

ÉCOLE DOCTORALE ÉNERGIE, MATÉRIAUX, SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace

THÈSE présentée par : Benoît D'ANGELO

soutenue le : [XX mois en lettres 2015]

pour obtenir le grade de : **Docteur de l'université d'Orléans**

Discipline : Sciences de la Terre et de l'Univers

[Titre de la thèse]

[Sous titre éventuel]

THÈSE dirigée par :

Christophe GUIMBAUD Co-directeur de recherche, LPC2E, Orléans
Fatima LAGGOUN Co-directeur de recherche, ISTIT, Orléans

RAPPORTEURS :

Prénom Nom Titre, établissement
Prénom Nom Titre, établissement

JURY:

Table des matières

Table des matières	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Remerciements	ix
Introduction	1
1 Synthèse Bibliographique	7
1.1 Les tourbières et le cycle du carbone	8
1.1.1 Zones humides et tourbières : définitions et terminologies	8
1.1.2 Tourbières et fonctions environnementales	12
1.1.3 Les tourbières et les changements globaux	14
1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants	17
1.2.1 Tourbières et GES	17
1.2.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières	17
1.2.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux	20
1.2.4 Bilans de carbone	24
2 Sites d'études et méthodologies employées	27
2.1 Présentation de la tourbière de La Guette	28
2.2 Autres sites du service national d'observation	33
2.3 Mesures de flux	34
2.3.1 Présentation des méthodologies possibles	34
2.3.2 Les mesures de CO ₂	35
2.3.3 Les mesures de CH ₄	37
2.3.4 Le calcul des flux	38
2.4 Facteurs contrôlants	39
2.4.1 acquisitions automatisées	39
3 Bilan de C de la tourbière de La Guette	41
3.1 Introduction	42
3.2 Procédure expérimentale et analytique	42
3.2.1 Méthodes de mesure	42
3.2.2 Modélisation du bilan de C	44
3.3 Résultats	48
3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la tourbière de La Guette	48
3.3.2 Sélection des modèles	54

3.3.3	Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle de l'écosystème	61
3.3.4	Variabilité spatiale du bilan	68
3.4	Discussion	70
3.4.1	Estimations des flux	70
3.4.2	Estimations des bilans	73
3.4.3	Sensibilité et limitations du bilan	73
3.4.4	Représentativité locale du modèle	74
3.4.5	Variation du bilan avec la végétation	74
3.4.6	perspectives	75
4	Effets de l'hydrologie sur les flux de GES	77
4.1	Introduction	78
4.2	Procédure expérimentale	79
4.2.1	Expérimentation A	80
4.2.2	Expérimentation B	80
4.2.3	traitement	81
4.3	Résultats	82
4.3.1	Expérimentation A	82
4.3.2	Expérimentation B	85
4.3.3	tendances générales	88
4.4	Discussion	88
4.4.1	Comparaison aux mesures <i>in-situ</i>	88
4.4.2	Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de gaz	90
4.4.3	Effet cycles multiples	91
5	Variation journalière de la respiration de l'écosystème (article)	93
5.1	Introduction	95
5.2	Procédure expérimentale et analytique	95
5.2.1	Synchronisation des données	95
5.2.2	Différence entre mesures de jour et mesures de nuit	95
5.2.3	Caractérisation physico-chimique	95
5.3	Résultats	95
5.3.1	Température de l'air et variabilité de RE	95
5.3.2	Synchronisation RE et température du sol	95
5.3.3	Équations utilisées	95
5.3.4	Relation entre RE et la température	95
5.3.5	Évolution du Q10	95
5.3.6	Différence entre mesures de jour et de nuit	95
5.3.7	Caractérisation de la tourbe	95
5.4	Discussion	95
5.4.1	Différence de RE entre les différents sites	95
5.4.2	Temps de latence entre température et RE	95
5.4.3	La synchronisation entre RE et la température améliore la représentation de la sensibilité de RE à la température	95
5.4.4	Différence entre mesure de RE faite le jour et la nuit	95
5.4.5	La sensibilité du Q10 à la profondeur de la température et à la synchronisation	95

Conclusions et perspectives	97
5.5 Bilan du bilan (de C) ?	98
5.6 Résilience de la tourbe par rapport aux 2 années sèches qui précèdent le BdC	98
5.7 Ouverture vers d'autre méthodes de mesures	98
Références bibliographiques	105
Index	106
Annexes	107
A Photos supplémentaires	108
B protocole végétation	108
C CARBIODIV	111
D package m70r	111

Liste des figures

1.1	Global distribution of peatlands	11
1.2	Projection des changements à l'horizon 2100, des moyennes et extrêmes annuels (sur terre) des températures de l'air et des précipitations : (a) température de surface moyenne par °C de changement global moyen, (b) 90 ^e percentile des températures journalières maximum par °C de changement de température moyenne maximale, (c) précipitations moyenne (en % par °C de changement de température moyenne) et (d) fraction de jours ayant des précipitations dépassant le 95 ^e percentile. Sources : (a) et (c) simulations CMIP5, scénario RCP4.5, (b) et (d) adaptation d'après Orlowsky et Seneviratne (2012)(IPCC2013).	16
1.3	schéma des flux de carbone entre une tourbière et l'atmosphère	18
2.1	Site d'études SNO	28
2.2	Carte de la tourbière de La Guette	29
2.3	Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure.	31
2.4	Évolution du niveau de la pluviométrie, en mm, des années 2011 à 2014	32
2.5	Évolution du niveau de la nappe, en cm par rapport à la surface, des années 2011 à 2014	32
2.6	Évolution de la température de l'air (en °C) des années 2011 à 2014 . .	33
2.7	Mesures de CO ₂	36
2.8	SPIRIT	37
3.1	Répartition des 20 placettes de mesures suivant un échantillonnage aléatoire stratifié.	43
3.2	Partitionnement des placettes en fonction de leur similarité en termes de composition végétale (pourcentage des strates muscinale, herbacées et arbustives)	47
3.3	Évolution du niveau de la nappe moyen des 20 embases mesuré pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	48
3.4	Évolution des températures de l'air (Tair) et du sol à -5, -30, -50 et -100 cm (T5, T30, T50 et T100 respectivement) moyenne mesurée lors des campagnes de terrain de mars 2013 à février 2015	49
3.5	Évolution de la conductivité pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	49
3.6	Évolution du pH pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	50
3.7	Évolution de la concentration en carbone organique dissous dans l'eau du sol pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	50
3.8	Évolution du niveau de PPB, RE et ENE pendant la période de mesure. Moyenne des 20 embases de mars 2013 à février 2015.	51
3.9	Évolution des flux de méthane moyen (N?) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	53

3.10 Relations entre les flux de gaz et une sélection de facteurs contrôlant	53
3.11 PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.1	55
3.12 PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.3	57
3.13 RE modèles avec Tair	59
3.14 RE modèles avec Tair	60
3.15 CH ₄ modèle H	61
3.16 Flux de CO ₂ interpolé à partir de PPB-1 et PPB-2	63
3.17 Flux de CO ₂ interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3	64
3.18 Flux de CO ₂ interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3	64
3.19 Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres des modèles RE-1 et RE-3	67
3.20 Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2	68
3.21 Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2	69
 4.1 Prélèvement des mésocosmes	81
4.2 Schéma d'un mésocosme	82
4.3 Expérimentation A : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH ₄ , RE, PPB, ENE en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent à la phase de dessiccation (D) en rouge et à la phase de réhumectation (R) en bleu.	83
4.4 Expérimentation B : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH ₄ , RE, PPB, ENE en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent aux phases de dessiccation (D) en rouge et aux phases de réhumectation (R) en bleu.	86
4.5 Relations entre les flux de GES et le niveau de la nappe	89
 1 Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure.	108
2 Calibration de la biomasse en fonction de la hauteur	109
3 Scanne des feuilles	109
4 Calibration de la biomasse herbacées pour <i>molinia Caerulea</i> (a), pour <i>eriophorum</i> (b) et de la surface de feuille pour <i>molinia Caerulea</i> (c), pour <i>eriophorum</i> (d) en fonction de la hauteur	110

Liste des tableaux

1.1	Estimations des stocks de C pour différents environnements	13
1.2	Surface de tourbe utilisée selon les usages considérés (tourbières non-tropicale). Modifié d'après Joosten et Clarke (2002).	15
1.3	Vitesse apparente d'accumulation du carbon à long terme en $\text{gC m}^{-2} \text{s}^{-1}$	25
3.1	Valeur des paramètres des équations utilisées pour modéliser les flux et sensibilité relative (en %) des flux en réponse à une variation de $\pm 10\%$ de chacun des paramètres des modèles.	62
3.2	Bilan des flux en gCm2an1	65
3.3	Bilan des flux en gCm2an1	65
3.4	Sensibilité relative (en %) du bilan de CO ₂ (ENE) en réponse à une variation de $\pm 10\%$ de chacun des paramètres des modèles.	66
3.5	Bilan des flux de CO ₂ en gCm2an1, en utilisant PPB-2 et RE-3	69
4.1	Récapitulatif des mesures pour les deux expérimentations	81

Remerciements

Fatima, Christophe, Sébastien Franck, Fabien Marielle Emélie, Étienne, Zi, Tianyi, Sarah, Paul, Xiaole, Guillaume Frédéric Stéphane Gilles Catherine, Catherine, Marie-Noëlle, Olivier

¹ Introduction

² Contexte général

³ En 1957, Charles David Keeling, scientifique américain, met au point et utilise
⁴ pour la première fois, un analyseur de gaz infra-rouge pour mesurer la concentration
⁵ de CO₂ de l'atmosphère sur l'île d'Hawaii, à Mauna Loa. La précision et la fréquence
⁶ importante de ses mesures lui permirent de voir pour la première fois les variations
⁷ journalière et saisonnière des concentrations en CO₂ atmosphérique, mais également à
⁸ plus long terme leur tendance haussière [Harris \(2010\)](#). Le CO₂ est un gaz à effet de serre
⁹ (GES) et son accumulation dans l'atmosphère... **force ? comparaison ? explication**
¹⁰ **effet de serre ?** Ce constat a probablement joué un rôle considérable dans la prise de
¹¹ conscience, par la communauté scientifique, de l'importance et de l'intérêt de l'étude du
¹² changement climatique et plus largement des changements globaux. Car si à l'époque
¹³ les concentration en CO₂ était inférieure à 320 ppm (partie par millions) elles ont
¹⁴ dépassées, au printemps 2014, la barre symbolique des 400 ppm selon un communiqué
¹⁵ de l'Organisation Météorologique Mondiale. Les concentrations pré-industrielles (avant
¹⁶ 1800) sont quand à elles généralement estimée à 280 ppm [Siegenthaler et Oeschger](#)
¹⁷ ([1987](#)).

¹⁸ Aujourd'hui, que ce soit pour le comprendre, le caractériser ou bien le prédire,
¹⁹ de nombreux **Combien ? cf fact sheet IPCC** scientifiques dans un grand nombre
²⁰ de disciplines, travaillent directement ou indirectement sur les changements globaux.
²¹ Ils sont nombreux également à collaborer au sein du Groupe d'experts Intergouver-
²² nemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), qui rassemble, évalue et synthétise les
²³ connaissances internationales liée au sujet.

²⁴ De manière générale, parmi les flux de C mesurés entre la biosphère et l'atmosphère,
²⁵ la respiration et la photosynthèse sont les plus important, 98 et 123 PgC/yr pour le flux
²⁶ de respiration globale (+ les feux) et la photosynthèse respectivement [Bond-Lamberty](#)
²⁷ et [Thomson \(2010\)](#); [Beer et al. \(2010\)](#). Pour comparaison les flux liés à la production
²⁸ de ciment et aux ressources fossiles (charbon, pétrole et gaz) représentent 7.8 PgC/yr

29 Ciais *et al.* (2014).

30 Étroitement lié aux changements globaux, le cycle du carbone est particulièrement étudié, quels sont les réservoirs, quels sont les flux et comment vont-ils évoluer ?

32 **schéma ?**

33 Zones humides tourbières

34 historique des tourbières, généralités sur l'histoire des tourbières vis à vis des
35 hommes Sujets principaux qui ont menés à l'étude des tourbières jusqu'à nos jours
36 (Exploitation, effet de serre)

37 Pourquoi étudier les tourbières aujourd'hui ?

38 L'étude des tourbières se poursuit car, en plus de rendre de nombreux services éco-
39 logiques (épuration du sol, régulation des flux hydriques, biodiversité), elles constituent
40 un stock de carbone relativement important au regard de la surface qu'elle occupent.
41 Ainsi il est généralement admis que les tourbières contiennent un quart à un tiers
42 du carbone présent Chiffres (**surfaces...**) dans l'ensemble des terres émergées tandis
43 qu'elle ne constituent que 3 % des surfaces continentales (**Réf needed**). Ce ratio rela-
44 tivement important, correspond à un stock d'environ 455 Gt Gorham (1991); Turunen
45 *et al.* (2002) est à mettre perspective avec les autres stock du cycle du carbone. On
46 observe que ce stock est du même ordre de grandeur que celui de la végétation

47 En conséquence dans un contexte **d'augmentation des GES dans l'atm et de
48 réchauffement**, l'évolution de ce stock, sa pérennité ou sa remobilisation est un sujet
49 d'étude important. De plus cette importance n'est à ce jour pas prise en compte de
50 façon spécifique dans les modèles climatiques globaux.

51 En France les tourbières s'étendent sur environ 60 000 Ha ((**Réf needed**)).

52 Transition modèles

53 En octobre 2013 le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
54 (GIEC) a publié le rapport du groupe de travail I qui travaille sur les aspects scientifique
55 physique du système et du changement climatique. S'il note que les connaissances ont
56 avancées, il note également que de nombreux processus ayant trait à la décomposition
57 du carbone sont toujours absents des modèles notamment en ce qui concerne le carbone

58 des zones humides boréales et tropicales et des tourbières. (Réf needed)

59 Objectif de la thèse et approche mise en oeuvre

60 L'objectif de ces travaux est donc de mieux comprendre la dynamique du carbone
61 au sein des tourbières. Tout d'abord en caractérisant la variabilité spatiale et temporelle
62 des flux de carbone à travers l'établissement de bilan de carbone. De déterminer quels
63 facteurs environnementaux contrôlent le fonctionnement comme puits ou source de
64 carbone de ces écosystèmes. Enfin construire, dans un esprit de synthèse et d'ouverture
65 et à l'aide des connaissances acquise, un modèle intégrateur permettant un lien avec
66 les modèles globaux et notamment ORCHIDE, afin que ces écosystèmes puissent être
67 pris en compte à cette échelle.

68 Pour atteindre ces objectifs, nos travaux ont été articulés autour de trois volets
69 **volet... t'as pas mieux ? Branche ? -_-**" principaux : Dans un premier temps,
70 l'**observation** régulière des flux de gaz (CO_2 et CH_4) ainsi que d'un certain nombre de
71 paramètres environnementaux servant à la caractérisation des variabilités spatiales et
72 temporelles, ainsi qu'à l'étude des facteurs contrôlant. Certains facteurs contrôlant qui
73 sont, dans un second temps, étudiés plus spécifiquement à travers un volet **expérimenta-**
74 **tion**. Ce dernier doit permettre une meilleure compréhension de processus clé avec
75 notamment l'impact de l'hydrologie. Enfin un troisième volet axé sur la **modélisation**,
76 avec le développement d'un modèle le plus mécaniste possible.

77 Cette thèse est structurée de la façon suivante : Le chapitre 1 est une synthèse
78 bibliographique, un état de l'art des connaissances liées au sujet. Les chapitres 2 et
79 3 rassemblent les travaux du volet observation, ils concernent respectivement le suivi
80 XX et le suivi YY Les chapitres 4 et 5 développent la partie expérimentale à travers
81 l'impact d'un assèchement et celui d'un rehaussement du niveau de l'eau. Le chapitre 6
82 concerne plus spécifiquement la modélisation, même si ce volet interviendra par ailleurs
83 de façon transverse dans les autres chapitres. Enfin une conclusions et des perspectives

⁸⁴ seront exposées.

⁸⁵ 1 Synthèse Bibliographique

⁸⁶

⁸⁷	1.1 Les tourbières et le cycle du carbone	8
⁸⁸	1.1.1 Zones humides et tourbières : définitions et terminologies	8
⁸⁹	1.1.2 Tourbières et fonctions environnementales	12
⁹⁰	1.1.3 Les tourbières et les changements globaux	14
⁹¹	1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants	17
⁹²	1.2.1 Tourbières et GES	17
⁹³	1.2.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières	17
⁹⁴	1.2.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux	20
⁹⁵	1.2.4 Bilans de carbone	24
⁹⁶		
⁹⁷		
⁹⁸		

1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

⁹⁹ Dans ce chapitre, nous commenceront par donner une vue de ce que sont les tour-

¹⁰⁰ bières : Que sont-elles ? Depuis quand sont-elles étudiées ? Pourquoi les a-t-on étudiés ?

¹⁰¹ Nous continuerons en entrant plus en détails sur leur fonctionnement vis à vis des flux

¹⁰² de carbone. Enfin nous verrons quels sont les facteurs contrôlant majeurs de ces flux.

¹⁰³ 1.1 Les tourbières et le cycle du carbone

¹⁰⁴ 1.1.1 Zones humides et tourbières : définitions et terminologies

¹⁰⁵ Définitions

¹⁰⁶ Les tourbières font partie d'un ensemble d'écosystèmes plus large que l'on appelle

¹⁰⁷ les zones humides. Ces zones humides ne sont ni des écosystèmes terrestres au sens

¹⁰⁸ strict, ni des écosystèmes aquatiques. Elles sont à la frontière entre les deux et sont

¹⁰⁹ caractérisées par un niveau de nappe élevé, proche de la surface du sol, voire au dessus.

¹¹⁰ L'omniprésence de l'eau joue fortement sur l'aération du milieu et constraint, de façon

¹¹¹ plus ou moins importante, l'accès à l'oxygène. Elles ont été définie en 1971, lors de la

¹¹² convention dite de RAMSAR¹ de la façon suivante :

ZONES HUMIDES :

«les zones humides sont des étendues de marais, de fagnes², de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres.»

(Ramsar, 1987)

¹¹⁴ Les zones humides regroupent donc des écosystèmes très variés parmi lesquels les

¹¹⁵ marais, les mangroves, les plaines d'inondations et les tourbières. Leurs particularités :

1. La convention de RAMSAR est un traité international visant à la conservation et l'utilisation rationnelle des zones humides.

2. Marais tourbeux situé sur une hauteur

¹¹⁶ niveau de nappe élevé et zone anaérobie importante, entraînent le développement d'une
¹¹⁷ végétation spécifique, qui s'est adaptée aux milieux fortement humides ou inondés.

¹¹⁸ Les tourbières représentent 50 à 70 % des zones humides [Joosten et Clarke \(2002\)](#).

