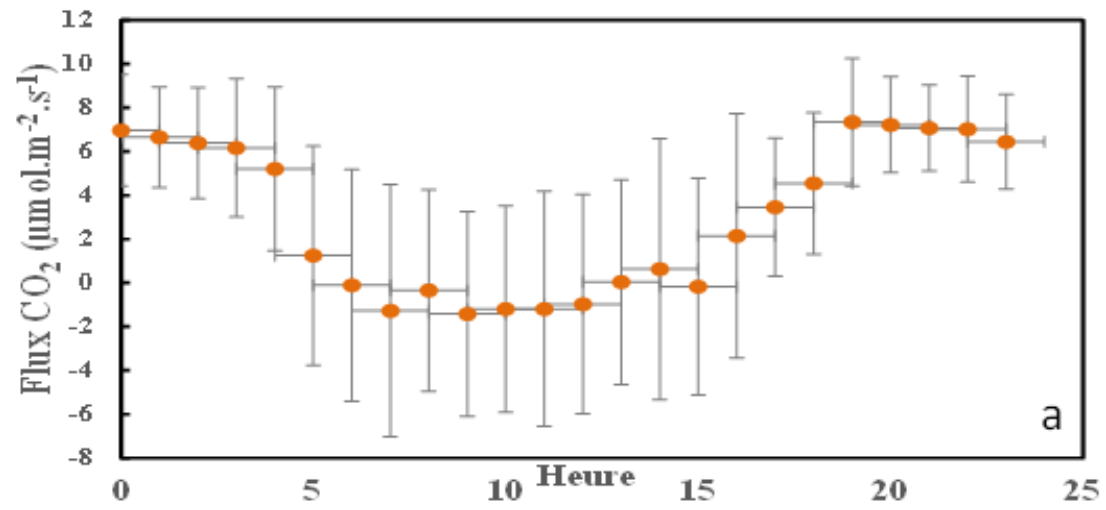


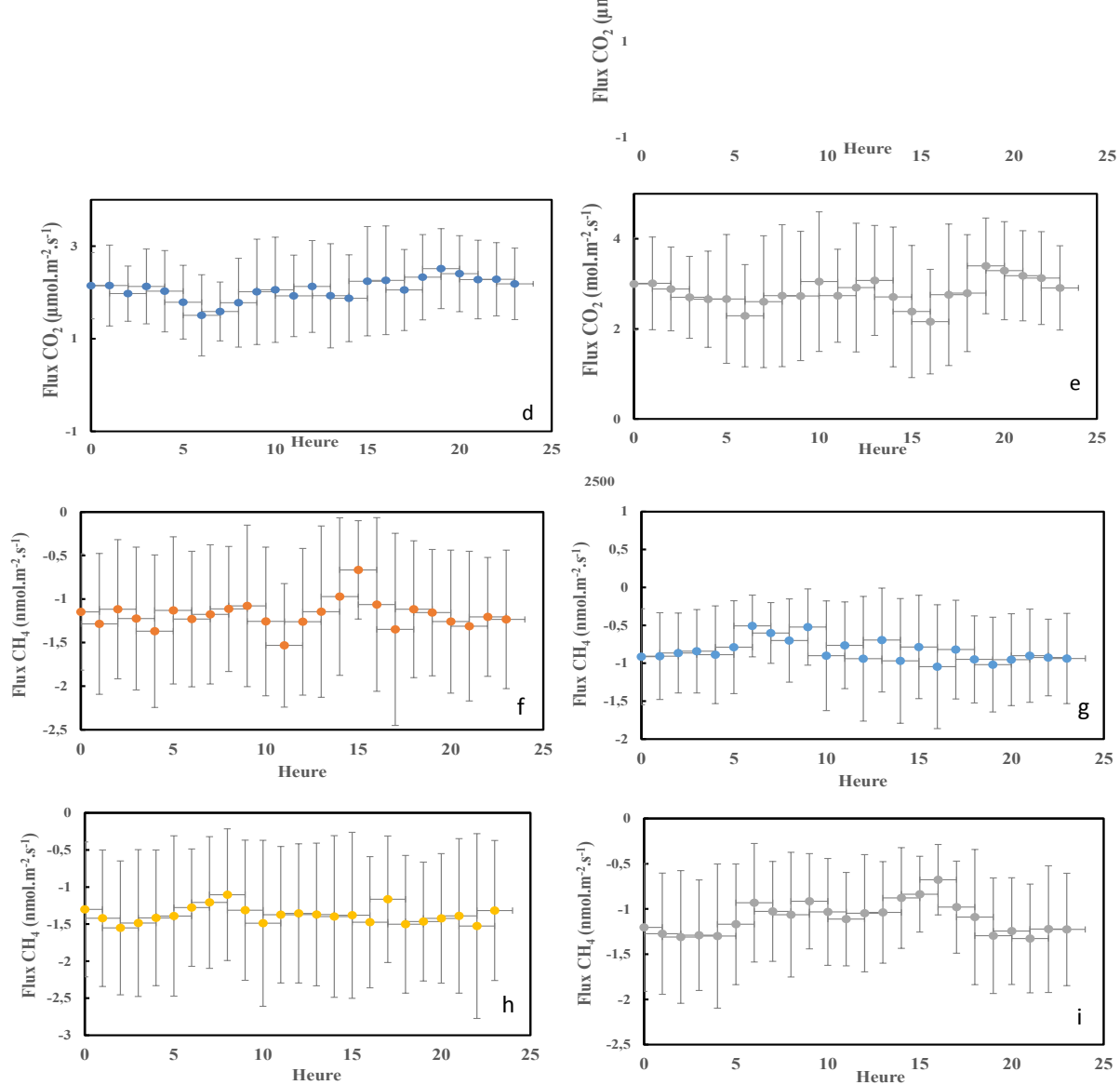
Figure 12: cumul des flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> sur 8 mois par traitement

#### e. Rôle de la végétation sur les flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>

##### 1. Variations infra-journalières du PAR et des flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>

La figure 13 montre l'évolution des flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> et du PAR en fonction des heures de la journée. Les flux de CO<sub>2</sub> du TB\_G et du TH\_J au cours de la journée évoluent de façon opposée avec le PAR (figure 13 a, b et c). Lorsque le PAR est à son maximum à 11h, l'assimilation photosynthétique du CO<sub>2</sub> est à son maximum aussi. Lorsque le PAR est nul (de 20 h à 5 h), la respiration est au maximum. Pour le TB et le TH, quel que soit la variation du PAR, le flux ne varie pas au cours de la journée (figure 13 d ; e et f). Pour le méthane, la figure 13 g, h, i et j, ne semble pas montrer une variation nette du flux au cours de la journée quel que soit le traitement considéré.