¹¹⁹ Leur définition est variable selon les régions ((**Réf needed**), exple). Deux définitions
¹²⁰ sont régulièrement utilisées :

TOURBIÈRE :

¹²¹ Écosystèmes, avec ou sans végétation, possédant au moins 30 cm de tourbe
naturellement accumulée.

Définition traduite d'après [Joosten et Clarke \(2002\)](#)

¹²² Cette première définition correspond au *peatland* anglo-saxon. L'épaisseur de tourbe
¹²³ accolée à cette définition peut varier selon le pays, elle est par exemple établie à 40 cm
¹²⁴ au Canada ([National Wetlands Working Group, 1997](#))

TOURBIÈRE ACTIVE :

¹²⁵ Écosystèmes dans lesquels un processus de tourbification est actif.

Définition traduite d'après [Joosten et Clarke \(2002\)](#)

¹²⁶ Cette seconde définition correspond au *mire* anglo-saxon et peut être traduite en fran-
¹²⁷ çais par le terme de tourbière active. Les concepts derrières ces deux définitions se
¹²⁸ chevauchent mais ne sont pas complètement similaires : une tourbière drainée peut
¹²⁹ avoir plus de 30 cm de tourbe et ne plus former de tourbe, ne plus être active. À l'in-
¹³⁰ verse il peut exister des zones où l'épaisseur de tourbe est inférieure à 30 cm malgré
¹³¹ un processus de tourbification actif. Un même écosystème tourbeux pouvant d'ailleurs
¹³² avoir à la fois des zones correspondant à la première définition et d'autres à la seconde.
¹³³ Les tourbières sont donc, selon la définition utilisée, des écosystèmes contenant ou des
¹³⁴ écosystèmes formant de la tourbe. Mais qu'est ce que la tourbe ?

TOURBE :

¹³⁵ «Accumulation sédentaire de matériel composé d'au moins 30 % (matière
sèche), de matières organiques mortes.»

Définition traduite d'après [Joosten et Clarke \(2002\)](#)

1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

136 Le seuil de 30 %, souvent utilisé pour rapprocher sa définition de celle d'un sol organique (histosol) au sens large, dans lesquels sont classés la majorité des sols tourbeux.
137 D'autres définitions existent, faisant la distinction entre sols organiques et tourbes avec
138 un seuil à 75 % (Andrejko *et al.*, 1983) ou 80 % (Landva *et al.*, 1983). Il est également
139 nécessaire de préciser que, au delà de la classification utilisée, ce que les écologues
140 considèrent comme de la tourbe contient généralement 80 % de matières organiques au
141 minimum (Rydin et Jeglum, 2013a). Ce processus de formation est appelé la tourbifica-
142 tion ou turfogénèse et les matières organiques accumulées proviennent majoritairement
143 de la végétation. On définit les matières organiques de la façon suivante :
144

MATIÈRES ORGANIQUES :

145 Matières constituées d'un assemblage de composés ayant une ou plusieurs liaisons C–H. Elles sont composées de nombreux éléments dont des carbohydrates (sucres, cellulose ...), des composés azotés (protéines, acides aminés ...) et phénoliques (lignine ...), des lipides (cires, résines, ...) et d'autres³.

146 Ces variations de définitions ajoutées aux limites floues qui peuvent exister entre
147 certains écosystèmes tourbeux et non-tourbeux rendent la cartographie de ces écosys-
148 tèmes délicate. Les estimations généralement citées évaluent la surface occupée par
149 les tourbières à environ 4 000 000 km² (Lappalainen, 1996). Cette surface correspond
150 à 2 à 3 % de l'ensemble des terres émergées du globe. Plus de 85 % d'entre elles sont
151 situées dans l'hémisphère nord, majoritairement dans les zones boréales et sub-boréales
152 (Strack, 2008) (Figure 1.1). Ce sont sur ces écosystèmes que sera focalisé ce travail, lais-
153 sant de côté les tourbières tropicales dont le fonctionnement est distinct et spécifique
154 (**Réf needed**).

3. Cette définition, utile pour définir simplement les matières organiques, est cependant limitée car elle inclut des composés traditionnellement considérés comme minéraux (le graphite) et exclut certains autres considérés comme organiques (acide oxalique) (Liste de diffusion ResMO).

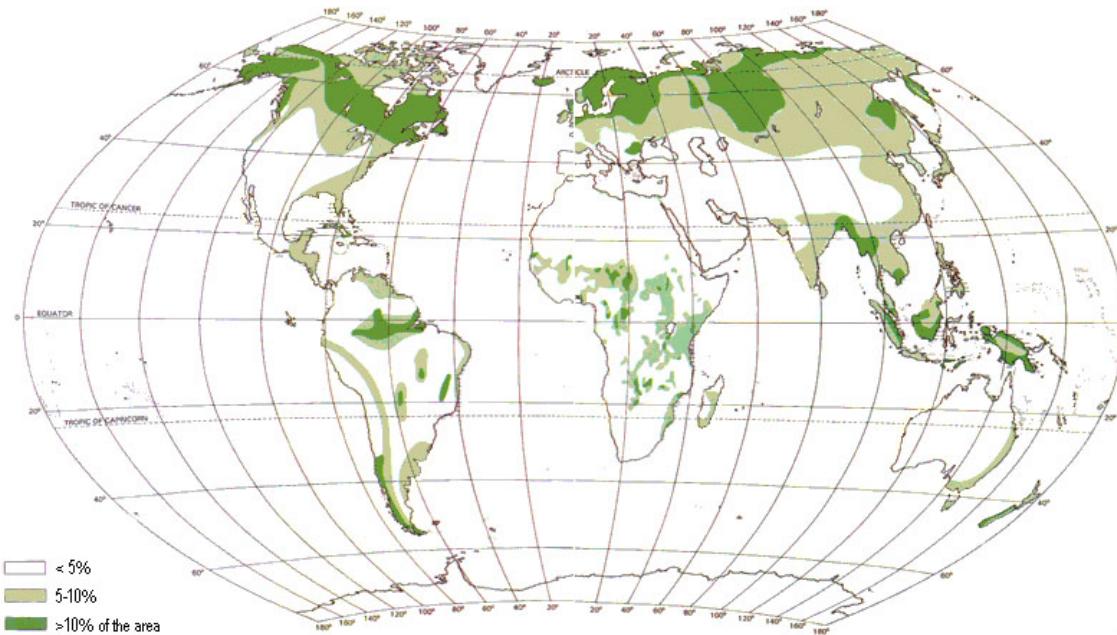


FIGURE 1.1 – Global distribution of peatlands

155 La formation des tourbières

156 L’atterrissement et la paludification sont les deux processus principaux permettant
 157 la formation des tourbières. Il s’agit pour le premier du comblement progressif d’une
 158 zone d’eau stagnante. La paludification est la formation de tourbe directement sur un
 159 sol minéral, grâce à des conditions d’humidité importante. Ces modes de formation ne
 160 sont pas exclusif, une tourbière pouvant se développer, selon les endroits considérés ou
 161 le temps, via des processus différents.

162 Classifications

163 Différentes classifications sont utilisées pour différencier ces écosystèmes. La plus
 164 générale et la plus utilisée dans la littérature distingue les tourbières dite haute, ou de
 165 haut marais, correspondant au *bog* anglais, et les tourbières basse, ou de bas marais,
 166 correspondant au *fen* anglais.

167 Les tourbières de haut-marais ont généralement une épaisseur de tourbe supérieure
 168 à 30 cm et sont alimenté principalement alimentée par les précipitations : elles sont
 169 dites ombrotrophes. Leur surface parfois bombée (tourbières élevées ou bombées) peut
 170 également être plate ou en pente. Cette géométrie situe une partie au moins de l’éco-

1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

171 système au dessus du niveau de la nappe. Elles ont une concentration en nutriments
172 relativement faible : elles sont oligotrophes et sont fortement acide avec des eaux de
173 surface dont le pH est autour de 4 voire moins.

174 Les tourbière de bas-marais ont une épaisseur généralement supérieure à 30 cm avec
175 un niveau de nappe très proche de la surface du sol. De forme concave ou en pente elles
176 sont généralement alimentée en eaux par des sources ou par ruissellement et sont donc
177 dites minerotrophes. Le pH de leur eaux de surface varient de 4 à 8. Les végétations
178 dominantes de ces écosystèmes peuvent être des bryophytes, des graminées ou des
179 arbustes bas.

180 1.1.2 Tourbières et fonctions environnementales

181 Biodiversité dans les tourbières

182 Les tourbières sont le siège d'une biodiversité importante et spécifique. Ainsi les
183 Sphaignes, qui sont des bryophytes, (des mousses) sont caractéristiques des écosystèmes
184 tourbeux. Ce sont des espèces dites ingénieries, capable de modifier l'environnement
185 dans lequel elles vivent afin de l'adapter à leurs besoins. Les sphaignes sont ainsi capable
186 d'abaisser le pH, de capter des nutriments et de les séquestrer et ce même quand
187 elles n'en ont pas besoin afin d'empêcher d'autres espèces notamment vasculaire d'en
188 profiter. Plus précisément, le fait que les sphaignes captent les nutriments via leur
189 capitulum leur permet de les intercepter avant qu'ils ne soient captés par d'éventuelles
190 racines positionnées plus bas. Les sphaignes, comme de nombreuse mousses ont des
191 litières relativement récalcitrantes⁴.

192 Qualité des eaux

193 Puits de carbone

194 Par définition les tourbières stockent ou ont stocké du carbone. C'est cette fonction
195 de puits de carbone qui rend l'importance de ces écosystèmes non négligeable malgré

4. il est d'usage de parler de litières récalcitrantes sans plus de précision. Il s'agit en fait de litières difficilement dégradables

Tableau 1.1 – Estimations des stocks de C pour différents environnements

Compartiment	Stock (en Gt de C)	référence
Tourbières	270 – 455	Gorham (1991); Turunen <i>et al.</i> (2002)
Végétation	450 – 650	Robert et Saugier (2003)
Sols	1500 – 2000	Robert et Saugier (2003); Post <i>et al.</i> (1982); Eswaran <i>et al.</i> (1993)
CO ₂ atmosphérique	750 – 800	Robert et Saugier (2003)
Permafrost	1700	

196 la faible surface qu'ils représentent. Les estimations du stock de carbone présent dans
 197 les tourbières tempérées/boréales sont comprises entre 270 et 455 Gt C (Gorham, 1991;
 198 Turunen *et al.*, 2002). Les différences entre les estimations sont liées aux incertitudes
 199 de cartographie citées précédemment auxquelles s'ajoutent des incertitudes concernant
 200 l'épaisseur et la densité moyenne de la tourbe. Le carbone stocké dans les tourbières
 201 représente 10 à 25 % du carbone présent dans les sols et entre 30 et 60 % du stock de
 202 carbone atmosphérique.

203 Ce stock est un héritage datant des 10 derniers milliers d'années, l'holocène, période
 204 pendant laquelle se sont formés la majorité des tourbières (**Réf needed**) (Yu *et al.*,
 205 2010). Le fonctionnement naturel de ces écosystèmes permet le stockage du C. C'est un
 206 des services écologiques que rendent les tourbières et que l'on appelle la fonction puits
 207 de carbone. Cette fonction est liée au niveau élevé de la nappe d'eau, qui rend l'accès à
 208 l'oxygène est plus difficile diminuant d'autant l'activité aérobie, dont la respiration des
 209 micro-organismes et des plantes. Cela se traduit par une dégradation relativement faible
 210 des matières organiques. Elle est également liée à la production de litière récalcitrante
 211 par les bryophytes.

212 En comparaison avec un sol forestier, l'accumulation de matières organiques n'est
 213 donc pas lié à une production primaire plus forte, mais bien à une dégradation des
 214 matières produites plus faible.

215 Ces perturbations peuvent induire des modifications de fonctionnement, notamment
 216 l'envahissement de ces écosystèmes par une végétation vasculaire, et changer cette
 217 fonction puits.

²¹⁸ **1.1.3 Les tourbières et les changements globaux**

²¹⁹ On défini les changements globaux comme l'ensemble des modifications environne-
²²⁰ mentales plus ou moins rapide, ayant lieu à l'échelle mondiale, quelle que soit leur ori-
²²¹ gine. Les deux contraintes développées dans cette partie sont la pressions de l'homme :
²²² contrainte anthropique, et celle du climat : contrainte climatique.

²²³ **Contrainte anthropique**

²²⁴ L'interaction entre les Hommes et les zones humides au sens large et les tourbières
²²⁵ en particulier remonte probablement à l'aube de l'humanité. De grandes découvertes
²²⁶ archéologiques ont été faites dans ces écosystèmes témoins d'époques révolues. Des
²²⁷ chemins de rondins néolithique aux crannogs de l'époque romaine ([Buckland, 1993](#)).
²²⁸ L'utilisation de la tourbe et des tourbières a du commencer relativement tôt, mais c'est
²²⁹ à partir du 17^e siècle que le drainage de ces écosystèmes, pour les convertir en terres
²³⁰ agricoles, s'est intensifié. Au 19^e siècle, l'apparition de machines permettant une ré-
²³¹ colte industrialisée de la tourbe, a développé son utilisation comme combustible. Enfin
²³² depuis le milieu du 20^e une part importante de ces écosystèmes ont été drainé pour
²³³ développer la sylviculture. Aujourd'hui l'exploitation principale de la tourbe est liée à
²³⁴ son utilisation comme substrat horticole ([Lappalainen, 1996; Chapman *et al.*, 2003](#)).
²³⁵ Suite à ces perturbations, la surface de tourbières altérée est estimée à 500 000 km² en-
²³⁶ viron, principalement du fait de leur reconversion pour l'agriculture et la sylviculture
²³⁷ ([Tableau 1.2](#)). En France, suite à leur utilisation, principalement agricole, la surface
²³⁸ des tourbières a été par deux entre 1945 et 1998, passant de 1200 km² à 600 km² ([Lap-](#)
²³⁹ [palainen, 1996; Manneville, 1999](#)).

²⁴⁰ Ces écosystèmes ont donc été et sont encore perturbés par différentes activités
²⁴¹ humaines.

Tableau 1.2 – Surface de tourbe utilisée selon les usages considérés (tourbières non-tropicale). Modifié d'après [Joosten et Clarke \(2002\)](#).

Utilisation	Surface (km ²)	proportion (%)
Agriculture	250 000	50
Sylviculture	150 000	30
Extraction de tourbe	50 000	10
Urbanisation	20 000	5
Submersion	15 000	3
Pertes indirectes (érosion, ...)	5000	1
Total	490 000	100

²⁴² Contrainte climatique

²⁴³ Comme nous l'avons, le stock de C accumulé par les tourbières s'est majoritairement
²⁴⁴ constitué pendant l'Holocène. À cette époque déjà ces écosystèmes étaient influencés
²⁴⁵ par le climat, et leur développement n'a pas été linéaire sur ces douze derniers milliers
²⁴⁶ d'années. Il est reconnu que le développement des tourbières est très important au début
²⁴⁷ de cette période entre il y a 12 000 et 8000 ans ([Smith et al., 2004; MacDonald et al.,](#)
²⁴⁸ [2006; Yu et al., 2009](#)). Cette période coïncide avec le maximum thermique holocène
²⁴⁹ (HTM), période pendant laquelle le climat était plus chaud que aujourd'hui ([Kaufman](#)
²⁵⁰ [et al., 2004](#)). Ce constat peu sembler paradoxal si l'on considère que dans la littérature
²⁵¹ concernant les tourbières et le réchauffement actuel, la crainte de voir ces écosystèmes se
²⁵² transformer en source de C est majoritaire. Cependant ces même auteurs qui ont montré
²⁵³ cette relation, entre le HTM et le développement important des tourbières, ne préjugent
²⁵⁴ pas de l'effet du réchauffement actuel. Notamment [Jones et Yu \(2010\)](#) expliquent que
²⁵⁵ pendant cette période de maximum thermique, existe également une saisonnalité très
²⁵⁶ importante, avec des été chauds et des hivers froid, qui a dû en minimisant la respiration
²⁵⁷ hivernale de ces écosystèmes, jouer un rôle important dans leur développement.

²⁵⁸ Cette forte saisonnalité n'est pas attendue lors du réchauffement actuel. L'effet
²⁵⁹ estimé dans les hautes latitudes, semble plus important pendant l'hiver et l'automne,
²⁶⁰ et tendrait donc à la minimiser ([Christensen et al., 2007](#)). Les effets directs attendus
²⁶¹ du réchauffement dans les hautes latitudes sont une augmentation des températures de

1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

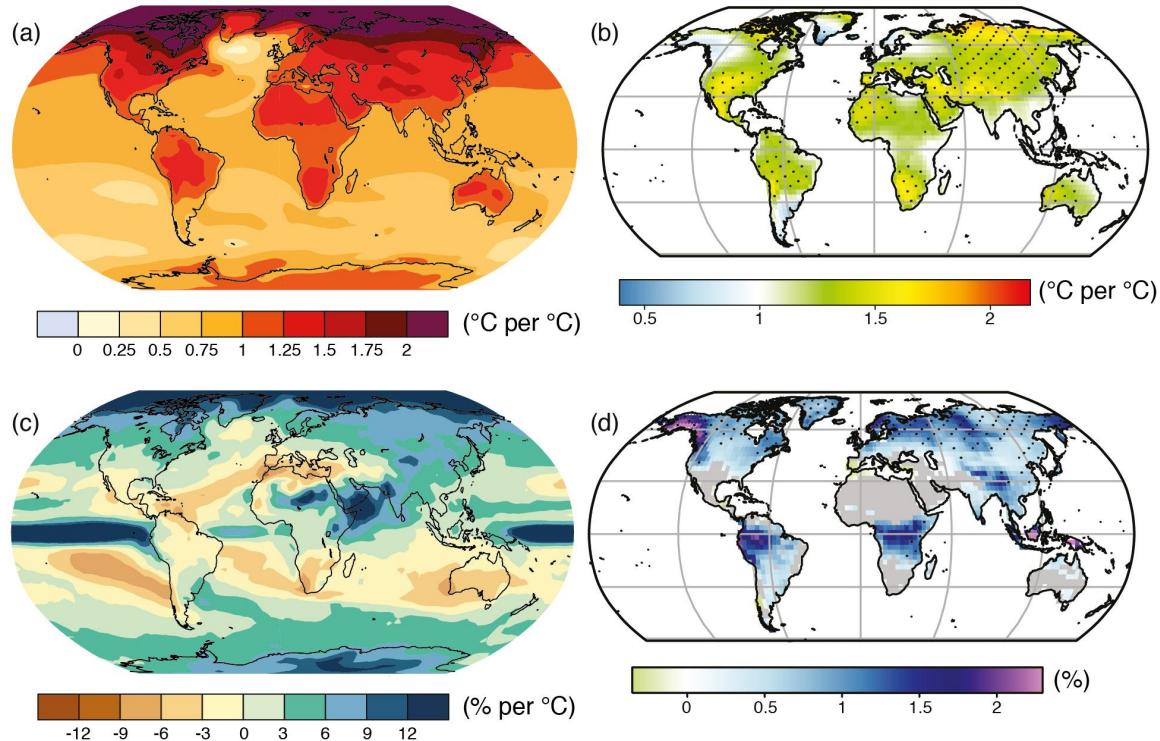


FIGURE 1.2 – Projection des changements à l'horizon 2100, des moyennes et extrêmes annuels (sur terre) des températures de l'air et des précipitations : (a) température de surface moyenne par °C de changement global moyen, (b) 90^e percentile des températures journalières maximum par °C de changement de température moyenne maximale, (c) précipitations moyenne (en % par °C de changement de température moyenne) et (d) fraction de jours ayant des précipitations dépassant le 95^e percentile. Sources : (a) et (c) simulations CMIP5, scénario RCP4.5, (b) et (d) adaptation d'après Orlowsky et Seneviratne (2012)(IPCC2013).