**Figure 13:** évolution du PAR et des flux de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{CH}_4$  en fonction des heures. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard sur la moyenne. Flux de  $\text{CO}_2$  avec a pour le TH\_G ; b pour TH\_J ; c PAR ; d pour TB ; e pour TH. Flux de  $\text{CH}_4$  avec f pour du TB\_G ; g pour TB ; h pour TH\_J et i pour TH.

## 2. Influence du traitement sur les flux de $\text{CO}_2$ et de $\text{CH}_4$ pour les différentes campagnes

### ❖ Moyenne journalière du flux de $\text{CO}_2$ la nuit

Nous avons utilisé les valeurs de PAR pour séparer les flux mesurés le jour et les flux mesurés la nuit.

La nuit pour toutes les campagnes, les flux étaient positifs quel que soit le traitement considéré (figure 14). Les flux du TB\_G et du TH\_J sont restés supérieurs à ceux du TB et du TH respectivement pour toutes les campagnes. La nuit, l'effet traitement était significatif ( $P < 0,001$ ). Une interaction entre date et traitement a été constatée entre TB\_G et TB et entre TH\_J et TH ( $P < 0,05$  ;  $P < 0,001$ ). Cela signifie que l'effet de la végétation sur le flux n'est pas le même pour les différentes campagnes. Cependant, les flux de  $\text{CO}_2$  pour le TB et le TH ne varient pas d'une campagne à une autre ( $P = 0,6$  et  $0,1$  respectivement).

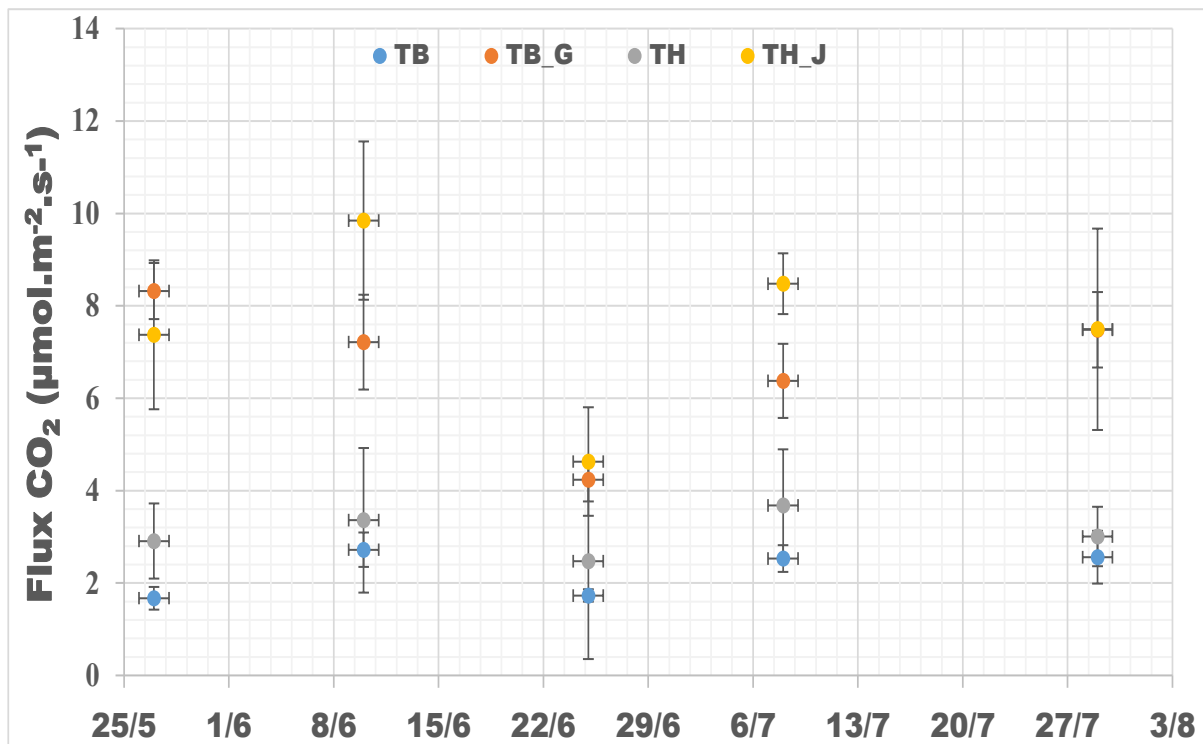


Figure 14: flux de CO<sub>2</sub> la nuit par traitement en fonction des campagnes de mesures. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard sur la moyenne

#### ❖ Moyenne journalière du flux de CO<sub>2</sub> le jour

La figure 15 montre que le jour, le flux du TB était supérieur au flux du TB\_G pour les trois premières campagnes. Le TB\_G pour les trois premières campagnes a enregistré des flux négatifs avec une assimilation du CO<sub>2</sub> plus importante lors de la troisième campagne. Une différence significative a été mise en évidence entre les deux traitements en fonction de la date ( $P < 0,01$ ). De même qu'une interaction significative entre date et traitement. Cela voudrait dire que l'effet de la végétation sur le flux de CO<sub>2</sub> n'est pas le même à toutes les dates. Les flux du TH étaient supérieurs aux flux du TH\_J pour les quatre premières campagnes. Le contraire a été observé pour la dernière campagne. Les analyses statistiques ont montré qu'il existait un effet date ( $P < 0,1$ ), un effet traitement ( $P < 0,01$ ) sur les flux de CO<sub>2</sub> et une interaction entre date et traitement ( $P < 0,05$ ). Cependant, les flux de CO<sub>2</sub> pour le TB et le TH ne varient pas d'une campagne à une autre ( $P = 0,6$  et  $0,8$  respectivement).