262 2 à 8 °C dans les zones boréales, et de 2 à 6 °C dans les zones tempérées, ainsi qu'une
 263 augmentation probable des précipitations (Christensen *et al.*, 2013; Frolking *et al.*,
 264 2011). De façon plus indirecte est attendue la fonte du permafrost, l'augmentation de
 265 l'intensité et de la fréquence de feux et des changements dans les compositions des
 266 communautés végétales.

267 Les tourbières, qui ont accumulées un stock de carbone important, sont donc sou-
 268 mises à des contraintes fortes. Afin de mieux cerner le devenir de ce carbone, l'étude de
 269 ces écosystèmes, des flux de gaz qu'ils échangent avec l'atmosphère, est une nécessité.

270 1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs 271 contrôlants

272 1.2.1 Tourbières et GES

273 Dans l'atmosphère le carbone est principalement présent dans l'atmosphère sous
274 forme de dioxyde de carbone (CO_2) et de méthane (CH_4).

275 Le CO_2

276 Le CH_4

277 Les zones humides sont la première source naturelle de CH_4 atmosphérique pour
278 avec un flux à l'échelle globale estimé entre 145 et 285 Tg an^{-1} ([Lelieveld et al., 1998](#);
279 [Ciais et al., 2014](#)) ([Tableau ?](#))

280 1.2.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières

281 De l'atmosphère à l'écosystème

Avant de stocker et de conserver du carbone, le faut le capturer. Ce transfert du carbone de l'atmosphère à la tourbe se fait sous la forme de CO_2 , assimilé par la photosynthèse, principalement des végétaux supérieurs, et éventuellement, bien que dans de moindre proportions, par des algues, des lichens ou des bactéries photosynthétiques [Girard et al. \(2011\)](#). On peut écrire la réaction de photosynthèse de la façon suivante :



282 Ce flux est généralement appelé **Production Primaire Brute** (PPB), *Gross Primary
283 Production*, (*GPP*) en anglais (Figure 1.3). Les tourbières sont des écosystèmes dont
284 la production primaire est estimée à environ 500 gC m^{-2} ([Francez, 2000](#)). Si la photo-
285 synthèse est un processus majeur d'assimilation du CO_2 , il existe d'autres voies mé-

1.2. Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants

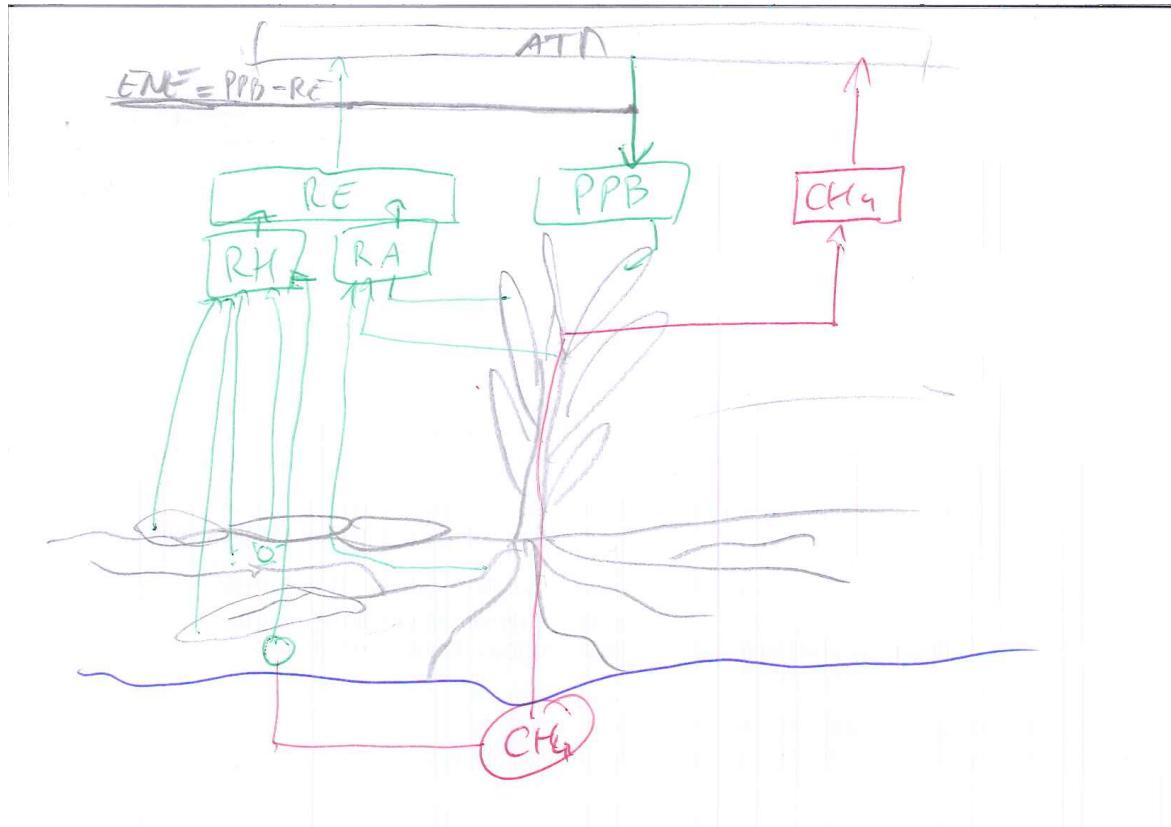


FIGURE 1.3 – schéma des flux de carbone entre une tourbière et l'atmosphère

²⁸⁶ taboliques permettant la capture du CO₂ de l'atmosphère. Ainsi les micro-organismes
²⁸⁷ chemolithotrophes (**expliquer**) sont capables d'assimiler le CO₂ en utilisant l'énergie
²⁸⁸ issue de l'oxydation de composés inorganiques.

²⁸⁹ Les voies métaboliques permettant l'assimilation du CO₂ sont plutôt bien connues et
²⁹⁰ le fait que les substrats de départ de varient pas (mal dit..) a permis une compréhension
²⁹¹ relativement fine du processus ([Farquhar et al., 1980](#)). Cependant une fois assimilé par
²⁹² la végétation le devenir du carbone est moins direct. À plus long terme, et après son
²⁹³ assimilation par la plante, le carbone est stocké principalement à travers la partie non
²⁹⁴ décomposée des litières végétales. Litières qui à force de compressions et de tassemens
²⁹⁵ va devenir de la tourbe.

²⁹⁶ Il n'y a pas de flux direct de CH₄ de l'atmosphère vers les écosystèmes terrestres,
²⁹⁷ la majorité du méthane atmosphérique, 90 %, réagit avec des radicaux hydroxyles,
²⁹⁸ principalement dans la troposphère où il sera un précurseur de l'ozone

299 De l'écosystème à l'atmosphère

300 Les sources de carbone émises par les tourbières vers l'atmosphère sont multiples.

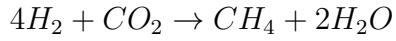
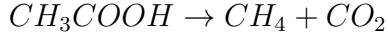
301 D'abord différents gaz peuvent être émis, notamment le CO₂ et le CH₄, éventuellement
302 du N₂O, et certains d'entre eux peuvent avoir plusieurs sources.

303 Le CO₂ est émis dans l'atmosphère à travers différents processus, la respiration
304 aérobie (le plus gros contributeur), les respirations anaérobies ou fermentations (e.g.
305 du glucose, de l'acétate), ou encore l'oxydation du méthane. Les principales sources de
306 CO₂, sont représentées dans la figure 1.3. La ou plutôt les respirations sont généralement
307 séparées en deux. D'un côté la respiration végétale, que ce soit celle de feuilles, des tiges,
308 des racines et que l'on appelle la **respiration autotrophe**. De l'autre rassemblé sous le
309 vocable de **respiration hétérotrophe**, la respiration de la rhizosphère, liée à l'émission
310 d'exsudats par les racines, la décomposition des litières et des matières organiques, la
311 respiration de la faune et l'oxydation du CH₄ par les organismes méthanotrophes. On
312 appelle **Respiration de l'Écosystème** (RE) l'ensemble des respirations autotrophe
313 et hétérotrophe, en incluant à la fois ses composantes aérienne et souterraine. On la
314 distingue de la respiration du sol qui est définie comme l'ensemble des respirations de
315 la colonne de sol, en excluant la partie aérienne. La production de CO₂ est donc un
316 signal intégré sur l'ensemble de la colonne de tourbe. C'est cette multitude de processus
317 qui rend l'estimation de ce flux difficile, en effet chacune des respirations n'aura pas la
318 même sensibilité vis à vis de facteurs contrôlant.

319 La strate muscinale pouvant jouer/participer/produire jusqu'à 80 % de la produc-
320 tion primaire ([Francez, 2000](#)). Cette production primaire n'est pas particulière élevée
321 (**Réf needed**) et c'est en fait la faible décomposition des matières organiques qui per-
322 met aux tourbières de stocker du carbone. L'accumulation moyenne estimée dans les
323 tourbières boréales est de 30 gC m⁻². Le taux d'accumulation varie en fonction des
324 espèces végétales présentes ((**Réf needed**)), le niveau d'eau ((**Réf needed**)), ... (??)

325 Conséquence du niveau de nappe élevé des tourbières, le développement d'une zone
326 anoxique importante dans la colonne de sol favorise la production de CH₄. Le CH₄
327 est principalement produit à partir d'acétate (CH₃COOH) ou de dihydrogène (H₂),

ces deux composés étant dérivés de la décomposition préalable de matières organiques (Lai, 2009).



Le CH₄ produit est transporté dans l'atmosphère par diffusion, ébullition ou à travers certaines plantes (Joabsson *et al.*, 1999; Colmer, 2003). Pendant ce transport le CH₄ peut être oxydé par des organismes méthanotrophes. Cette transformation produit tour à tour différents composés (méthanol, formaldéhyde, formate) aboutissant à la production de CO₂ (Whalen, 2005).



Le méthane (Lai2009, seger1998, barlett1993 review)

1.2.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux

Ces flux sont contrôlés par différents facteurs. Parmi ceux qui sont le plus souvent cité figure la température, le niveau de la nappe et la végétation.

L'augmentation de la vitesse de réaction de nombreuses réactions biochimiques avec la température est connue depuis longtemps. Elle a été mise en évidence par un chimiste suédois en 1889 : Svante August Arrhenius sur la base de travaux réalisés par un autre chimiste, néerlandais, Jacobus Henricus Van't Hoff. Depuis, de nombreuses mesures de terrain confirment cette relation (**Réf needed**) La photosynthèse et l'ensemble des respirations sont donc contrôlées, au moins en partie, par la température.

Deuxième facteur contrôlant majeur : l'hydrologie. L'eau joue un rôle indispensable à la formation et au maintient de ces écosystèmes. Le niveau de la nappe, que le défini ici comme la distance entre la surface topographique de l'écosystème et le toit de l'aquifère/l'eau libre/la zone saturée. Ce niveau sépare la colonne de tourbe en une zone oxique, où il y a présence d'oxygène, et une zone anoxique dans laquelle l'oxygène

350 est absent. Cette différence va influer sur la production du CO₂ et du CH₄. La zone
 351 anoxique permet aux organismes anaérobies de se développer, notamment les Archaea⁵
 352 méthanogènes. L'activité de ces organismes est la plus importante juste sous la surface
 353 de l'eau, là où ils trouvent, en plus de l'anoxie, des matières organiques de qualité
 354 (faiblement décomposées). La zone aérobie permet la respiration aérobie (**aérobie vs**
 355 **oxygène**) des micro-organismes, des racines et de la faune. C'est donc dans cette zone
 356 qu'est produit la majorité du CO₂. Lors de son transport de la zone anoxique vers la
 357 surface, le CH₄ passe par la zone oxygénée et y est en partie oxydé en CO₂. (organismes
 358 méthanotrophes) Le niveau de la nappe contraint également le teneur en eau du sol et
 359 la hauteur de la frange capillaire (Laiho2006). Ce point a son importance notamment
 360 pour la végétation.

361 La végétation est également un facteur important concernant les flux de gaz liés aux
 362 tourbières. D'abord car elle exerce une influence directe sur les flux, avec d'un côté la
 363 photosynthèse et la respiration. La photosynthèse est le seul processus⁶ permettant le
 364 piégeage du carbone présent dans l'atmosphère. Le potentiel de végétation pouvant être
 365 différent selon la plante considérée (Moore2002), la composition des communautés végé-
 366 tales influe donc la quantité de carbone potentiellement assimilable par l'écosystème.
 367 La respiration des plantes que ce soit via leurs parties aériennes ou souterraines (les ra-
 368 cines) va permettre de libérer du CO₂. (**Estimation chiffres ?**) La végétation fournit
 369 également via ses litières, des matières organiques fraîches pour les micro-organismes.
 370 Mais la végétation peut également stimuler la respiration des micro-organismes pré-
 371 sent dans la rhizosphère⁷ via la libération d'exsudats racinaires (Moore2002). Enfin un
 372 effet indirect lié à l'adaptation de certaines plantes vasculaires aux conditions saturées
 373 en eau et anoxique. En effet certaines plantes présentes dans ces milieux humides ont
 374 développé un Aerenchyme, un espace intercellulaire agrandi permettant le transport
 375 d'oxygène des parties aériennes de la plante aux parties submergées. Le transport peut
 376 également se faire dans l'autre sens et permettant par exemple le transport du CO₂ ou

5. micro-organismes unicellulaires procaryotes

6. pas tout à fait exact, certains organismes peuvent se développer uniquement avec du CO₂ et un apport d'énergie suffisant

7. zone du sol impacté par les racines

1.2. Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants

377 du CH₄ dans l'atmosphère. Ce passage au travers de la plante permet également au
378 CH₄ d'éviter d'être oxydé avant d'atteindre l'atmosphère.

379 D'autres facteurs à évoquer ?

380 Facteurs contrôlant la respiration de l'écosystème

381 Updegraf2001

382 Montre, dans une expérimentation à base de mésocosme, que la respiration de l'éco-
383 système est contrôlée presque exclusivement par la température du sol.

384 Cai2010

385 Mesures in-situ, sécheresse court terme, plus chaud et plus sec (1an). Sensibilité à la
386 température (Q10) identique l'année humide et l'année sèche. Dans les conditions plus
387 chaude et plus sèche Cai observe une augmentation de la Respiration (plus forte que
388 celle de la photosynthèse)

389 Stratck2006

390 Augmentation de la respiration suite à un abaissement du niveau de l'eau (8ans plus
391 tôt).

392 Ballantyne2014

393 dans une expérimentation in-situ, montre une respiration de l'écosystème plus impor-
394 tante quand le niveau de la nappe est bas que lorsque le niveau de la nappe est haut.
395 L'expérimentation se fait sur un site dont l'abaissement de la nappe est effectif depuis
396 longtemps (80 ans plus tôt) Même résultat que strack, donc effet présent même sur le
397 long terme.

398 Facteurs contrôlant la production primaire brute

399 Si la diversité des réactions est moindre pour la photosynthèse, sa réponse aux va-
400 riabes environnementales à l'échelle de l'écosystème n'en est pas moins difficile à prédire.

401 Comme pour la respiration, l'augmentation de la température augmente la vitesse de
402 réaction (Cai2010). (**Réf needed**)L'effet d'une variation du niveau de la nappe est
403 cependant moins évidente. La baisse du niveau de la nappe peut à la fois induire une

404 augmentation de la PBB, notamment quand elle favorise la végétation vasculaire (Ballantyne2014). Mais elle peut également la diminuer, lorsqu'elle induit un stress hydrique
405 important (Strack & Zuback 2013, Peichl 2014, Alm1999, Griffis2000, Weltzin2000)

407 **Facteurs contrôlant l'ENE**

408 On défini l'Échange Net de l'Écosystème (ENE) comme la différence entre la Photosynthèse Primaire Brute (PPB) et la Respiration de l'écosystème (RE). Les facteurs
409 contrôlants l'ENE sont donc les mêmes que ceux qui contrôlent ces 2 flux. Cependant
410 l'effet d'un même facteur de contrôle peut être différent vis à vis de PPB et de RE
411 selon le contexte environnemental, que ce soit par rapport à la nature de l'effet ou son
412 importance. Ainsi une variation de l'ENE peut parfois est contrôlé majoritairement
413 soit par la PPB soit par la RE soit par les deux. Par exemple, une baisse du niveau
414 de la nappe est souvent liée dans la littérature à une baisse de l'ENE. Cependant
415 certains attribuent cette baisse à une augmentation de la Respiration (Aurela2013,
416 Ballantyne2014, Alm1999, Ise2008, Oechel1993) quand d'autres l'attribue à une dimi-
417 nution de la photosynthèse Sonnentag2010, Peicl2014. Enfin certain voient un effet à
418 la fois de l'augmentation de la respiration et de la diminution de la photosynthèse
419 (StrackZuback2013)

421 À noter un article intéressant (Lund2012) dans lequel, dans un même site une baisse
422 du niveau de la nappe 2 année différente entraînera une baisse de l'ENE dans les 2 cas,
423 mais dans l'un des cas cette baisse est contrôlée par un augmentation de la respiration
424 et dans l'autre cas cette baisse est contrôlée par une diminution de la photosynthèse.

425 Également un article de Ballantyne2014 qui lui ne note pas d'effet d'une baisse du
426 niveau de la nappe sur l'ENE car l'augmentation de la respiration est compensée par
427 une augmentation de la photosynthèse.

428 **Facteurs contrôlant les flux de méthane**

429 Le niveau de la nappe et la température semblent être les facteurs prépondérant du
430 contrôle des flux de méthane

1.2. Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants

431 La prépondérance relative des ces différents flux, contrôlée par les conditions envi-
432 ronnementale, va donc impacter le fonctionnement des tourbières. Soit elles stockent
433 du carbone, en accumulant des matières organiques, et donc fonctionnent comme des
434 puits ou soit elle relâchent du carbone et fonctionnent comme des sources.

435 L'étude individuelle de tel ou tel flux avec tel ou tel facteur contrôlant est nécessaire
436 afin de comprendre ce qu'il se passe au niveau des processus. Il est tout aussi nécessaire
437 d'arriver à intégrer l'ensemble de la complexité naturelle. C'est l'intérêt d'établir des
438 bilans de carbone.