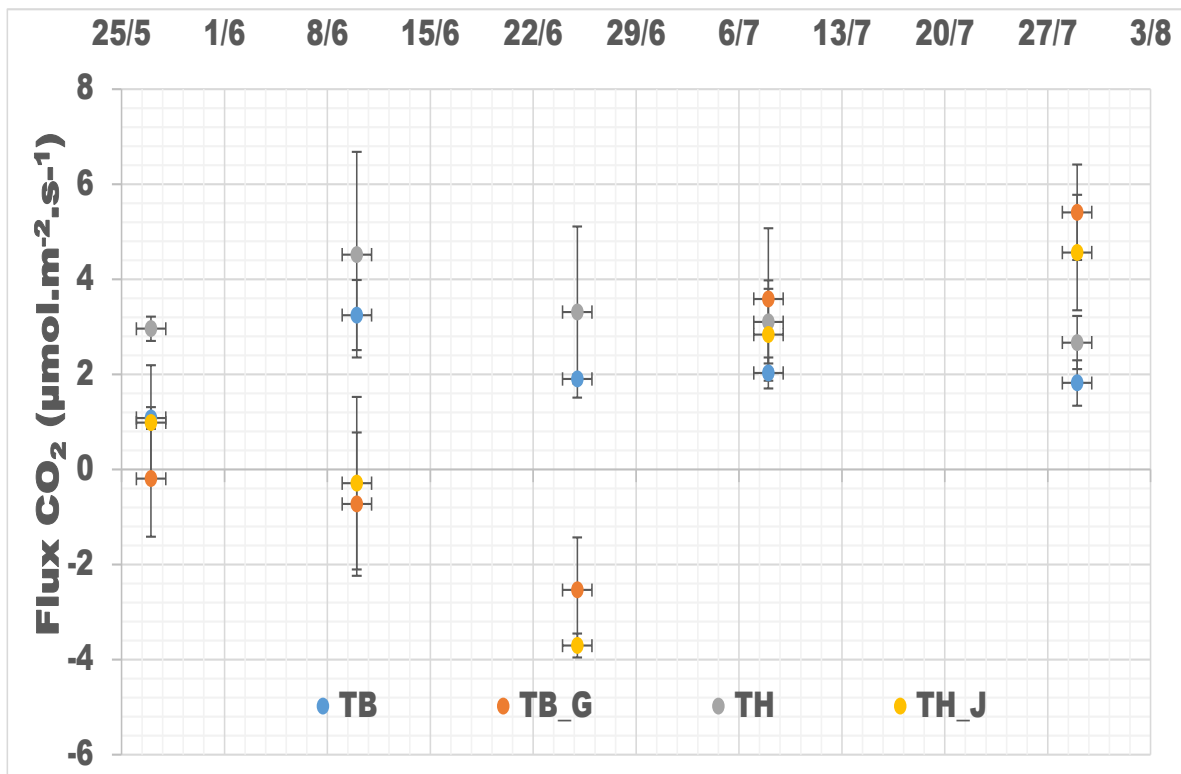


Figure 15: flux de CO<sub>2</sub> le jour par traitement en fonction des campagnes de mesures. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard sur la moyenne

❖ Moyenne journalière du flux de CO<sub>2</sub> sur 24 heures

L'effet de la végétation sur les flux de CO<sub>2</sub> a été testé. La figure 14 montre que le flux de CO<sub>2</sub> sur 24h du traitement tassé bas sans végétation (TB) était supérieur au flux du traitement tassé bas avec glycérie (TB\_G) pour la deuxième et la troisième campagne. Pour les autres campagnes, le flux du TB\_G est resté supérieur au flux du TB. Un effet date sur le flux de CO<sub>2</sub> entre les deux traitements a pu être mis en évidence ( $P < 0,01$ ). Les analyses statistiques ont révélé une interaction significative entre date et traitement ( $P < 0,01$ ).

Pour le traitement tassé haut sans végétation (TH) et le traitement tassé haut avec jonc (TH\_J), les flux semblaient être similaires lors de la première campagne. Lors de la deuxième et de la troisième campagne, le flux du TH était supérieur au flux du TH\_J. L'inverse a été observé pour les deux dernières campagnes (figure 16).

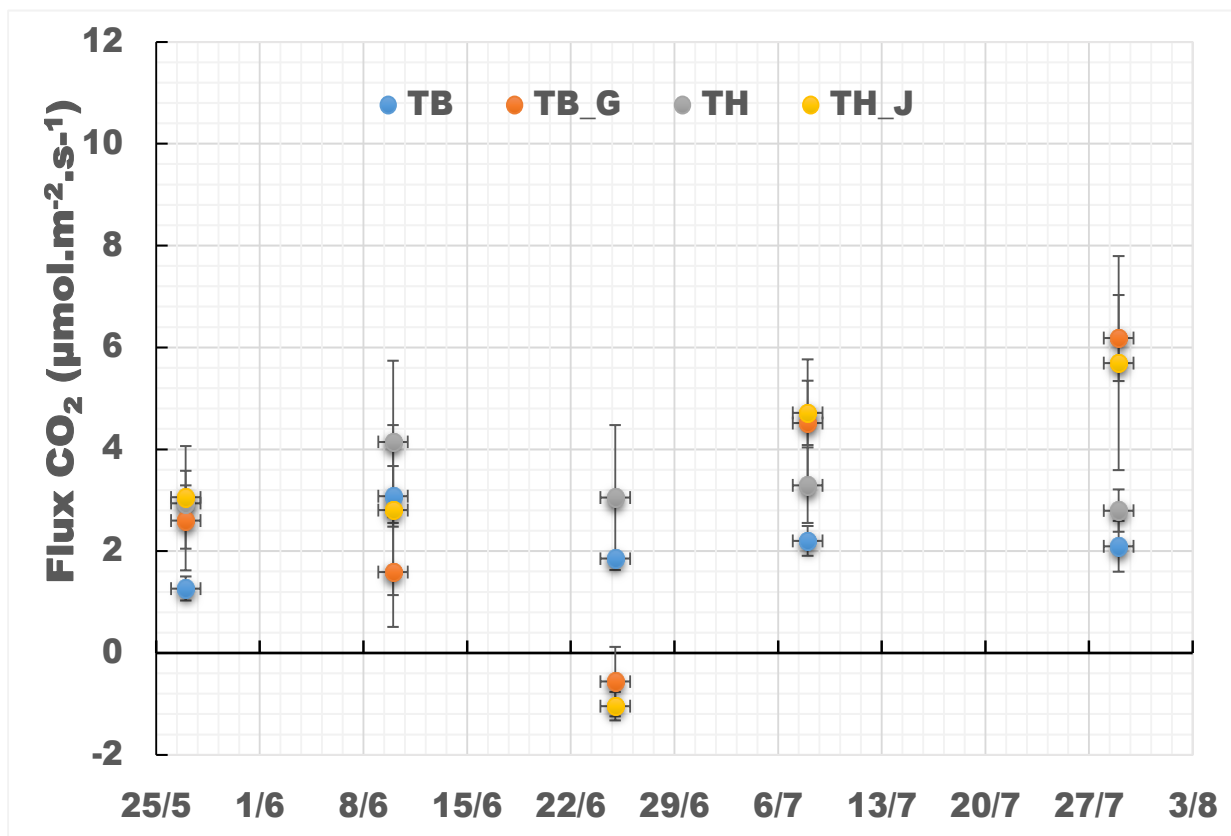


Figure 16: flux de CO<sub>2</sub> sur 24h par traitement en fonction des campagnes de mesures. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard sur la moyenne

### 3. Influence de la végétation sur les flux de CH<sub>4</sub>

#### ❖ Moyenne journalière du flux de méthane sur 24 heures

Sur une période de 24 h, la figure 17 montre que le TB\_G favorise plus une consommation de méthane que le TB pour toutes les campagnes. Un effet significatif entre le flux et le traitement a été observé ( $P < 0,01$ ). Ce flux diffère selon la date ( $P < 0,001$ ). Pour le TH et le TH\_J, juste un effet date a été observé sur le flux de méthane ( $P < 0,001$ ).

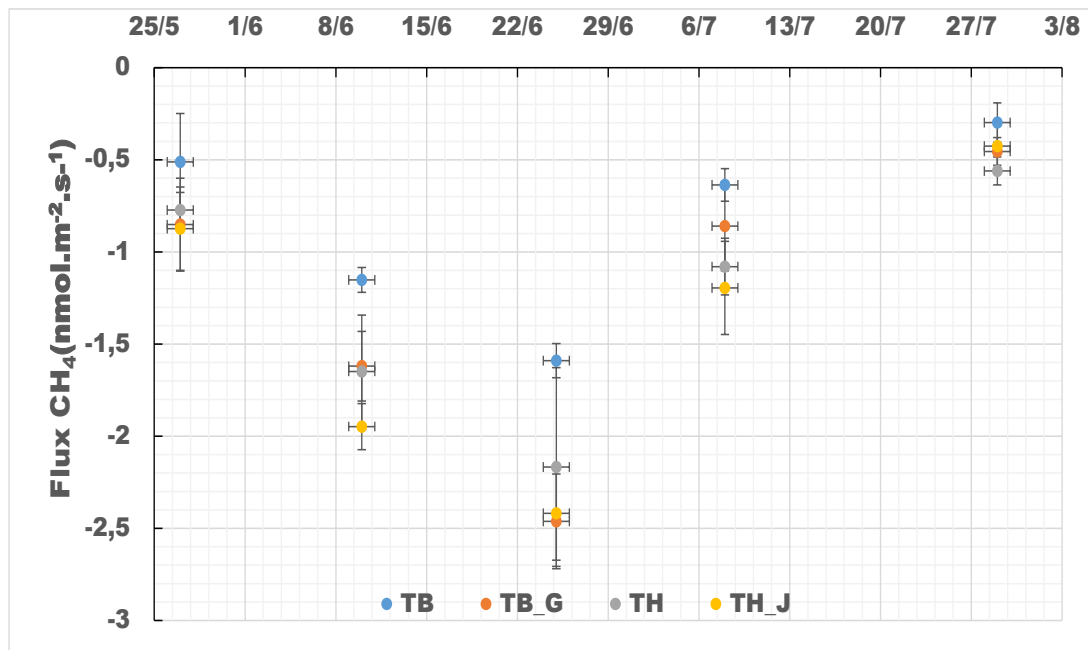


Figure 17: flux de CH<sub>4</sub> sur 24h par traitement en fonction des campagnes de mesure. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard sur la moyenne

Tableau1 : comparaison de l'humidité, de la température du sol à 10cm de profondeur et du PAR entre les cinq campagnes de mesure

DATE	CAMPAGNE1	CAMPAGNE2	CAMPAGNE3	CAMPAGNE4	CAMPAGNE5	
PAR	93a	493c	596d	179b	70a	P<0 ,001
HUMIDITE	0,23b	0,25b	0,16a	0,35c	0,35c	P<0 ,001
TEMPERATURE	17b	20d	18c	14a	18c	P<0 ,001

Le tableau fait une comparaison des moyennes des paramètres climatiques et pédoclimatiques pour les cinq campagnes de mesures. Une ANOVA à un facteur (date) puis un test de Tukey ont été réalisés. Les valeurs moyennes de PAR les plus élevées ont été observées lors de la deuxième et de la troisième campagne de mesures. Un PAR significativement différent entre les différentes campagnes de mesures sauf pour la première et la dernière campagne a été mis en évidence. L'humidité était la même entre la première et la deuxième campagne et entre la quatrième et la cinquième. Par contre la troisième campagne se distinguait des autres. Les analyses statistiques ont mis en relief une différence significative de la température entre les différentes campagnes sauf entre la troisième et la cinquième.

## IV. Discussion

### a. Flux de CO<sub>2</sub> et paramètres pédoclimatiques

La plupart des études faites sur la respiration du sol ont montré une variabilité saisonnière des flux de CO<sub>2</sub> (Epron et al, 1999, Vanhala, 2002, Mo et al, 2005, Vincent et al, 2006). Dans cette présente étude, on observe également cette variation avec des valeurs comprises entre 0,24 et 7,27 μmol/m<sup>2</sup>/s (figure 6).

Les flux moyens journaliers de CO<sub>2</sub> mesurés au printemps et en début d'été sont supérieurs aux flux moyens mesurés en hiver pour tous les traitements (figure 6). Ces mêmes périodes coïncident avec les périodes de température moyenne journalière forte et d'humidité faible (figure 8). En hiver, la respiration du sol est réduite à cause des basses températures (Davidson et al, 1998). A cette saison, l'humidité du traitement contrôle était inférieure à l'humidité des deux variantes du traitement tassé. La respiration du traitement contrôle est supérieure à la respiration des deux variantes du traitement tassé. Ceci pourrait être expliqué par le fait que tassement réduit le volume d'air du sol et entraîne d'une part une diminution de la diffusion des gaz notamment de l'oxygène qui est nécessaire à la respiration et d'autre part une augmentation de l'humidité. Une autre explication serait que la quantité de matière organique entre le traitement contrôle et les deux variantes du traitement tassé n'est peut-être pas la même de, même que la quantité de micro-organismes présente dans le sol. Le tassement change donc les conditions favorables à l'activité biologique.

Plusieurs études montrent une relation positive entre le flux de CO<sub>2</sub> et la température du sol. La figure 9 montre une augmentation de la respiration du sol avec une augmentation de la température du sol à 10 cm de profondeur. L'effet de la température sur la respiration du sol a été décrit par certains auteurs (Epron et al, 1999, Vincent et al, 2006). Ces auteurs ont utilisé une fonction exponentielle pour décrire la relation entre le flux moyen journalier de CO<sub>2</sub> et la température du sol à -10cm. Cette fonction est fréquemment utilisée pour étudier ces deux paramètres.