439 1.2.4 Bilans de carbone

440 Le calcul d'un bilan de carbone à l'échelle d'un écosystème permet de détermi-
441 ner si l'équilibre (où le déséquilibre) des flux tend à stocker du carbone, le système
442 fonctionnant alors comme un puits, ou à libérer du carbone, le système fonctionnant
443 alors comme une source. Il existe différentes façons de réaliser le bilan de carbone d'une
444 tourbière que l'on peut séparer en deux approches principales. La première approche
445 consiste à utiliser l'archive tourbeuse pour estimer des vitesses d'accumulation de la
446 tourbe. Cette méthode permet d'étudier la fonction puits sur des temps longs (derniers
447 millénaires) et de lier d'éventuels changements dans les vitesses d'accumulation à des
448 facteurs environnementaux. La seconde approche se base d'avantage sur des mesures
449 actuelles des différents flux afin d'étudier, sur des temps forcément plus courts, l'évolu-
450 tion de la prépondérance puits/source d'un écosystème. Les deux approches sont donc
451 complémentaires.

452 passé

453 long-term apparent rate of carbon accumulation (LORCA) datations + dry bulk
454 density + carbon content (Tableau 1.3)

455 **tableau LORCA ajouter colonne contexte (exple : 7 tourbières ombro-**
456 **trophes)**

Tableau 1.3 – Vitesse apparente d’accumulation du carbon à long terme en gC m⁻² s⁻¹

min – max	moyenne	référence
20 – 140	?	Mitra2005
?	18.6	Yu2009
	17.2	Gorham2012
	20	Jones2010
	16.2	Borren2004
	18.5	Packalen2014
	19.4	Vitt2000
	19	Turunen2004
5.74 – 129.31	33.66	Xing2015

⁴⁵⁷ présent

⁴⁵⁸ Dans cette approche on estime les flux actuels de carbone entrant et sortant de
⁴⁵⁹ l’écosystème afin de déterminer un bilan. Un certain nombre de flux de carbone sont
⁴⁶⁰ présent au sein des écosystèmes terrestre (équation (1.1))

$$BCNE = \frac{dC}{dt} = \overbrace{PPB - Re}^{ENE} - F_{COD} - F_{COP} - F_{CH_4} - F_{CID} - F_{COV} - F_{CO} \quad (1.1)$$

⁴⁶¹ — ENE : Échange Net de l’Écosystème

⁴⁶² — PPB : Production Primaire Brute

⁴⁶³ — Re : Respiration de l’Écosystème

⁴⁶⁴ — F_{COP} : Flux de Carbone Organique Dissous

⁴⁶⁵ — F_{COP} : Flux de Carbone Organique Particulaire

⁴⁶⁶ — F_{CH₄} : Flux de Méthane

⁴⁶⁷ — F_{CID} : Flux de Carbone Inorganique Dissous

⁴⁶⁸ — F_{COV} : Flux de Composés Organique Volatils

⁴⁶⁹ — F_{CO} : Flux de Monoxyde de Carbone

⁴⁷⁰ Les bilans les plus complets réalisées sur les tourbières comprennent la partie ga-

⁴⁷¹ zeuse, dissoute...

1.2. Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants

⁴⁷² Dans les tourbières, les flux de CO₂ sont généralement les plus importants (**Réf**

⁴⁷³ **needed**), puis les flux de CH₄ et/ou de COD et enfin les flux de COP.

⁴⁷⁴ Pour estimer ces flux différentes techniques existent, notamment l'eddy covariance

⁴⁷⁵ et les méthodes de chambre pour les flux de gaz.

⁴⁷⁶ D'autres méthodes, moins souvent utilisées, existent comme l'utilisation du ratio

⁴⁷⁷ C :N (Kirk2015)

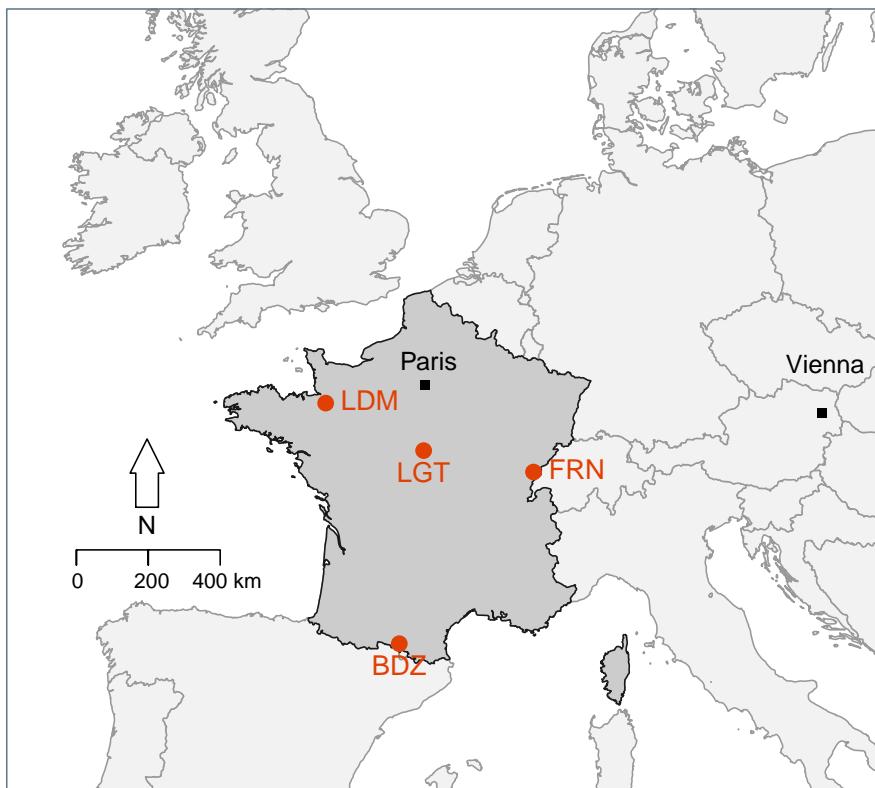
⁴⁷⁸ 2 Sites d'études et méthodologies employées

⁴⁷⁹

⁴⁸⁰	2.1 Présentation de la tourbière de La Guette	28
⁴⁸¹		
⁴⁸²	2.2 Autres sites du service national d'observation	33
⁴⁸³		
⁴⁸⁴	2.3 Mesures de flux	34
	2.3.1 Présentation des méthodologies possibles	34
⁴⁸⁵	2.3.2 Les mesures de CO ₂	35
⁴⁸⁶	2.3.3 Les mesures de CH ₄	37
⁴⁸⁷	2.3.4 Le calcul des flux	38
⁴⁸⁸	2.4 Facteurs contrôlants	39
⁴⁸⁹		
⁴⁹⁰	2.4.1 acquisitions automatisées	39
⁴⁹¹		

492 2.1 Présentation de la tourbière de La Guette

493 Le site d'étude, la tourbière de La Guette, est l'un des quatre sites du service
494 national d'observation des tourbières (SNOT) qui vise à étudier la fonction puits de
495 carbone des tourbières tempérées notamment vis-à-vis des changements globaux.



BDZ: Bernadouze (1400 m), FRN: Frasne (840 m),
LDM: Landemarais (155 m), LGT: La Guette (145 m)

FIGURE 2.1 – Site d'études SNO

496 La tourbière de La Guette est située à Neuvy-sur-Barangeon, en Sologne, ($N\ 47^{\circ}19'44''$,
497 $E\ 2^{\circ}17'04''$) dans le département du Cher (Figure 2.1). Le site s'étend sur une surface
498 d'une vingtaine d'hectare avec une géométrie relativement allongée 2.2. Cette surface
499 la classe parmi les plus grandes de Sologne. L'épaisseur moyenne de la tourbe est de
500 80 cm avec des maximums locaux atteignant 180 cm. La tourbière de La Guette est pro-
501 bablement topogène (**Réf needed**), formée par l'accumulation d'eau de pluie dans une
502 cuvette imperméabilisée par une couche d'argile issue d'alluvions de la rivière du même
503 nom (La Guette). Les précipitations annuelles moyennes sur le site sont de 880 mm et

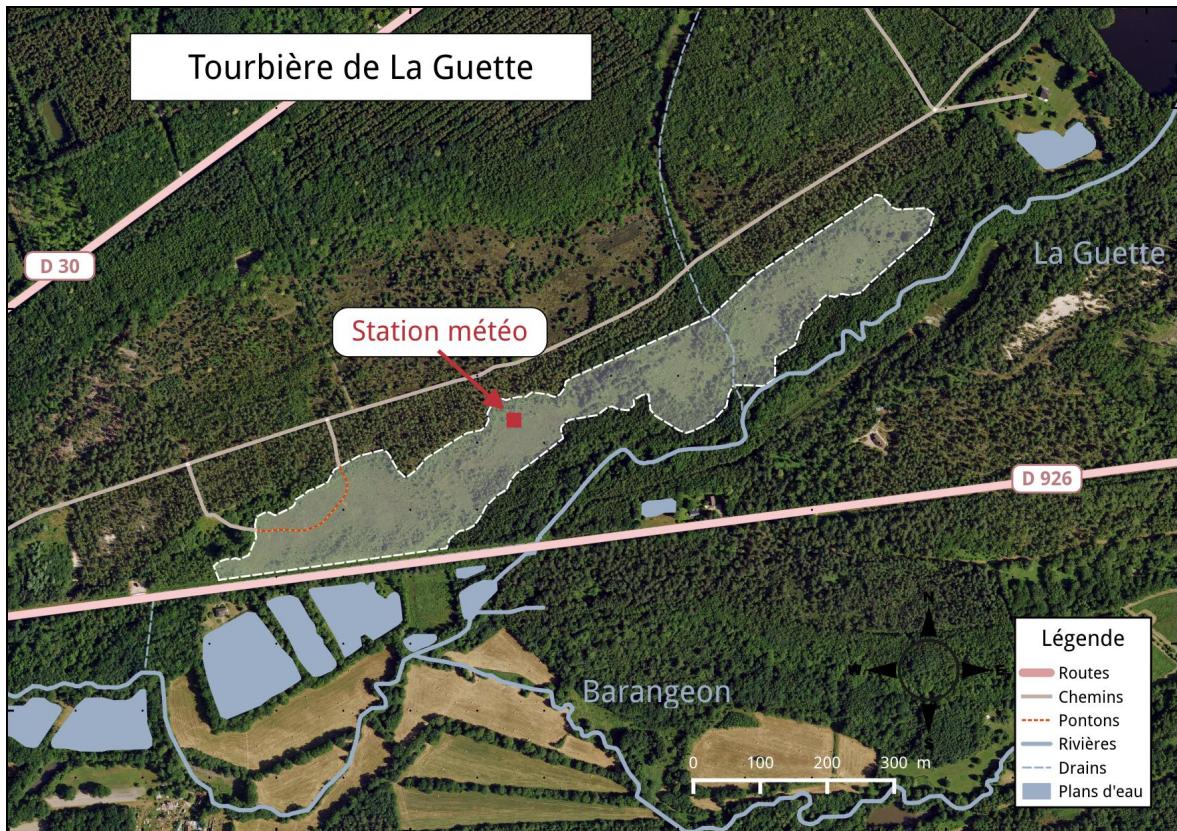


FIGURE 2.2 – Carte de la tourbière de La Guette

504 les températures moyenne annuelle de 11 °C. L'eau du site à une conductivité généra-
 505 lement inférieure à $80 \mu\text{S m}^{-2}$ et un pH compris entre 4 et 5. Ces caractéristiques classe
 506 la tourbière parmi les tourbières minérotrophes pauvres en nutriments (*poor fen*). Les
 507 datations effectuées sur le site permettent de dire que les premiers dépôts tourbeux
 508 remontent à environ 5 à 6000 ans.

509 Le site a subi un certain nombre de perturbations au cours de son existence. D'abord
 510 la construction d'une route, avant 1945, qui coupe l'extrémité sud de la tourbière
 511 favorisant son drainage. Le site est également brûlé par un incendie en 1976. En 1979
 512 des pins noirs (*Pinus nigra*) sont plantés au nord du site. Enfin 2008 le récurage du
 513 fossé de drainage bordant la route semble entraîner une augmentation significative des
 514 pertes d'eau du système.

515 Ces perturbations, ou au moins une partie d'entre elles, ont probablement favorisé
 516 l'envahissement du site par une végétation vasculaire, notamment arborée et composée
 517 de pins (*Pinus sylvestris*) et de bouleaux (*Betula verrucosa* et *pubescens*). [Viel et al.](#)

2.1. Présentation de la tourbière de La Guette

518 (2015) a pu calculé, grâce à l'étude de photos aérienne, la vitesse de fermeture du site,
519 entre 1945 et 2010, estimée à $2020 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$ avant l'incendie de 1976 et à $3469 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$
520 après. La tourbière est également envahie de façon importante par la molinie bleue
521 (*Molinia caerulea*) de la famille des *Poaceae* (Figure 2.3c). Leur présence favorisant la
522 dégradation des matières organiques (Gogo *et al.*, 2011). Sont également présentes sur
523 le site un certain nombre d'espèces caractéristiques des tourbières comme les sphaignes,
524 principalement *Sphagnum cuspidatum* et *Sphagnum rubellum*, qui forment des tapis.
525 Un tapis de sphaignes en cours de formation est visible sur la photo 2.3a. Sur cette
526 même photo sont également visible des Linaigrettes à feuilles étroites (*Eriophorum*
527 *angustifolium*), une plante de la famille des *Cyperaceae* caractéristique des marais et
528 des landes tourbeuses (Rameau *et al.*, 2008). Des bruyères sont également présentes de
529 façon importante sur le site avec notamment *Erica tetralix*, parfois appelée la Bruyère
530 des marais, de la famille des *Ericaceae* (Figure 2.3b). De la même famille est présente
531 sur le site, mais de façon moins omniprésente, la Callune (*Calluna vulgaris*). L'ensemble
532 de ces espèces tendent à préférer les milieux riches en matières organiques et pauvres
533 en nutriment (tela-botanica). D'autres espèces sont présentes sur ce site notamment,
534 *Rhynchospora alba* de la famille des *Cyperaceae*, *Juncus bulbosus*(image annexe ?),
535 de la famille de *Juncaceae*, et des Droséras, une plante insectivore, de la famille des
536 *Droseraceae* (Annexe A, Figure 1a) .

537 Au cours des dernières années, les précipitations sont relativement différentes avec
538 deux années plus sèche que la moyenne avant 2013 et deux années plus humide en 2013
539 et 2014 (Figure 2.4). On observe également cette dualité au niveau du niveau de la
540 nappe. Avant 2013 les étés sont marqués par des étiages important avec des baisses du
541 niveau de nappe allant jusqu'à -60 cm en 2012 (Figure 2.5). Après 2013, les étiages
542 sont beaucoup moins importants sur le site (Figure 2.6). Les variations inter-annuelles
543 de la température moyenne de l'air semblent moins marquées. L'année 2011 est très
544 proche de 2014 avec une température moyenne supérieure à 11 °C. De la même façon
545 les années 2012 et 2013 sont très proche avec des température moyenne inférieure à
546 10 °C.



(a) *Sphagnum – Eriophorum austifolium*



(b) *Erica tetralix – Molinia caerulea*



(c) *Molinia caerulea*

FIGURE 2.3 – Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure.

2.1. Présentation de la tourbière de La Guette

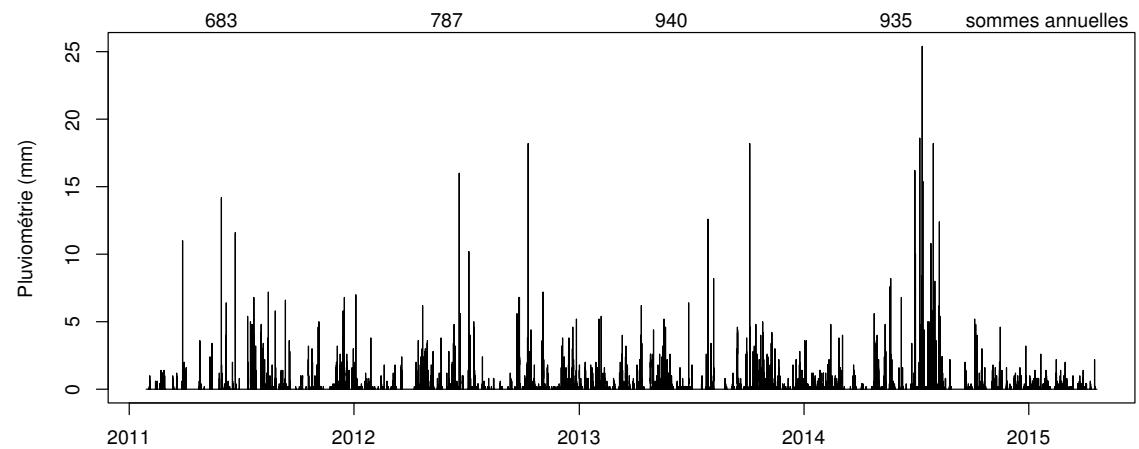


FIGURE 2.4 – Évolution du niveau de la pluviométrie, en mm, des années 2011 à 2014

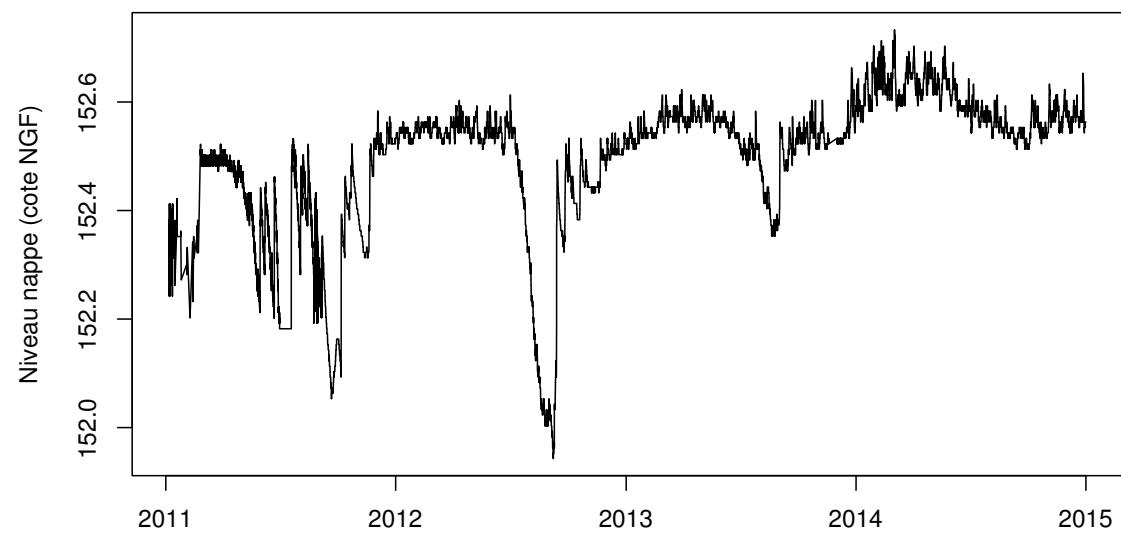


FIGURE 2.5 – Évolution du niveau de la nappe, en cm par rapport à la surface, des années 2011 à 2014

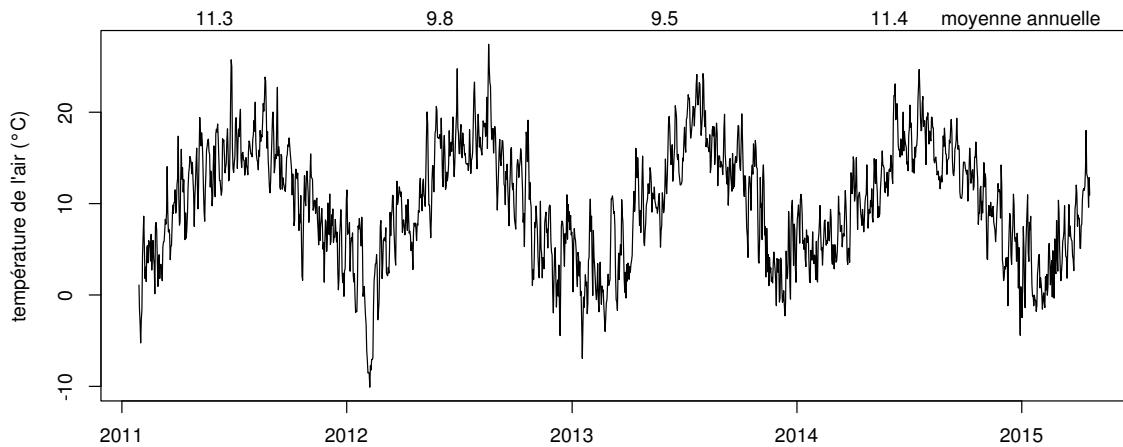


FIGURE 2.6 – Évolution de la température de l'air (en °C) des années 2011 à 2014

547 2.2 Autres sites du service national d'obser- 548 vation

549 Bien que moins étudiés, les autres sites du SNOT, Bernadouze, Frasne et Landema-
550 rais ont également fait l'objet d'un suivi ponctuel en 2013. La tourbière de Bernadouze
551 est situé à 1400 m dans les Pyrénées, en Ariège (N 42°48'09'', E 1°25'24''). Elle est
552 relativement petite avec 3,75 ha seulement. La tourbière de Frasne est situé à 840 m
553 dans le Doubs et s'étend sur une surface de 98 ha. Enfin la tourbière de Landemarais
554 est située en Ille-et-villaine, à 154 m et s'étend sur 23 ha. les températures annuelles
555 moyennes sur ces trois sites sont respectivement de 6, 7,5 et 11 °C. les précipitations
556 annuelles étant de 1700, 1400, 870 mm.

557 Au sein de ses sites de nombreuses mesures ont été effectuées et notamment des
558 mesures de flux de GES notamment le CO₂ et le CH₄. La méthodologie utilisée pour
559 les mesurer étant transverse aux différentes expérimentations elle sera détaillée dans
560 ce chapitre.

₅₆₁ 2.3 Mesures de flux

₅₆₂ 2.3.1 Présentation des méthodologies possibles

₅₆₃ De nombreuses techniques permettent de mesurer des flux de gaz, avec en premier
₅₆₄ lieu les méthodes de chambres.

₅₆₅ Les chambres peuvent être ouvertes, c'est à dire que la mesure se fait lorsque le
₅₆₆ gaz à l'intérieur de la chambre à l'équilibre avec celui à l'extérieur, ou fermées, dans
₅₆₇ ce cas le gaz à l'intérieur de la chambre n'est pas à l'équilibre avec celui à l'extérieur.
₅₆₈ Elles peuvent également être dynamique, lorsqu'un système de pompe, permettant
₅₆₉ notamment de transporter le gaz jusqu'à l'analyseur, est présent. Ou statique si le
₅₇₀ système est sans flux artificiel.

₅₇₁ Trois grandes techniques de chambre existent. D'abord les chambres **dynamiques**
₅₇₂ **ouvertes** qui se basent sur un état d'équilibre et mesurent une différence de concen-
₅₇₃ tration d'un gaz dont une partie passe par la chambre et l'autre non. Cette méthode
₅₇₄ nécessite un système de pompe et donc le passage d'un flux. Ensuite les chambres **dy-
namiques fermées** qui mesurent l'évolution de la concentration du gaz au sein de la
₅₇₆ chambre à l'aide d'un système de pompe permettant l'envoi du gaz dans un analyseur
₅₇₇ externe. Enfin les chambres **statiques fermées** qui mesurent également l'évolution de
₅₇₈ la concentration du gaz au sein de la chambre sans qu'un système de pompe ne soit
₅₇₉ présent. Dans ce cas soit l'analyseur est présent dans la chambre, soit des prélèvements
₅₈₀ sont fait à intervalles réguliers puis analysés par la suite en chromatographie gazeuse.

₅₈₁ Il faut noter que les dénominations anglaises de ces méthodes doit faire l'objet d'une
₅₈₂ attention particulière. *Closed chamber* par exemple est parfois utilisé pour se référer
₅₈₃ à l'état ou non d'équilibre, comme défini dans ce document, mais parfois également
₅₈₄ pour désigner les méthodes de chambre sans système de flux ce qui peut prêter à
₅₈₅ confusion [Pumpenan et al. \(2004\)](#). Souvent utilisées les dénominations *open/closed* et
₅₈₆ *dynamic/static* sont décrites dans [Luo et Zhou \(2006\)](#), une autre convention peut être
₅₈₇ rencontrée : *flow-through/non-flow-through* et *steady state/non-steady state* [Livingston](#)

588 et Hutchinson (1995)

589 Ces différentes méthodes ont divers avantages et inconvénients.

590 Ces méthodes sont souvent utilisées car elles ont un coût modeste, et sont très ver-
591 satiles ce qui permet leur utilisation dans de nombreuses situations. D'autres méthodes
592 plus globales existent comme les méthodes d'Eddy Covariance.

593 Les méthodes d'Eddy Covariance se base sur...

594 Comparaison entre les méthodes de chambre et les méthodes d'Eddy Covariance.

595 2.3.2 Les mesures de CO₂

596 Toutes les mesures de CO₂ présentées par la suite ont été faite avec les mêmes ma-
597 tériels et le même protocole. Les chambres utilisées sont en plexiglass et ont été conçue
598 (LPC2E) et fabriquées (ISTO) au CNRS. Ce sont des chambres transparentes, cylin-
599 drique, de 30 cm de diamètre et 30 cm de hauteur. Les mesures de CO₂ à proprement
600 parler ont été faite à l'aide d'une sonde Vaisala CARBOCAP® GMP 343. La sonde est
601 directement insérée dans la chambre ainsi qu'une sonde Vaisala HUMICAP® HMP 75
602 mesurant d'humidité et la température dans la chambre.

603 Avant toute mesure, des embases sont installées sur le site. Ce sont des cylindres de
604 PVC d'une hauteur de 15 cm insérés dans le sol sur 8 à 10 cm. La partie enterrée de ces
605 cylindres ayant préalablement été percée d'une quarantaine de trou afin de minimiser
606 les impacts de l'embase sur le développement racinaire et les écoulements d'eau.

607 Pour les raisons détaillée précédemment, la méthode mise en œuvre est celle de
608 la chambre statique fermée, aucun système de pompe n'est donc utilisé. la chambre
609 est posée sur l'embase, elle contient l'analyseur de CO₂ qui mesure la variation de
610 la concentration en gaz au cours du temps. Un ventilateur de faible puissance est
611 également présent à l'intérieur de la chambre afin d'homogénéiser l'air. 1 à 3 min de
612 stabilisation sont nécessaires après la pose de la chambre afin d'éviter les effets pouvant
613 y être liés. Ensuite l'enregistrement est lancé, avec l'acquisition toutes les 5 s pendant
614 5 min de la concentration en CO₂, de la température et de l'humidité. La mesure se
615 déroule donc sur une période de temps relativement courte afin de minimiser le dés-

2.3. Mesures de flux

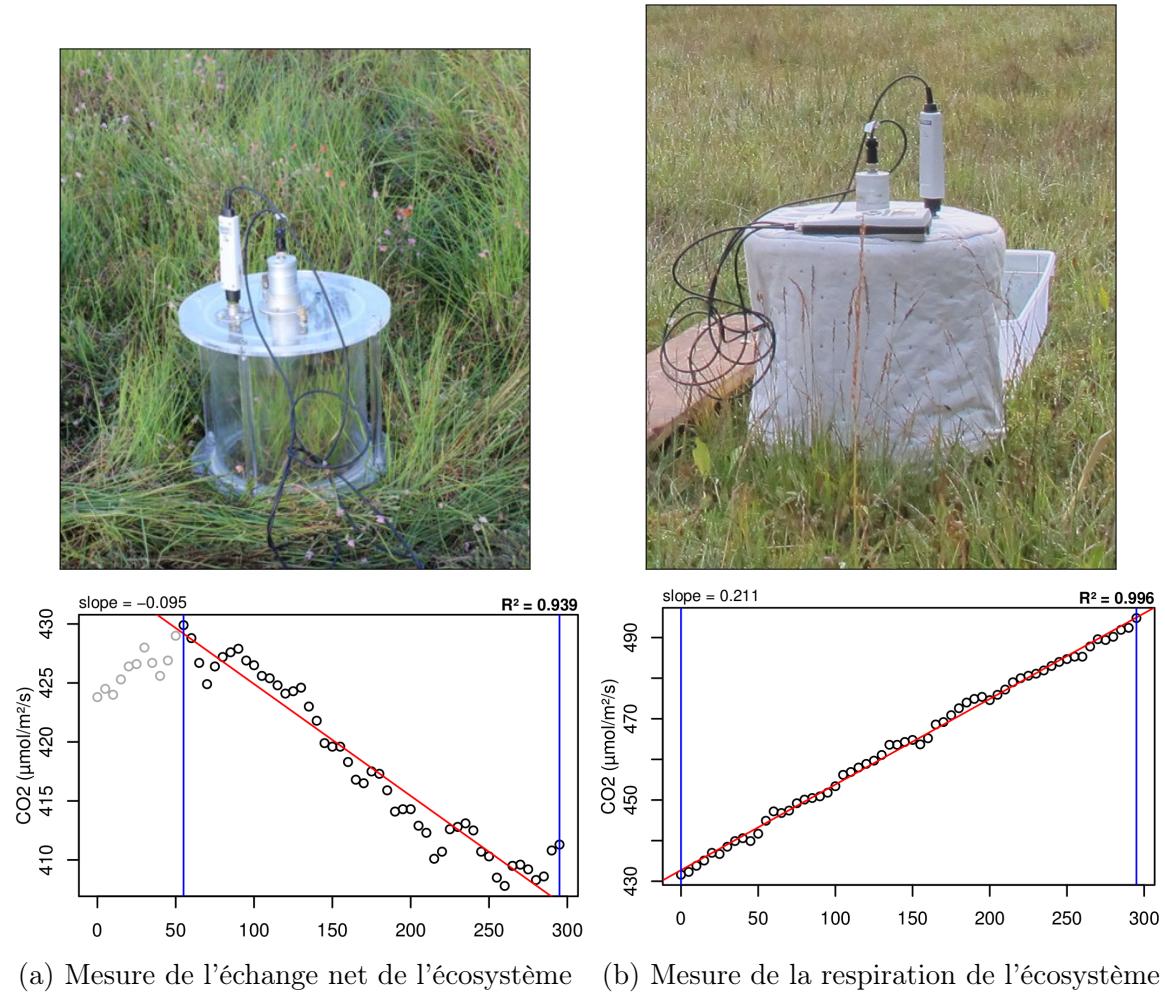


FIGURE 2.7 – Mesures de CO₂

équilibre avec le milieu extérieur. Dans ce but les mesures ont parfois été manuellement raccourcies, 2 à 3 min d'acquisition, si une pente claire se dégageait rapidement. Ceci notamment lorsque les conditions météorologiques, chaudes et ensoleillées, laissaient supposer une différence rapidement importante vis-à-vis des conditions extérieures. Généralement, deux acquisitions de CO₂ sont faites à la suite sur une même embase. La première, avec la chambre transparente nue, permettant l'enregistrement de l'ENE (Figure 2.7-a). La seconde avec la chambre recouverte d'une chaussette de tissu occultant, isolant la chambre de la lumière, permettant d'interrompre la photosynthèse et donc d'enregistrer les respirations (RE) (Figure 2.7-b).

De nombreux écueils peuvent rendre une mesure inexploitable. D'abord le placement de la chambre, cela peut sembler trivial mais positionner la chambre au milieu d'herbacées et de bruyères n'est pas toujours évident. Plus anecdotiquement des sphaignes



FIGURE 2.8 – SPIRIT

628 gelées, recouvrant les bords de l'embase rendent la pose de la chambre difficile voire
 629 impossible. Enfin selon l'heure de la journée des gradients de concentrations peuvent
 630 être présent et augmenter localement les concentrations de CO₂ de façon importante
 631 allant jusqu'à saturer la sonde.

632 Au vu du volume de données acquises et souhaitant garder l'intérêt de mesures
 633 manuelles, à savoir le contrôle humain des flux et des conditions de mesure, il a été
 634 nécessaire de développer un outil de traitement facilitant le contrôle et le calcul des flux.
 635 Ceci afin d'éviter de recourir à des seuils arbitraires (typiquement une valeur de R²)
 636 pour le contrôle qualité des données, mais également de permettre une reproductibilité
 637 et un traçage des modifications effectuées sur les données brutes. (donner des exemples)
 638 Ce travail est présenté dans l'annexe D.

639 2.3.3 Les mesures de CH₄

640 Les mesures de CH₄ ont été réalisée avec une chambre aux caractéristiques similaires
 641 à celles utilisées pour les mesures de CO₂ à l'exception de l'interface avec l'analyseur.

2.3. Mesures de flux

642 La méthode de la chambre dynamique fermée a été utilisée pour réaliser ces mesures,
643 elle diffère donc légèrement de celle utilisée pour le CO₂ puisqu'elle nécessite la mise en
644 oeuvre d'un système de pompe pour transporter le gaz jusqu'à l'analyseur. Les mesures
645 de concentration en CH₄ ont été réalisée à l'aide du SPIRIT (Figure 2.8).

646 C'est un SPectrometre Infra Rouge In-situ Troposphérique développé par le LPC2E.
647 La spectrométrie infra-rouge se base sur la mesure de l'absorption d'un rayonnement
648 infrarouge par des molécules conduisant Cet instrument profite de l'expertise acquise
649 par le laboratoire dans le domaine de la métrologie infra-rouge, notamment avec le
650 développement de son ancêtre le SPIRALE (SPectroscopie Infra Rouge par Absorption
651 de Lasers Embarqués). Plus petit et plus léger (100 kg), le SPIRIT a été développé
652 en différentes versions, fonction des usages. Il existe actuellement une version sol et
653 une version avion de l'appareil. Les capacités du SPIRIT sont principalement liées
654 à deux éléments. Premièrement l'invention d'une cellule à réflexion multiple par le
655 LPC2E ([Robert, 2007](#)), permettant d'adapter facilement la longueur du parcours op-
656 tique en fonction de la concentration des gaz à mesurer. Deuxièmement l'utilisation de
657 lasers à cascades quantique (QCL), dont la puissance permet d'augmenter le nombre
658 de réflexion et la sensibilité des mesures d'absorption. Les QCL installés émettent sé-
659 quentiellement dans le moyen infra-rouge (2,5 à 25 µm) (Choix dicté par l'absorbance
660 à ces longueurs d'onde d'un grand nombre d'espèce d'intérêt et l'intensité importante
661 des raies d'absorption.) et dans une fenêtre spécifique aux espèces que l'on souhaite
662 mesurer. Après son émission, le laser est divisé en deux La première partie traverse
663 une cellule de référence, contenant un gaz de concentration connue. La seconde partie
664 traverse une cellule de mesure, contenant le gaz à mesurer. Les deux parties du laser
665 débouchent finalement sur les détecteurs. Le fonctionnement détaillé du SPIRIT-sol
666 est décrit dans [Guimbaud *et al.* \(2011\)](#).

667 2.3.4 Le calcul des flux

668 Que ce soit pour le CO₂ ou le CH₄, le flux de gaz est calculé à l'aide de l'équation
669 suivante :

$$F = \frac{dX}{dt} \times \frac{P}{R \times T} \times \frac{V}{S} \quad (2.1)$$

670 Avec :

671 F : le flux en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

672 X : la concentration en gaz mesuré en $\mu\text{mol mol}^{-1}$

673 P : la pression atmosphérique en $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$

674 R : la constante des gaz parfait en $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$

675 T : la température dans la chambre en K

676 V : le volume de la chambre en m^3

677 S : la surface occupée par l'embase en m^2

678 2.4 Facteurs contrôlants

679 Afin de déterminer l'impact de facteurs contrôlants sur ces flux, mesurer les flux
 680 ne suffit pas il faut également mesurer les variables environnementales dont on pense
 681 qu'elles seront des facteurs contrôlants importants. La description des techniques et
 682 matériels communs aux différentes expérimentations utilisées est développée ci-dessous.
 683 Par contre leur mise en œuvre ou caractéristiques spécifiques, comme la fréquence des
 684 mesures, sera décrite individuellement au niveau des parties détaillant chacune des
 685 expérimentations.

686 2.4.1 acquisitions automatisées

687 Les paramètres météorologiques ont été mesurés, en un point, au centre de la tour-
 688 bière (Figure 2.2)(carte ?) à l'aide d'une station d'acquisition Campbell installée sur le
 689 site en 2008. Les variables ont été acquises à une fréquence horaire jusqu'au 20 février
 690 2014 puis toutes les demi-heures par la suite. Les paramètres enregistrés sont la pres-
 691 sion atmosphérique, l'humidité relative de l'air, la pluviométrie, l'irradiation solaire,
 692 la vitesse et la direction du vent. (détail du matos ?). Cette même station à égale-

2.4. Facteurs contrôlants

693 ment permis l'acquisition de la température de l'air et de la tourbe à -5, -10, -20 et
694 -40 cm. Installées à la même époque, quatre sondes **OTT?** de mesure du niveau de
695 la nappe d'eau permettent le suivi du niveau de la nappe dans la tourbière.