Le Q<sub>10</sub>, c'est-à-dire le facteur par lequel la respiration augmente lorsque la température augmente de 10 °C pour les trois traitements à 10 cm de profondeur, est proche : 4,4, 3,6 et 3,6. Ces valeurs sont comparables aux valeurs rapportées dans la littérature (Borken et al, 2002, Davidson, 1998) pour les forêts tempérées. Les valeurs instantanées attendues pour les processus physiologiques sont proches de 2. Les valeurs plus élevées obtenues à l'échelle saisonnière résultent du fait que la température agit non seulement sur l'activité microbienne et racinaire mais également sur la croissance microbienne et la croissance racinaire qui contribue également à une augmentation de la respiration. C'est ce qui explique sans doute une respiration plus importante lorsque la température augmente, c'est-à-dire en fin de printemps et en début d'été, et qui se traduit par des Q<sub>10</sub> élevés (Epron et al 2001).

Pour la variante « bas » du traitement tassé, la corrélation entre le flux moyen journalier et la température montre que la température à 10 cm seule n'explique pas totalement l'évolution du flux. Les résidus du flux de CO<sub>2</sub> en fonction de l'humidité du sol (figure 10) montrent une inhibition du flux lors les humidités sont fortes ou faibles. L'humidité faible peut inhiber l'activité des micro-organismes ce qui réduit les concentrations de CO<sub>2</sub> dans le sol. Une forte humidité du sol réduit la porosité et par conséquent le transfert de gaz entre le sol et l'atmosphère. L'analyse des résidus nous a révélé que parfois notre modèle surestime ou sous-estime le flux. Il serait donc mieux de combiner dans un modèle, l'humidité et la température pour estimer les flux.

Dans le cadre de cette étude, les variations saisonnières des paramètres pédoclimatiques expliquent donc en grande partie les variations saisonnières des flux de CO<sub>2</sub> comme dans la plupart des études (Davidson et al, 1998, Epron et al, 1999).

#### **b. Flux de méthane et paramètres pédoclimatiques**

Une variation du flux de méthane au cours du temps a été observée (figure 6). La consommation de méthane (flux net négatif) la plus importante pour tous les traitements a été observée au printemps et en été. Des études ont également mis en évidence une consommation de méthane plus élevée en été qu'en hiver, pouvant s'expliquer par des

variations de température (Guckland et al 2009) mais également du contenu en eau du sol (Borken et al, 2006). L'augmentation de la température favorise l'activité microbienne alors qu'une humidité modérée du sol à cette saison, favorise la diffusion du méthane atmosphérique vers le sol. Donc les deux concourent à une consommation plus élevée. La consommation est faible en hiver (figure 7) du fait que, les basses températures limitent l'activité microbienne et peuvent geler la surface du sol, créant ainsi une barrière à la diffusion du méthane atmosphérique, ce qui réduit la capacité d'assimilation du méthane par le sol. Les humidités fortes, proches de la saturation limitent aussi la diffusion du méthane atmosphérique vers le sol. De même que l'humidité forte favorise une production plus importante.

La relation entre le flux moyen journalier de méthane et le contenu en eau du sol à 10 cm de profondeur (figure 10) montre une corrélation négative entre l'humidité du sol et la vitesse de consommation du méthane, c'est-à-dire une diminution du contenu en eau du sol se traduit par une augmentation de la consommation de méthane. Cette influence de l'humidité sur la variation du flux de méthane peut s'expliquer par le fait que l'humidité joue sur la diffusion du méthane atmosphérique vers le sol, ce qui limite l'activité des bactéries méthanotrophes, ainsi que sur celle de l'oxygène qui va favoriser l'apparition de populations de bactéries méthanogènes. La présence d'oxygène dans la rhizosphère inhibe les méthanogènes et permet la méthanotrophie. Pour le traitement tassé bas, l'absorption du méthane est contrôlée par l'humidité avec des flux presque constants dans des conditions d'humidité du sol très basse ou très élevée. Les conditions d'humidité élevée créent probablement une barrière physique à la diffusion du méthane ou que l'humidité excessive a réduit la porosité et a ainsi empêché l'oxydation du méthane. Au contraire lorsque l'humidité est faible, deux hypothèses sont possibles : soit la population de méthanotrophes est faible ou que l'humidité crée un stress pour les plantes qui sécrètent de l'éthylène qui est un agent inhibiteur de l'oxydation du méthane (Zhou et al, 2014). Ici, la prise en compte de la température n'était pas pertinente car elle n'améliore en rien l'interprétation de la variable à expliquer.

### c. Effet traitement sur le bilan de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> sur huit (8) mois de mesures

La comparaison du flux de CO<sub>2</sub> entre les trois traitements montre une différence significative ( $p = 0,02$ ). Le flux de CO<sub>2</sub> cumulé sur huit (8) mois du traitement contrôle est significativement différent du flux de la variante « bas » du traitement tassé (figure 12). Goutal (2012), dans son étude a aussi montré une réduction du flux de CO<sub>2</sub> sur un sol tassé.

Cela indique qu'un effet net du tassement sur le flux de CO<sub>2</sub> est toujours présent sur le site. Ce qui est en accord avec les résultats de Goutal et Al (2012), qui montraient qu'il y n'avait pas sur le site d'Azerailles une remédiation du tassement au bout de 4 ans. Nos résultats montrent également qu'au bout de 7 ans, il n'y a toujours pas de remédiation. La différence entre traitement contrôle et tassé peut être expliquée par le fait que la réduction de la porosité induit par le tassement est souvent associée à une rétention d'eau plus élevée et un échange de gaz restreint (Frey et Al 2009). Aussi, un excès d'eau dans le sol peut réduire la croissance et le fonctionnement des racines, principalement par une diminution de la disponibilité en oxygène (Werner et al, 2010). Moins d'activité racinaire entraîne moins d'exsudats donc moins de carbone disponible pour les micro-organismes du sol. Il faut également noter que la végétation n'est pas la même sur les deux traitements. En effet, un changement de végétation a été observé sur le site après tassement (Ranger, 2012). On retrouve aujourd'hui plus d'espèces ligneuses sur le traitement contrôle que sur les deux variantes du traitement tassé. Le cortège d'espèces herbacées n'est également pas le même dans les deux traitements.