696 3 Bilan de C de la tourbière de La Guette

697

698	3.1 Introduction	42
699	3.2 Procédure expérimentale et analytique	42
700	3.2.1 Méthodes de mesure	42
701	3.2.2 Modélisation du bilan de C	44
702	3.3 Résultats	48
703	3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la tour-	
704	705 bière de La Guette	48
706	3.3.2 Sélection des modèles	54
707	3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle	
708	709 de l'écosystème	61
710	3.3.4 Variabilité spatiale du bilan	68
711	3.4 Discussion	70
712	3.4.1 Estimations des flux	70
713	3.4.2 Estimations des bilans	73
714	3.4.3 Sensibilité et limitations du bilan	73
715	3.4.4 Représentativité locale du modèle	74
716	3.4.5 Variation du bilan avec la végétation	74
717	3.4.6 perspectives	75
718		

719 3.1 Introduction

720 Parmi les écosystèmes tourbeux pour lesquels un bilan de carbone a été calculé,
721 la majorité se situe dans les hautes latitudes, en Suède (Waddington et Roulet, 2000;
722 Peichl *et al.*, 2014), en Finlande (Alm *et al.*, 1997), au Canada (Trudeau *et al.*, 2014),
723 beaucoup plus rarement à nos latitudes, Bortoluzzi *et al.* (2006) à estimer le bilan
724 de C d'une tourbière de montagne Jurassienne. Le premier objectif de ce chapitre est
725 d'établir le bilan de C de la tourbière de La Guette. L'intérêt est double, d'une part
726 car ce site est représentatif d'une grande partie des tourbières dans les perturbations
727 qu'elle subie : son drainage et son envahissement par une végétation vasculaire (cf
728 Chapitre 2). D'autre part sa position en basse latitude la place dans des conditions
729 environnementale qui, sans être identiques, peuvent se rapprocher de celles que subiront
730 d'autres écosystèmes tourbeux suite au réchauffement climatique. Le second objectif
731 est de caractériser la variabilité spatiale de ces flux de GES à travers ce bilan de C.

732 3.2 Procédure expérimentale et analytique

733 3.2.1 Méthodes de mesure

734 Mesures de flux de gaz

735 Les mesures des flux de CO₂ et de CH₄ ont été effectués en utilisant la méthode
736 décrite dans la partie 2.3. En juin 2011, 20 placettes ont été installées¹ selon un échan-
737 tillonnage aléatoire stratifié : La surface de la tourbière a été divisée selon une grille
738 de 20 mailles et un point choisi aléatoirement dans chaque maille localise chaque pla-
739 cette. Cette méthode permet de conserver un échantillonnage aléatoire tout en étant
740 assuré d'avoir une représentativité homogène du site. Les placettes, délimitées par des

1. je remercie ici Sébastien Gogo pour avoir installé ces placettes sur le terrain avant même mon arrivée.

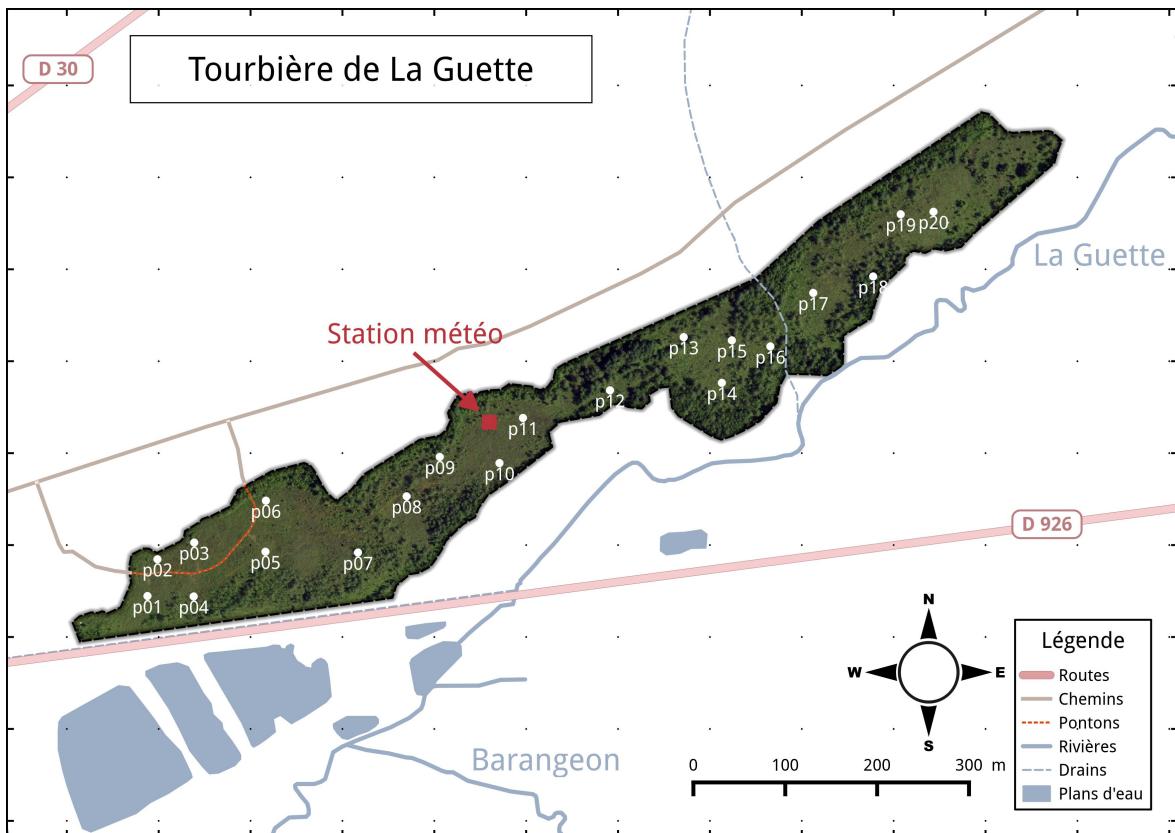


FIGURE 3.1 – Répartition des 20 placettes de mesures suivant un échantillonnage aléatoire stratifié.

741 piquets, occupaient une surface de 4 m^2 ($2\times 2\text{ m}$), à l'intérieur de laquelle ont été ins-
 742 tallé de façon permanente un piézomètre et une embase permettant la mesure des flux
 743 de gaz. Usuellement les placettes sont séparées en groupes micro-topographique, ce qui
 744 à l'avantage de permettre une distinction des capacités sources/puits relativement fine
 745 mais qui à généralement l'inconvénient du placement proche des embases les unes des
 746 autres. Elles peuvent également être séparées en zone dans la tourbière, haut-marais
 747 par rapport à bas-marais, ou réhabilité par rapport à non-réhabilité. Afin de gagner
 748 en représentativité spatiale, la taille du site le permettant, il a donc été décidé de po-
 749 sitionner des placettes sur l'ensemble du site. De plus, du fait de l'omniprésence de
 750 végétation vasculaire, et de la taille des chambres par rapport à la micro-topographie
 751 une telle approche était difficile à mettre en oeuvre.

752 Les flux de gaz mesurés sont le CO_2 et le CH_4 . Des tests effectués sur la tourbière
 753 ayant montré des émissions de N_2O nulle, ce gaz n'a pas été étudié. Les mesures de CO_2
 754 ont été effectuée de mars 2013 à février 2015, avec une fréquence quasiment mensuelle

3.2. Procédure expérimentale et analytique

755 (20 campagnes, pour 24 mois de mesure). Quand aux mesures de CH₄ ont été effectuées
756 avec une fréquence moindre (12 campagnes) principalement liée au difficulté de mise
757 en oeuvre de l'instrument SPIRIT (lourd, difficilement transportable dans un milieu
758 tourbeux).

759 Les facteurs contrôlant mesurés manuellement sont la pression atmosphérique, du
760 PAR, des températures du sol à différentes profondeurs, de la végétation. Des pré-
761 lèvements d'eau ont également été effectué chaque mois, une mesure du pH et de la
762 conductivité dans cette eau a été réalisée sur le terrain après les mesures de flux puis les
763 échantillons ont été congelés avant d'être analysé en terme de concentration de carbone
764 dissous. Ces mesures nécessitant d'accéder aux placettes régulièrement, des planches de
765 bois ont été utilisées comme pontons mobiles, la dispersion des placettes sur l'ensemble
766 du site rendant impossible une installation plus permanente.

767 Les mesures automatiquement acquise via une station météo campbell sont la tem-
768 pérature de l'air, température de la tourbe à -5, -10, -20 et -40 cm profondeur,
769 vitesse et direction du vent, humidité relative de l'air, irradiation solaire, pression at-
770 mosphérique.

771 3.2.2 Modélisation du bilan de C

772 Estimation du bilan et variabilité temporelle

773 Afin de calculer le bilan de carbone du site il est nécessaire d'établir des modèles
774 des flux afin de pourvoir interpoler les données acquises mensuellement sur l'ensemble
775 des deux années de mesure. Pour établir ces modèles empiriques les données acquises
776 ont été moyennées par campagne de mesure. Ceci permettant, dans un premier temps,
777 de s'affranchir de la variabilité spatiale des flux pour se concentrer sur la variabilité
778 temporelle. Les relations entre flux et facteurs contrôlant ont ensuite été étudiées deux
779 à deux.

780 La RE, et l'ENE sont mesurés directement sur le terrain. Cependant afin d'établir
781 le bilan de C tout en gardant une discrimination entre flux d'entrée et de sortie la RE et

782 la PPB (obtenue grâce à l'équation $PPB = ENE - RE$) ont été modélisé séparément.
783 Les flux en phase gazeuse ont été modélisé en partant d'équations usuellement utilisées
784 et dans lesquelles la température est le facteur contrôlant majeur. Puis les résidus² de
785 ces modèles de base ont ensuite été étudiés en fonction des facteurs de contrôle restant.
786 Dans le cas où une tendance est visible, le facteur est intégré.

787 Les modèles ont été comparés avec différents indicateurs, principalement Le R², la
788 NRMSE et l'AIC. Le R² est utilisé comme indicateur de la proportion de la variabilité
789 des données expliquée par le modèle, sa valeur est comprise entre 0 et 1. La RMSE
790 et sa normalisation par la moyenne NRMSE sont utilisés comme indicateur de l'écart
791 entre les données mesurées et les données modélisées. L'AIC (Akaike...) permet de dé-
792 terminer si l'amélioration d'un modèle suite à l'ajout d'un paramètre est suffisamment
793 intéressante pour que ce modèle plus complexe soit utilisé.

794 La température a été choisie comme base de départ à la construction des modèles
795 de RE et PPBsat, à la fois car c'est le facteur de contrôle le plus souvent invoqué et
796 à la fois car les corrélations avec les flux étaient les plus forte. Concernant la respi-
797 ration de l'écosystème, les températures utilisées dans la littérature sont variables. La
798 température qui semble le plus utilisée est la température du sol à -5 cm (Ballantyne
799 *et al.*, 2014)(Réf needed), même si d'autres, notamment la température de l'air et la
800 température du sol à -10 cm le sont également régulièrement (Bortoluzzi *et al.*, 2006;
801 Kim et Verma, 1992). Cette profondeur, -5 cm, est régulièrement utilisée car c'est
802 dans la tourbe, proche de la surface qu'est produite la majorité du CO₂. **production**
803 **CO2 ? profils ?** C'est également à des profondeurs relativement faibles que se situent
804 la majorité des racines (Réf needed) qui peuvent contribuer à la respiration du sol
805 (**de l'écosystème ?**) pour 35 à 60 % (Silvola *et al.*, 1996; Crow et Wieder, 2005). La
806 RE est estimée directement à partir des données acquises moyennées en partant de la
807 température connue pour contrôler une grande partie de ce flux. Différents modèles ont
808 été testés parmi les plus souvent utilisés (linéaire, exponentiel, arrhénius).

809 Pas de consensus clair émerge de la littérature quant aux facteurs prépondérants

2. Valeurs moyennes - Valeurs moyennes estimées

3.2. Procédure expérimentale et analytique

810 dans le contrôle du CH₄. La température, peut être utilisée (Alm *et al.*, 1999; Bubier
811 *et al.*, 1995), le niveau de la nappe (Bubier *et al.*, 1993) ou la végétation (Bortoluzzi
812 *et al.*, 2006).

813 Après cette phase de calibration, les facteurs de contrôle utilisés dans les modèles
814 ont été évalué à l'aide de données indépendantes issues d'une autre expérimentation.

815 Cette dernière est également un suivi des mêmes flux de gaz, sur le même site pendant
816 l'année 2014. Les méthodes de mesures des flux étant strictement identiques à celles
817 utilisées pour établir le bilan de carbone. En revanche le positionnement des placettes
818 est beaucoup plus standard avec 4 placettes dans une station en amont et 4 en aval
819 (plus de détails dans l'annexe XXX). On ne parle pas ici de validation car les données
820 utilisées bien qu'indépendante du jeu de données utilisé pour la calibration n'ont pas
821 été acquise suivant un protocole identique, notamment au niveau de la répartition des
822 embases sur le site.

823 Enfin les facteurs contrôlants ont été interpolés au pas de mesure de la station
824 météo présente sur le site, c'est-à-dire à l'heure. L'interpolation étant soit une simple
825 interpolation linéaire entre les données mensuelles, soit une relation avec les facteurs
826 acquis par la station météorologique. À l'aide de ces interpolations et des équations les
827 flux ont ensuite été recalculés, à l'échelle horaire, sur les 2 années de mesure puis les
828 flux ont été sommés afin de calculer les bilans.

829 Étude de la variabilité spatiale

830 Deux approches ont été testées afin de caractériser la variabilité spatiale des flux et
831 du bilan. La première consiste à calibrer par placette les modèles sélectionnés lors de la
832 modélisation à l'échelle de l'écosystème. Cette opération permet ainsi calculer des flux
833 par placette et éventuellement un bilan. L'inconvénient de cette méthode étant le faible
834 nombre de points permettant la calibration des modèles conduisant éventuellement à
835 une forte erreur sur l'estimation des paramètres voire à la non convergence des modèles.
836 La seconde approche permet de palier en partie à ce souci en faisant des groupes de
837 placette. Ces ensembles de placette ont été fait en regroupant les placettes ayant la

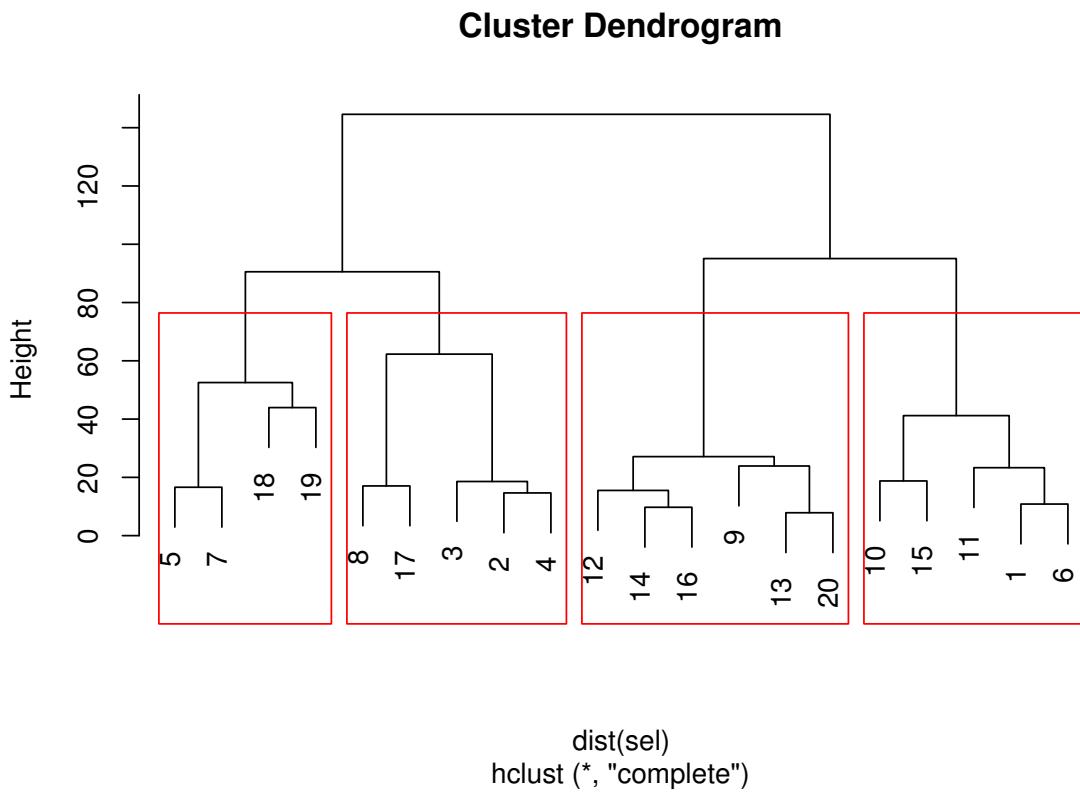


FIGURE 3.2 – Partitionnement des placettes en fonction de leur similarité en termes de composition végétale (pourcentage des strates muscinales, herbacées et arbustives)

composition végétale la plus proche. Ce choix se justifie par le fait que la végétation joue un rôle important tout en étant délicate à prendre en compte. La température, plus facile à mesurer et le niveau de la nappe, qui n'a que peu varié, semblait des choix moins pertinent. Le partitionnement a été fait via une classification hiérarchique et quatre groupes ont été déterminés (Figure 3.2).

3.3. Résultats

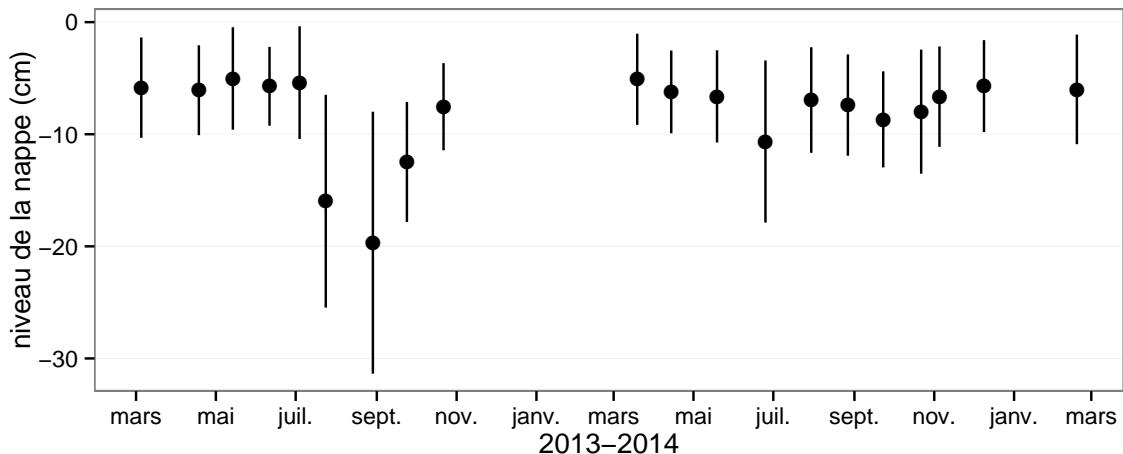


FIGURE 3.3 – Évolution du niveau de la nappe moyen des 20 embases mesuré pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

843 3.3 Résultats

844 3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la 845 tourbière de La Guette

846 Les Facteurs contrôlant

847 L'évolution du niveau de la nappe des 20 placettes, décrite dans la figure 3.3, est
848 marquée par un étiage d'une vingtaine de centimètres en moyenne en 2013 et l'absence
849 d'un étiage net en 2014 avec un niveau de la nappe moyen ne descendant que rarement
850 sous la barre des -10 cm . Ces observations sont cohérentes avec la figure 2.5 représen-
851 tant des données acquises à plus haute fréquence, et confirment la particularité de ces
852 2 années vis-à-vis des précédentes qui présentent des étiages bien plus fort.

853 La température de l'air mesurée manuellement montre une variabilité saisonnière
854 cohérente avec celle mesurées par la station météo. La variabilité saisonnière de la
855 température est également visible dans le sol avec cependant un amortissement et une
856 diminution de la variabilité avec la profondeur (figure 3.4)

857 La conductivité moyenne mesurée sur le site varie entre 35 and $55 \mu\text{S m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (fi-
858 gure 3.5).

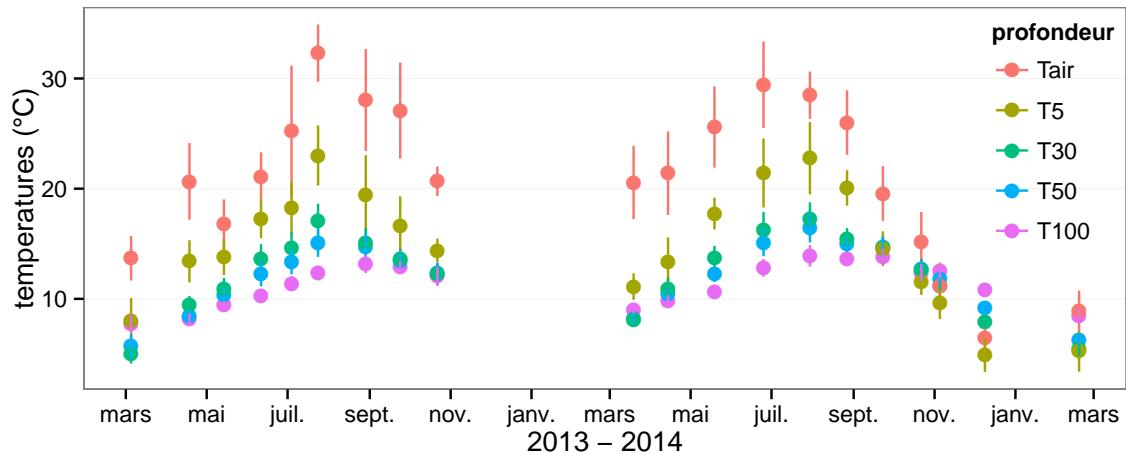


FIGURE 3.4 – Évolution des températures de l'air (Tair) et du sol à -5, -30, -50 et -100 cm (T5, T30, T50 et T100 respectivement) moyenne mesurée lors des campagnes de terrain de mars 2013 à février 2015

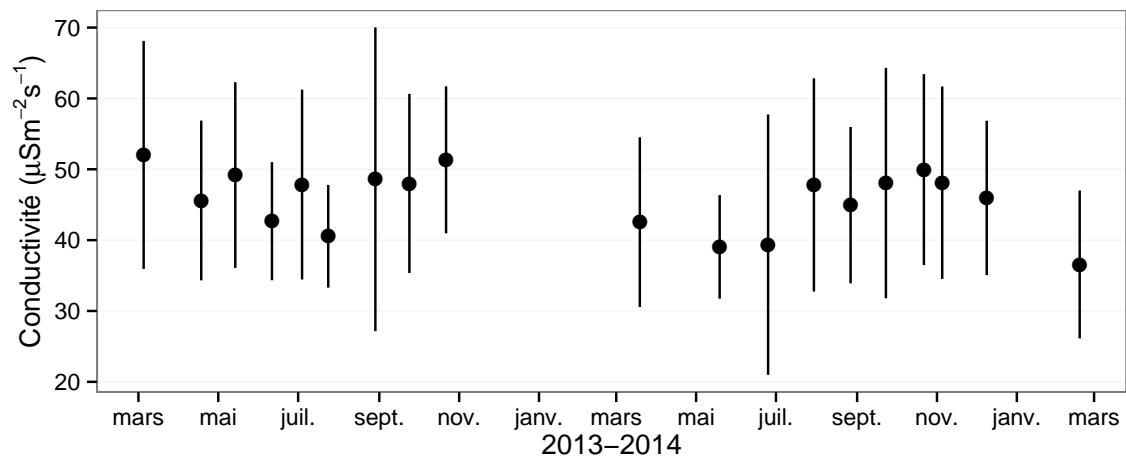


FIGURE 3.5 – Évolution de la conductivité pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

3.3. Résultats

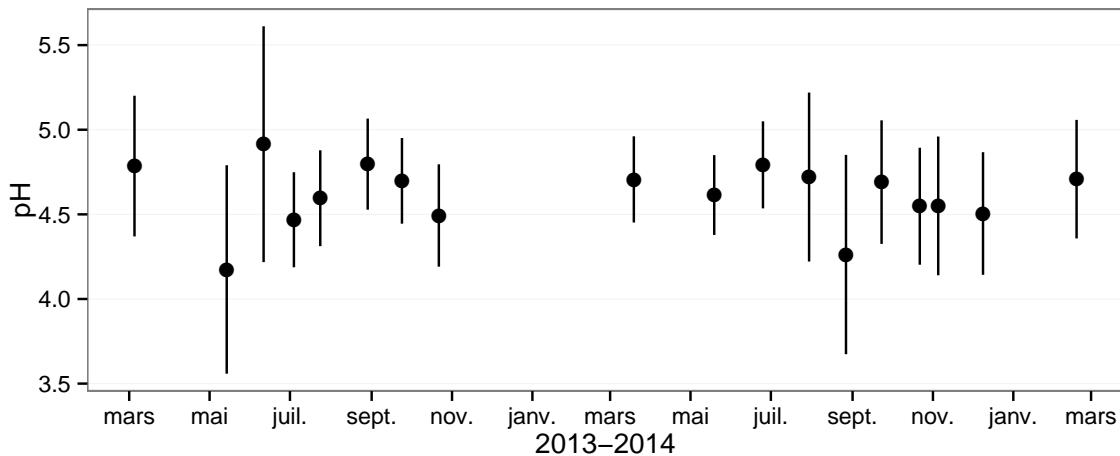


FIGURE 3.6 – Évolution du pH pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

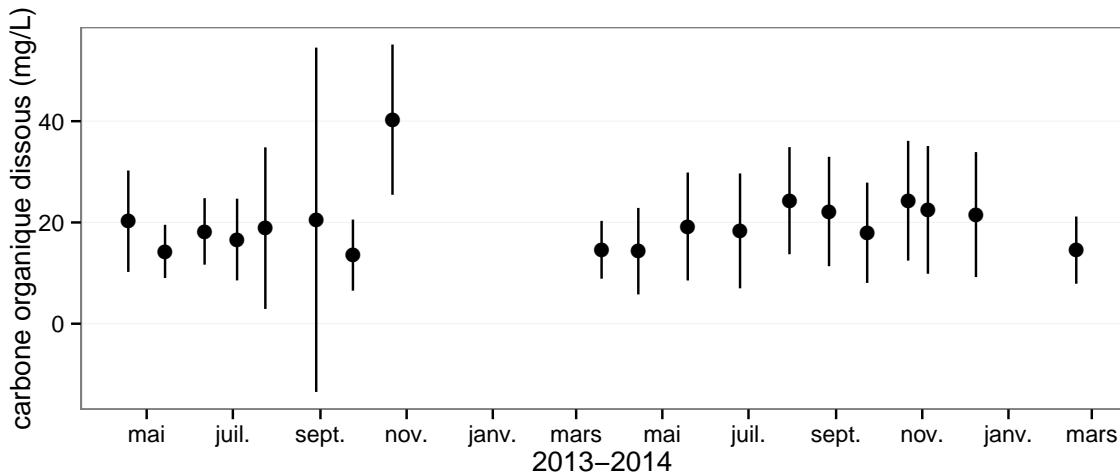


FIGURE 3.7 – Évolution de la concentration en carbone organique dissous dans l'eau du sol pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

859 En moyenne le pH mesuré sur la tourbière de La Guette est compris entre 4 et 5

860 (figure 3.6). Ces valeurs sont cohérentes avec la classification *poor-fen* du site .

861 La concentration en carbone organique dissous présente dans l'eau de la tourbière

862 est compris en moyenne entre 10 et 30 mg L⁻¹ (figure 3.7).

863 Les flux de carbone

864 L'ensemble des mesures de CO₂ s'étendent de mars 2013 à février 2015. Cepen-

865 dant de novembre 2013 à février 2014 les mesures ont été interrompue suite à des

866 pannes/casses matérielles. Malgré cela les périodes les plus critiques, notamment la

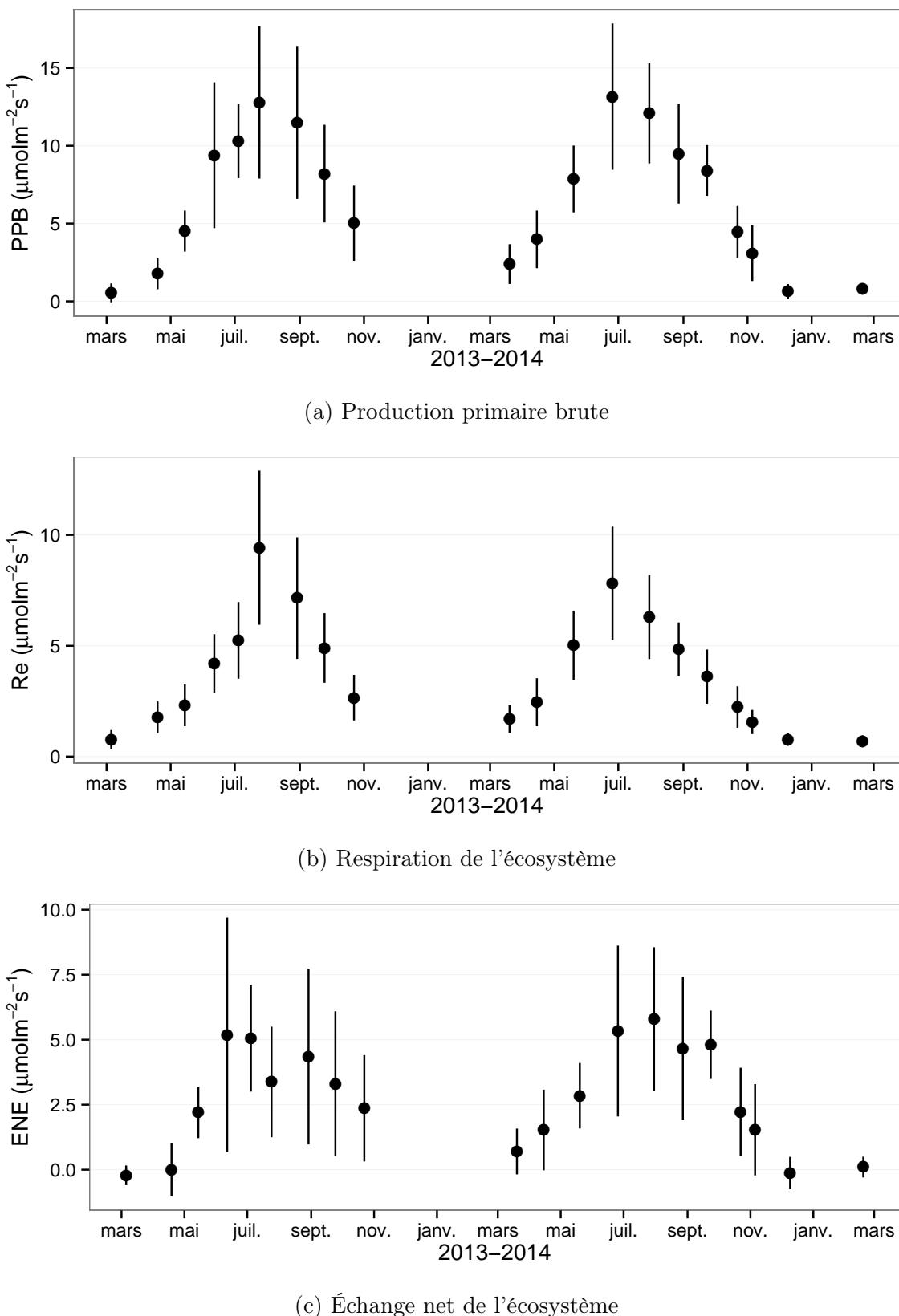


FIGURE 3.8 – Évolution du niveau de PPB, RE et ENE pendant la période de mesure. Moyenne des 20 embases de mars 2013 à février 2015.

3.3. Résultats

867 saison de végétation, ont pu être mesurées pour les 2 années, permettant d'avoir une
868 vision correcte/globale de chacune d'elle. À noter également que pour l'ensemble des
869 flux, la déviation standard augmente avec les valeurs mesurées.

870 En 2013, les valeurs de la PPB augmentent au printemps et une partie de l'été
871 avec un maximum de $12,80 \pm 4,91 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ atteint fin juillet, avant de diminuer
872 à partir d'août. En 2014 le maximum de PPB, $13,16 \pm 4,70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, est atteint
873 en juin, soit plus tôt que l'année précédente. Puis pendant l'été et l'automne les va-
874 leurs décroissent jusqu'à être proche de 0. En moyenne les valeurs de la PPB sont de
875 $7,12 \pm 5,19 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en 2013 et de $6,56 \pm 4,72 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en 2014 (Figure 3.8a).

876 La RE en 2013 augmente pendant le printemps et une partie de l'été, elle atteint
877 un maximum de $9,43 \pm 3,48 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en juillet avant de diminuer. En 2014 la RE
878 atteint, comme la PPB, son maximum plus tôt, en juin à $7,83 \pm 2,55 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ avant
879 de décroître jusqu'en hiver pour approcher des valeurs nulles. La moyenne annuelle de
880 RE en 2013 est de $4,27 \pm 3,16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, ce qui est légèrement supérieure à celle de
881 2014 : $3,63 \pm 2,56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figure 3.8b).

882 Concernant l'ENE, en 2013 elle augmente jusque $5,19 \pm 4,51 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, son
883 maximum en juin, avant de diminuer jusqu'à la fin de l'année. Cependant, cette baisse
884 est moins homogène que celle des deux flux précédents, avec notamment une augmenta-
885 tion de l'ENE entre juillet et août 2013. Ceci étant, il faut également noter les valeurs
886 importantes de la déviation standard particulièrement en juin et en août. En 2014,
887 l'ENE maximum est atteinte en juillet avec $5,79 \pm 2,77 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ avant qu'elle ne
888 décroisse. Cette baisse est cependant plus homogène qu'en 2013. les moyennes de l'ENE
889 en 2013 et 2014 sont très proches et sont respectivement de $2,85 \pm 3,05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
890 et $2,93 \pm 2,77 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figure 3.8c).

891 Le CH₄ comme le CO₂ montre une variabilité saisonnière importante, cependant
892 les flux mesurés sont un ordre de grandeur en dessous de ceux mesurés pour le CO₂
893 (Figure 3.9). À l'inverse de ce dernier, l'importance des flux de CH₄ mesurés en 2013 et
894 2014 est différente. En 2013 les flux sont moins importants qu'en 2014 avec des maximum
895 de $0,078$ et $0,196 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivement.

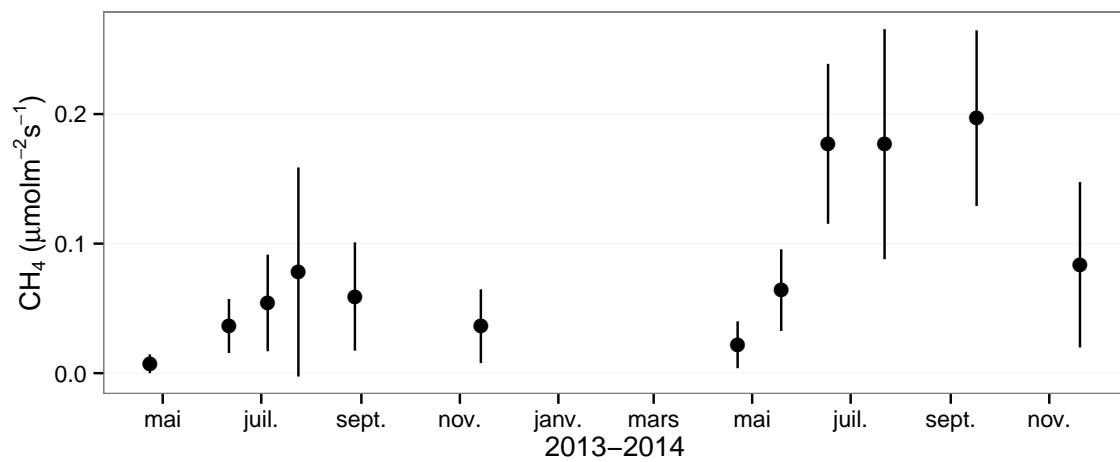


FIGURE 3.9 – Évolution des flux de méthane moyen (N ?) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

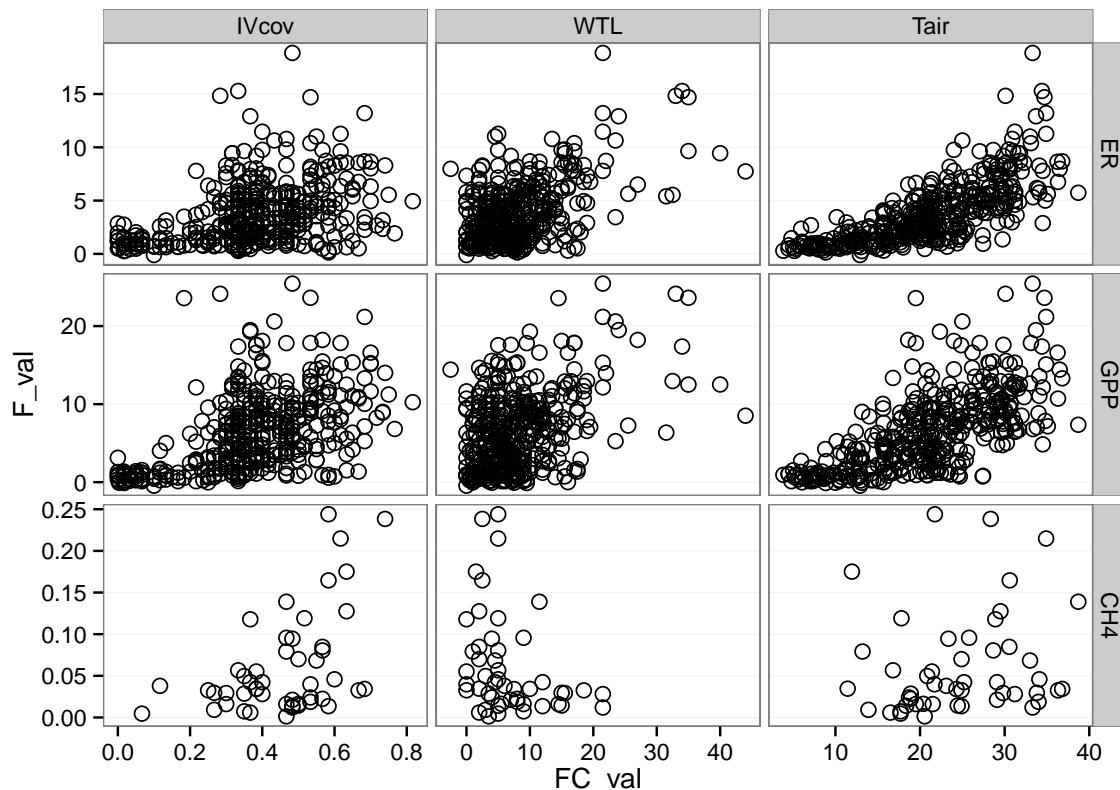


FIGURE 3.10 – Relations entre les flux de gaz et une sélection de facteurs contrôlant