Le flux cumulé de méthane sur huit mois montre pour tous les traitements une consommation de méthane supérieure à la production (figure 12). Cela indique que pendant la période de mesures, l'activité des méthanotrophes dans les horizons de surface a été supérieure à l'activité des méthanogènes dans les horizons plus profonds éventuellement en situation anoxique à certaines saisons. Cependant, la quantité nette de méthane consommée n'est pas significativement différente pour les trois traitements ( $P = 0,2$ ). Cela veut dire que malgré les différences d'humidité du sol, la quantité de méthane consommée sur une durée de huit (8) mois sur les deux traitements, reste identique. Par conséquent, l'impact du tassement sur la diffusion du méthane n'est pas visible.

#### d. Effet de la végétation sur les flux de CO<sub>2</sub>

La nuit, les flux sont positifs (figure 14). Le flux de CO<sub>2</sub> sur les deux traitements sans végétation c'est-à-dire le TB et le TH, ne varie pas d'une campagne à une autre (figure 14). L'humidité, la température, la quantité et la qualité de matière organique ainsi que l'activité des micro-organismes du sol n'ont pas eu une influence sur le flux de CO<sub>2</sub> pendant la nuit. Par contre pour les traitements avec végétation (TB\_G et TH\_J), le flux varie en fonction des campagnes. Donc les facteurs cités dessus ont certainement une influence sur leur flux.

La comparaison des flux du TB et du TH avec ceux du TB\_G et du TH\_J respectivement montre que les flux des traitements avec végétation sont statistiquement supérieurs aux flux des traitements sans végétation (figure 14). Cela montre que la présence de végétation augmente le flux de CO<sub>2</sub> la nuit. Ce résultat peut être expliqué par le fait que la nuit, le flux de chacun des deux traitements sans végétation (TB et TH) est la somme de la respiration racinaire et microbienne alors que pour les traitements avec végétation (TB\_G et TH\_J), le flux mesuré est la résultante de la respiration microbienne racinaire, mais également des parties aériennes de la glycérie et du jonc pour chaque traitement considéré. L'effet du jonc et de la glycérie sur le flux de CO<sub>2</sub> n'est pas le même pour toutes les campagnes. Pour les deux espèces, les flux de CO<sub>2</sub> les flux faibles ont été observés lors de la troisième campagne bien qu'on ait une température de 18 ° C. Cette campagne, par rapport aux autres, a le contenu en eau le plus faible. L'humidité a une influence sur la croissance et le fonctionnement des racines (Werner et al, 2010). On peut supposer dans ce cas que l'humidité faible entraîne un stress pour nos deux espèces qui vont réduire leur respiration mitochondriale.

Le jour, les flux des traitements sans végétation ne sont pas significativement différents entre les campagnes (figure 15). Donc aucun paramètre n'influe sur les flux de ces deux traitements. Pour les traitements avec végétation, on a une variation du flux entre les campagnes. Pour la deuxième et la troisième campagne, le flux journalier n'est négatif qu'en présence de végétation. Ce qui est en accord avec ce que montre la figure 13, c'est-à-dire une variation du flux de CO<sub>2</sub> au cours de la journée qui s'explique par le PAR. En effet, le tableau 1 nous montre que ces deux campagnes sont caractérisées par un PAR fort comparé aux autres. Pour ces deux campagnes, l'assimilation photosynthétique du CO<sub>2</sub> par la végétation est supérieure à la respiration microbienne, racinaire et des parties aériennes. Les taux élevés de photosynthèse durant les périodes éclairées (ici le jour) s'accompagnent d'une production d'exsudats racinaires (Kuzyakov, 2006). Selon Kuzyakov et Gavrichkova (2010), il existe un lien entre la photosynthèse et les processus se déroulant dans la rhizosphère. En effet, la photosynthèse fournit des photosynthétats produits récemment aux racines et aux micro-organismes dans la rhizosphère.



Le jour, un effet date a été mis en évidence sur les flux de CO<sub>2</sub> (figure 15). La première et la cinquième campagne ont les PAR les plus faibles (tableau 1). Ces derniers ne sont pas significativement différents, pourtant les flux mesurés lors de ces deux campagnes pour le TB\_G et le TH\_J sont statistiquement différents (figure 15). Cela veut dire que dans ce cas, c'est un autre paramètre autre que le PAR qui a influé sur le flux. En effet, les températures mesurées lors de ces deux campagnes sont significativement différentes. La température la plus forte a été mesurée pour la cinquième campagne ce qui explique le flux plus fort pour cette campagne, étant donné que nous venons de montrer que la température est positivement corrélée au flux de CO<sub>2</sub>. La température stimule l'activité des micro-organismes (Luo et Zhou, 2006). Par conséquent, elle augmente la vitesse de décomposition de la litière qui contribue à la production de CO<sub>2</sub> à la surface du sol et dans le sol.

Sur une durée de 24 h, le flux de CO<sub>2</sub> de tous les traitements est positif pour toutes les campagnes sauf la campagne 3 où on a enregistré des flux négatifs pour les deux traitements avec végétation (figure 16). Ce résultat peut être expliqué par le PAR qui est élevé mais également par l'humidité faible à cette période qui fait que la respiration est réduite. Les flux de CO<sub>2</sub> sont différents d'une campagne à une autre. Ceci peut se justifier par une variation du flux de CO<sub>2</sub> au cours de la journée conditionnée par le rayonnement pour les traitements avec végétation.

#### e. Effet de la végétation sur les flux de CH<sub>4</sub>

Des études ont montrés que les plantes vasculaires avaient la capacité de transporter le méthane de la rhizosphère vers l'atmosphère (Henneberg et al 2012, Bhullar et al 2006). Dans notre étude, sur une durée de 24 h, la glycérie a une tendance à favoriser une consommation de méthane par le sol. En effet, le flux net négatif (consommation supérieure à la production) du TB\_G était supérieur au flux net du TB pour toutes les campagnes avec des différences significatives. On pourrait penser que la végétation sous l'effet d'une exsudation racinaire favorise l'activité des méthanotrophes. Le méthane produit dans le sol résulte de la dégradation de la matière organique par les bactéries méthanogènes. Cependant, la décomposition de la matière organique peut être influencée par les racines. En effet, ces dernières peuvent stimuler ou inhiber sa décomposition. Cet effet inhibiteur est dû à une compétition au sein de la rhizosphère entre les racines et la microflore par rapport au substrat (Kuzyakov et Cheng, 2001).

On peut également supposer que la glycérie favorise une diffusion du méthane de l'atmosphère vers le sol et donc son oxydation par les méthanotrophes. Les différences de flux selon la date peuvent être expliquées par une humidité forte lors de la campagne 5 par exemple où on a la consommation la plus faible. Selon Zhou et Al, 2014, un fort contenu en eau du sol entraîne une diminution de la porosité et une inhibition de l'oxydation (consommation) du méthane. Au vu de nos résultats, la végétation qui est connue comme étant un facteur favorisant les émissions de méthane, dans notre cas favorise sa consommation. Pour le TH et le TH\_J, il n'y a pas de différence significative entre les deux traitements sur le flux de méthane. Ici, l'influence du jonc sur la consommation de méthane n'est pas mise en évidence.

Nos résultats montrent que les deux espèces se distinguent de par leur influence sur les flux de méthane pour un sol tassé. L'effet de la végétation sur le flux de méthane dépendrait donc de l'espèce.

Ici la séparation du flux de méthane jour et nuit n'a pas été faite car elle n'apporte aucune information supplémentaire sur l'effet de la végétation sur le flux de méthane, vu que le flux de méthane ne semble pas varié au cours de la journée.

## V. Conclusion-perspectives

L'objectif premier de ce travail était de montrer que la réduction de la porosité du sol due au tassement affecte les flux nets de méthane et de CO<sub>2</sub>. Les résultats obtenus montrent une variation saisonnière des flux de CO<sub>2</sub> et de méthane qui s'explique par une variation saisonnière des conditions pédoclimatiques. Une augmentation de la température s'accompagne d'une augmentation des flux de CO<sub>2</sub>. La faible respiration de la variante « bas » du traitement tassé par rapport au traitement contrôle montre bien l'effet du tassement sur le flux de CO<sub>2</sub>. Après huit (8) mois de mesures, l'effet du tassement sur le flux de CO<sub>2</sub> a pu être mis en évidence. Par contre son effet sur le flux de méthane n'est pas visible.

Le second objectif était de vérifier le rôle de la végétation herbacée accompagnatrice sur les flux nets du traitement tassé. Les résultats indiquent que la nuit, l'augmentation du flux de CO<sub>2</sub> grâce à la contribution de la respiration de la glycérie et du jonc, montre un effet de la végétation sur le flux de CO<sub>2</sub>. Sur une durée de 24 h et pendant le jour, l'influence du jonc et de la glycérie sur le flux de CO<sub>2</sub> s'explique d'une part par le PAR et d'autre part par la température ou l'humidité. La glycérie a tendance à favoriser la consommation de méthane par le sol. Par contre l'effet du jonc n'a pas été mis en évidence. Donc les effets des deux espèces sur le flux du méthane ne sont pas identiques.

Les travaux futurs devraient viser à séparer les flux de consommation et de production ; approfondir la compréhension de la façon dont les deux espèces herbacées influent sur les flux de méthane, en se basant par exemple sur les traits fonctionnels des deux espèces tels que la distribution des racines et la production de biomasse ; et quantifier la contribution des deux espèces sur le flux de CO<sub>2</sub> du sol mesuré à la surface du sol.

## VI. Bibliographie

- Banker, B.C., Kludze, H.K., Alford, D.P., DeLaune, R.D., Lindau, C.W., 1995a. Methane sources and sinks in paddy rice soils: relationship to emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 53, 243–251. doi:10.1016/0167-8809(94)00578-3
- Barik, K., Aksakal, E.L., Islam, K.R., Sari, S., Angin, I., 2014. Spatial variability in soil compaction properties associated with field traffic operations. *CATENA* 120, 122–133. doi:10.1016/j.catena.2014.04.013
- Bhullar, G.S., Irvani, M., Edwards, P.J., Venterink, H.O., 2013. Methane transport and emissions from soil as affected by water table and vascular plants. *BMC Ecology* 13, 32. doi:10.1186/1472-6785-13-32
- Borken, W., Davidson, E.A., Savage, K., Sundquist, E.T., Steudler, P., 2006. Effect of summer throughfall exclusion, summer drought, and winter snow cover on methane fluxes in a temperate forest soil. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 1388–1395. doi:10.1016/j.soilbio.2005.10.011
- Borken, W., Xu, Y.-J., Davidson, E.A., Beese, F., 2002. Site and temporal variation of soil respiration in European beech, Norway spruce, and Scots pine forests. *Global Change Biology* 8, 1205–1216. doi:10.1046/j.1365-2486.2002.00547.
- D. Epron, V. Le Dantec, E. Dufrene and A. Granier. 2001. Seasonal dynamics of soil carbon dioxide efflux and simulated rhizosphere respiration in a beech forest. *Tree Physiology* 21, 145-152.

- D. Epron, L. Farque, E. Lucot, P.M. Badot. 1999. Soil CO<sub>2</sub> efflux in a beech forest : dependence on soil temperature and soil water content. *Ann. For. Sci.* 56, 221-226.
- Davidson E.A., Beck E., Boone R.D., Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest, *Glob. Change Biol.* 4 (1998) 217–227.
- Frey, B., Kremer, J., Rüdts, A., Sciacca, S., Matthies, D., Lüscher, P., 2009. Compaction of forest soils with heavy logging machinery affects soil bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology* 45, 312–320. doi:10.1016/j.ejsobi.2009.05.006
- GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Publié sous la direction de Pachauri R.K. et Reisinger A. *GIEC, Genève, Suisse*, 103 pages.
- Guckland A., Flessa H. & Prenzel J., 2009. Controls of temporal and spatial variability of methane uptake in soils of a temperate deciduous forest with different abundance of European beech (*Fagus sylvatica* L.). *Soil Biology & Biochemistry*. **41**: 1659–1667.
- Goutal N., Parent F., Bonnaud P., Demaison J., Nourrisson G & Epron D., 2012. Soil CO<sub>2</sub> concentration and efflux as affected by heavy traffic in forest in northeast France. *European Journal of soil science*, April 2012, 63, 261-271.
- Goutal, N. (2012). Modifications et restauration de propriétés physiques et chimiques de deux sols forestiers soumis au passage d'un engin d'exploitation. AgroParisTech.
- Janssens I.A., Kowalski A.S., Longdoz B. & Ceulemans R., 2000. Assessing forest soil CO<sub>2</sub> efflux an in situ comparaison of four techniques. *Tree Physiology*; **20**: 23-32.
- Kruse C. W., Moldrup P & Iversen N., 1996. Modeling and reaction in soils: Atmospheric methane diffusion and consumption in a forest soil. *Soil science* .161(6), 355-365.
- Kuzyakov, Y., Gavrichkova, O., 2010. REVIEW: Time lag between photosynthesis and carbon dioxide efflux from soil: a review of mechanisms and controls. *Global Change Biology* 16, 3386–3406. doi:10.1111/j.1365-2486.2010.02179.
- Kuzyakov, Y., 2006. Sources of CO<sub>2</sub> efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 425–448. doi:10.1016/j.soilbio.2005.08.020
- Kuzyakov, Y., Cheng, W., 2001. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry* 33, 1915–1925. doi:10.1016/S0038-0717(01)00117-1
- Le Mer J. & Roger P., 2001. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *Eur. J. Soil Biol.* 37: 25-50.
- Le Mer J. & Roger P., 2003. Les sols : sources et puits de méthane : Etude et gestion des sols, volume 10, 4, 2003-331-345.
- Luo, Y., and Zhou, X. (2006a). Chapter 3 - Processes of CO<sub>2</sub> production in soil. In *Soil Respiration and the Environment*, Y. Luo, and X. Zhou, eds. (Burlington: Academic Press), pp. 35–59.
- Luo, Y., and Zhou, X. (2006b). Chapter 5 - Controlling factors. In *Soil Respiration and the Environment*, Y. Luo, and X. Zhou, eds. (Burlington: Academic Press), pp. 79–105.

- Megonigal, J.P., Guenther, A.B., 2008. Methane emissions from upland forest soils and vegetation. *Tree Physiol* 28, 491–498. doi:10.1093/treephys/28.4.491
- Mo, W., Lee, M.-S., Uchida, M., Inatomi, M., Saigusa, N., Mariko, S., and Koizumi, H. (2005). Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology* 134, 81–94.
- Ndiaye Fatou Kiné., 2012.Effet du tassement sur le coefficient de diffusion des gaz dans le sol. Mémoire de Master I spécialité FGE Université de Lorraine-Nnacy, 14p
- Prezitzer K.S., Zak D.R., Maziasz J., DeForest J., Curtis P.S., Lussenhop J., 2000. Interactive effects of atmospheric CO<sub>2</sub> and soil-N availability on fine roots of *Populus tremuloides*. *Ecol. Appl.* 10: 18-33.
- Ranger J., Goutal N & Bonnaud P., 2012.Effet de la mécanisation des travaux sylvicoles sur la qualité des sols : dynamique de la restauration naturelle ou assistée de leurs propriétés physiques. Nancy, 66p.
- Renouf Laurent. La conciliation de l'exploitation forestière et du respect des sols : un exemple concret à Picardie. Mémoire de fin d'études. Formation des ingénieurs forestiers de l'ENGREF Agro Paris Tech. 2009, 91p.
- Richard, G., Boizard, H., Roger-Estrade, J., Boiffin, J., Guérif, J., 1999. Field study of soil compaction due to traffic in northern France: pore space and morphological analysis of the compacted zones. *Soil and Tillage Research* 51, 151–160. doi:10.1016/S0167-1987(99)00058-6
- Richard G., 2012. Evaluation et maîtrise du risque de tassement de la parcelle au territoire national. *Innovation agronomique* 21,45-57
- Roger P., Le Mer J & Joulian C., 1999. L'émission de méthane par les sols : mécanisme, intensité et régulation. Université de Provence AIX-Marseille 1 E.S.G.B.M.A. Laboratoire de Microbiologie IRD Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM).
- Soil Carbon Dynamics An Integrated Methodology | Natural resource management, agriculture, horticulture and forestry | Cambridge University Press [WWW Document], n.d. URL <http://www.cambridge.org/us/academic/subjects/life-sciences/natural-resource-management-agriculture-horticulture-and/soil-carbon-dynamics-integrated-methodology> (accessed 8.23.14).
- Vanhala, P., 2002. Seasonal variation in the soil respiration rate in coniferous forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 34, 1375–1379. doi:10.1016/S0038-0717(02)00061-5
- Vincent, G., Shahriari, A.R., Lucot, E., Badot, P.-M., Epron, D., 2006. Spatial and seasonal variations in soil respiration in a temperate deciduous forest with fluctuating water table. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 2527–2535. doi:10.1016/j.soilbio.2006.03.009
- Zhou, X., Dong, H., Chen, C., Smaill, S. J. & Clinton, P. W., 2014. Ethylene rather than dissolved organic carbon controls methane uptake in upland soils. *Glob Change Biol* 20, 2379–2380

## Résumé

Les engins utilisés lors des opérations sylvicoles peuvent tasser le sol. Ce tassement va jouer un rôle non négligeable sur le transport des fluides (gaz, et eau). Dans le sol, les bactéries méthanogènes en condition anaérobie dégradent la matière organique et produisent du méthane alors que les bactéries méthanotrophes oxydent le méthane en condition aérobie. Le flux net de méthane d'un sol dépend donc de l'équilibre entre ces deux processus. La production de CO<sub>2</sub> quant à elle dépend de la respiration des organismes vivants du sol (racines et microorganismes) qui consomment le dioxygène et produisent du CO<sub>2</sub>. Dans cette étude, nous nous intéressons aux variations saisonnières des flux nets de deux gaz à effet de serre (CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>) dans un sol forestier sensible au tassement où nous distinguons deux types de traitements : une partie tassée et une partie non tassée (contrôle). Une attention particulière a été apportée sur le rôle de la végétation herbacée accompagnatrice du site sur les flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>. L'objectif global est de quantifier les variations temporelles de flux de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> et d'en rechercher les déterminants en s'appuyant sur les relations entre ces flux et les paramètres climatiques et édaphiques. Les résultats montrent une variation saisonnière des flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> pouvant s'expliquer par une variation saisonnière des paramètres pédoclimatiques. Cependant, seule la glycérie a une influence significative sur le flux de CH<sub>4</sub>.

**Mots clés:** flux, saisonnier, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, végétation, tassement, sol forestier

## Abstract

Heavy traffic used in forest operations increase the risk to compact soil. This compaction will affect transport of fluids (gas and water). In soil, methanogenic bacteria under anaerobic conditions degrade organic matter and produce methane while methanotrophic bacteria oxidize methane under aerobic conditions. Net methane flux depends on the balance between these two processes. The production of CO<sub>2</sub> in turn depends on the respiration of living organisms within soil (roots and microorganisms), which consume oxygen and produce CO<sub>2</sub>. In this study, we focus on seasonal variations in net fluxes of two greenhouse gases (CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>) in a forest soil sensitive to compaction where we distinguish two types of treatment: a compacted treatment and a non-compacted treatment (control). Particular attention has been made to determine the role of herbaceous species on the site on flux of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>. The overall objective is to quantify the temporal variations of CH<sub>4</sub> fluxes and CO<sub>2</sub> and seeking determinants based on the relationship between these fluxes, climate and soil parameters. Seasonal variations of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes have been underlined and can be explained by variation of soil and climate parameters. However, only the *Glyceria striata* has a significant influence on the CH<sub>4</sub> flux.

**Keywords :** flux, seasonal, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, vegetation, compaction, forest soil