3.3. Résultats

896 Les relations flux gazeux et facteurs contrôlant

897 Comme précisé précédemment, le niveau de la nappe n'a que peu varié pendant les
898 deux années de mesures. De ce fait aucune relation claire ne se distingue entre les flux
899 et le niveau de la nappe que ce soit pour le CO₂ (PPB et RE) ou le CH₄ (Figure 3.10).
900 La PPB et la RE présentent cependant des relations avec la température de l'air, et
901 l'indice de végétation, même si pour ce dernier les tendances sont moins évidentes,
902 particulièrement pour la RE. Le CH₄ quant à lui ne présente pas de relation avec la
903 température de l'air, mais une tendance exponentielle est visible vis-à-vis de l'indice
904 de végétation. (**CH₄ et Température dans la tourbe ?**)

905 3.3.2 Sélection des modèles

906 La Production Primaire Brute

907 L'estimation de la PPB se fait en deux étapes. Dans un premier temps on estime le
908 potentiel maximum de photosynthèse à un instant donné dans des conditions de lumière
909 saturante (PPBsat). Ce potentiel peut varier avec les conditions environnementales et
910 a été déterminé en utilisant l'équation de ([June et al., 2004](#)) qui relie la vitesse de
911 transport des électrons photosynthétiques à lumière saturante à la température :

$$PPBsat = a * \exp\left(\frac{T_{air} - b}{c}\right)^2 \quad (3.1)$$

912 Avec a la vitesse de transport des électrons photosynthétique à lumière saturante, b
913 la température optimale pour ce transport et c la différence de température à laquelle
914 à laquelle PBBsat vaut e⁻¹ de sa valeur à la température optimale. À partir de ce
915 potentiel à lumière saturante, la PPB est estimée en prenant en compte la lumino-
916 sité. On utilise l'équation 3.2 proposée par ([Bubier et al., 1998](#)) et régulièrement et
917 majoritairement utilisée ([Bortoluzzi et al., 2006; Worrall et al., 2009](#)) :

$$PPB = \frac{PPBsat * a * PAR}{PPBsat + a * PAR} \quad (3.2)$$

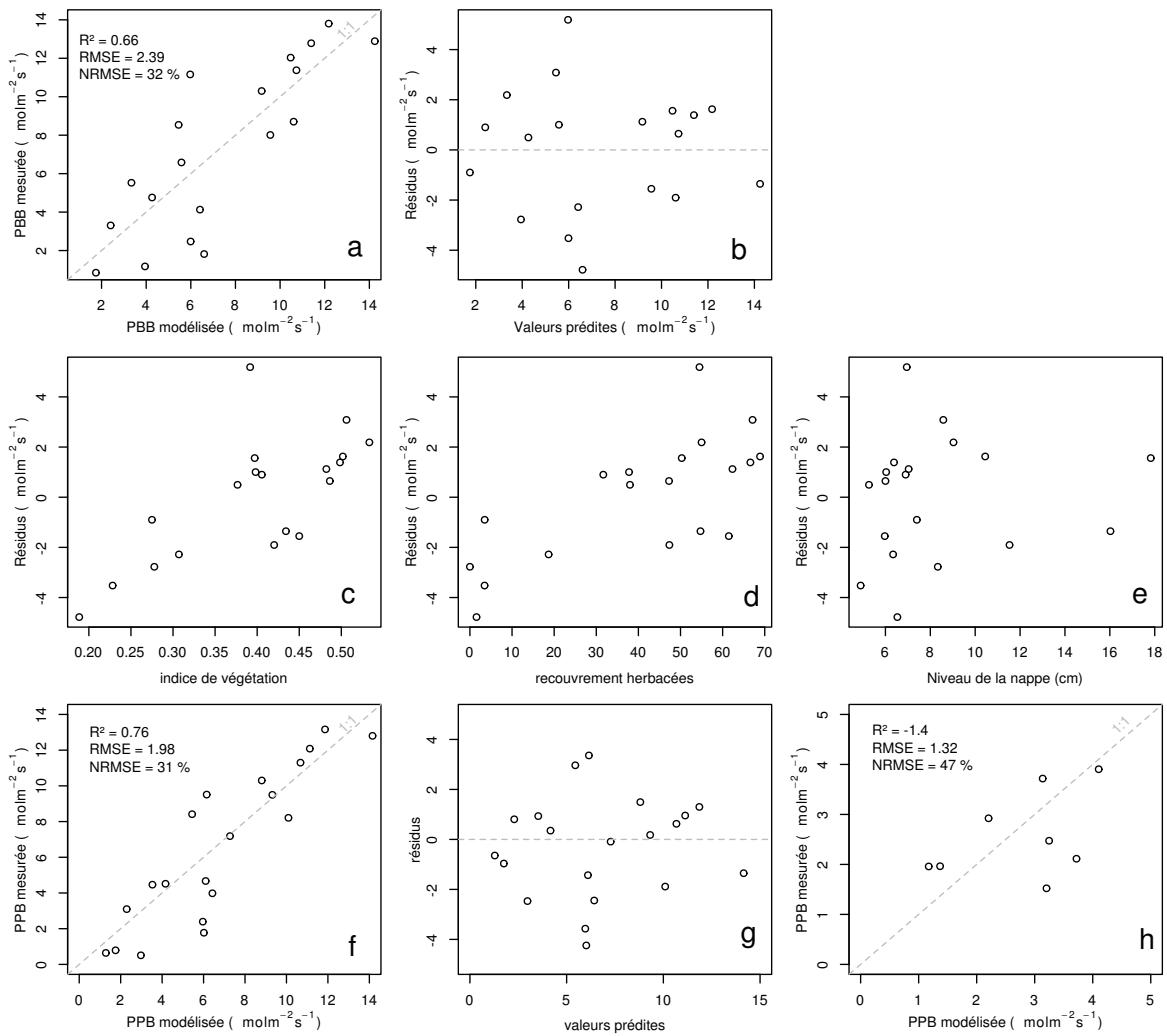


FIGURE 3.11 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.1

3.3. Résultats

918 L'utilisation de l'équation de June seule, avec la température de l'air comme variable
919 explicative de la PPBsat, permet d'expliquer 66 % des variations observées avec une
920 erreur standard de l'estimation de 32 % (Figure 3.11-a). Les résidus de ce modèle se ré-
921 partissent de façon relativement homogène et non biaisée (Figure 3.11-b). Corrélés avec
922 l'indice de végétation IV, ils présentent une tendance linéaire croissante (Figure 3.11-
923 c). On observe la même tendance avec le recouvrement de la strate herbacée avec une
924 dispersion des points plus importante (Figure 3.11-d). Par contre aucune tendance par-
925 ticulière n'est visible vis-à-vis du niveau de la nappe (Figure 3.11-e) Le recouvrement
926 des sphaignes (non présenté) ne montre également, aucune tendance avec les résidus
927 de cette équation. La PPB calculée à partir de l'équation 3.1 montre une erreur stan-
928 dard de 31 %, du même ordre de grandeur que celle de PPBsat (Figure 3.11-f) et les
929 résidus se répartissent de façon relativement homogène et non biaisée (Figure 3.11-g).
930 Cependant l'évaluation du modèle sur les données de tests montre une erreur stan-
931 dard de l'estimation plus forte qui atteint 47 % (Figure 3.11-h). Par ailleurs une forte
932 incertitude est présente concernant l'estimation des paramètres qui ont tous une erreur
933 standard importante, parfois plus importante que la valeur du paramètre, et une faible
934 significativité (Tableau 3.1). Afin de prendre en compte la tendance linéaire entre les
935 résidus et l'indice de végétation (IV) le modèle est adapté pour y intégré une fonction
936 linéaire de la végétation :

$$PPBsat = (a * IV + d) * \exp\left(\frac{T - b}{c}\right)^2 \quad (3.3)$$

937 Cette nouvelle équation permet d'expliquer une part plus importante des varia-
938 tions de PPBsat ($R^2 = 0,85$) et augmente la proximité entre les données mesurées et
939 les données modélisées : l'erreur standard diminue à 21 %. (Figure 3.12-a). Les résidus
940 de cette équation semblent répartis de façon moins homogène que précédemment. On
941 observe notamment un resserrement des points autour de zéro à l'exception d'un point
942 de valeur supérieur à 4. Le biais reste malgré tout léger au regard de l'amélioration ap-
943 portée. Aucune tendance claire ne se dégage des résidus lorsqu'ils sont mis en relation
944 avec des facteurs contrôlant tel que les recouvrements végétaux (sphaignes, herbacées),

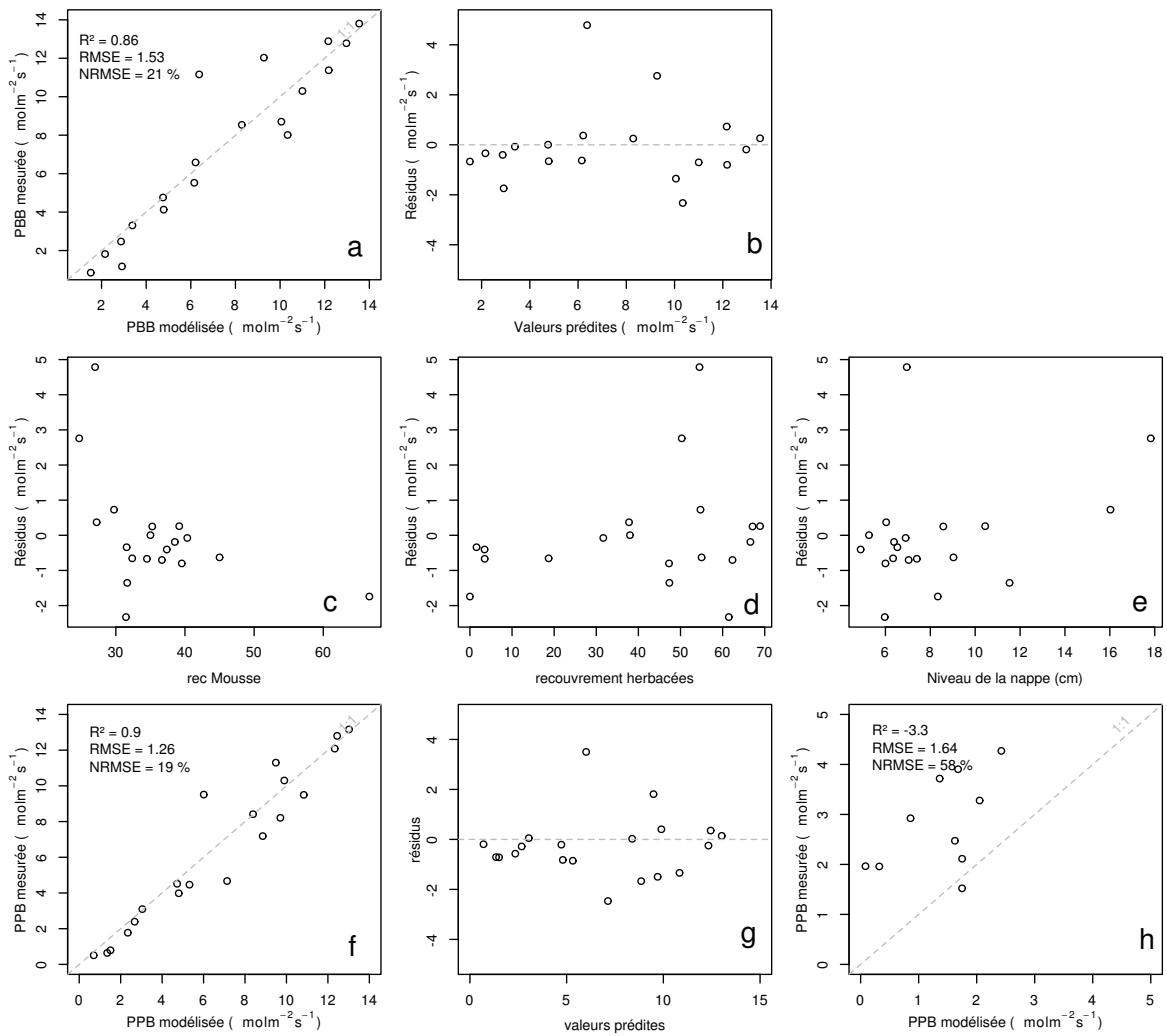


FIGURE 3.12 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.3

3.3. Résultats

ou le niveau de la nappe (Figure 3.12-c,d,e). Comme précédemment, l'erreur standard de la PPB, de 19 %, est du même ordre de grandeur que celle de PPBsat. Pour PPBsat comme pour PPB l'erreur standard diminue donc avec l'ajout de l'indice de végétation lors de la calibration. En revanche, l'évaluation sur les données de test de ce dernier modèle montre une erreur importante (58 %), supérieure à celle du modèle ne prenant pas en compte la végétation. Cette évaluation montre également une tendance importante à sous-estimer les valeurs mesurées. Néanmoins ce modèle intégrant la végétation permet de diminuer de façon importante l'erreur standard associée à l'estimation des paramètres de l'équation. Dans la suite du texte le modèle permettant d'estimer la PPB à partir des équations 3.1 et 3.2 sera nommé PPB-1 et celui utilisant les équations 3.3 et 3.2 sera nommée PPB-2.

956 La Respiration de l'Écosystème

957 L'estimation de la RE s'effectue avec l'équation :

$$RE = a * \exp(b * T) \quad (3.4)$$

958 La température de l'air utilisée dans un modèle exponentiel permet d'expliquer une
959 grande partie, 90 %, des variations de la respiration de l'écosystème avec une erreur
960 standard de 18 % (Figure 3.13–a). Les résidus de cette équation semblent répartis de façon
961 non-biaisée, pas de tendance dans le nuage de point (Figure 3.13–b). L'évaluation de
962 ce modèle montre une erreur standard de 35 % avec une tendance à sous-estimer les
963 valeurs mesurées. Une légère tendance, moins claire que pour la PPBsat, est visible
964 entre les résidus et l'indice de végétation ainsi qu'avec le recouvrement de la strate
965 herbacée. Très souvent utilisée, la température à -5 cm donne des résultats proche
966 mais moins bons notamment avec une hétéroscédasticité des résidus (**Fig Annexe ?**).
967 On adapte l'équation 3.4 pour intégrer le signal de végétation :

$$RE = (a * IV + c) * \exp(b * T) \quad (3.5)$$

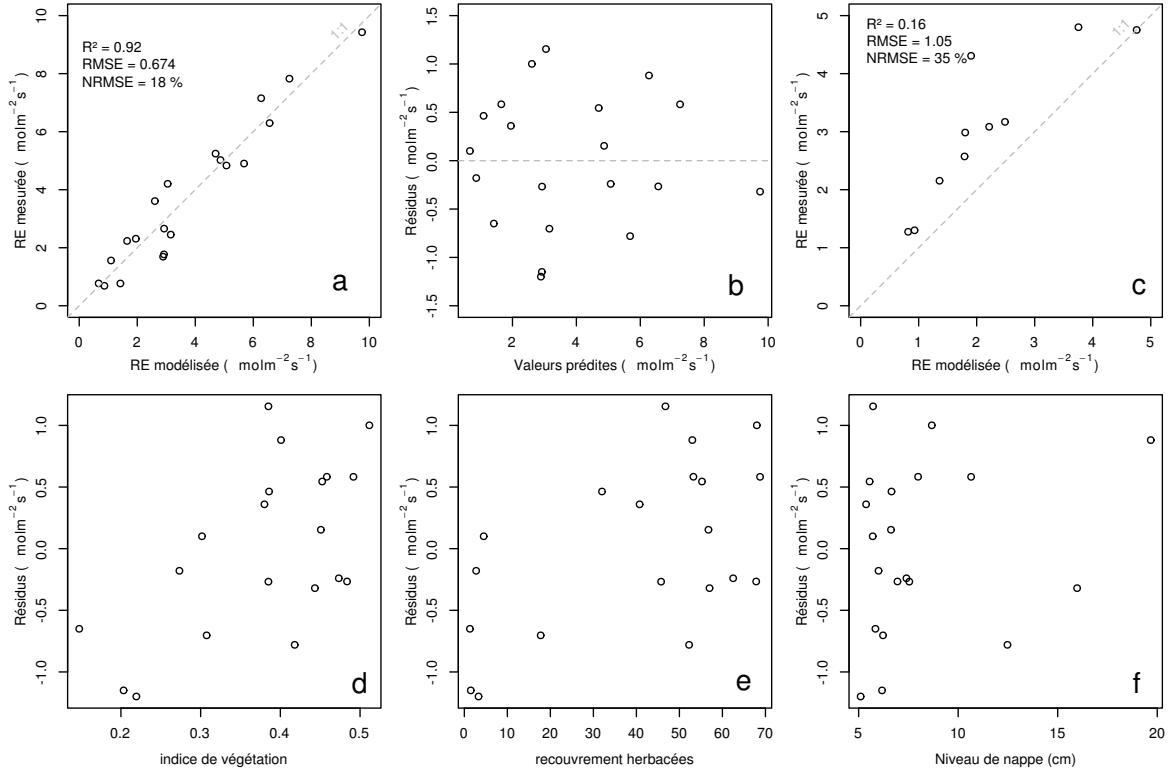


FIGURE 3.13 – RE modèles avec Tair

$$RE = (a * H + c) * \exp(b * T) \quad (3.6)$$

968 Les calibrations de ces nouvelles équations sont présentées dans la figure 3.13-a,b et
 969 3.13-d,e respectivement. Dans les deux cas, l'erreur diminue pour avoisiner 13 %, avec
 970 des résidus qui se répartissent de façon non-biaisée. L'évaluation de ces deux équations
 971 montre cependant des différences : D'un côté l'équation 3.5 ne permet pas de diminuer
 972 l'erreur standard qui vaut 34 %, et est donc très proche des 35 % calculé pour l'évalua-
 973 tion du modèle n'intégrant pas la végétation. De l'autre l'évaluation de l'équation 3.6
 974 montre une erreur standard plus faible s'établissant à 23 %. Les paramètres des diffé-
 975 rentes équations sont présentés dans le tableau 3.1, les modèles RE-1, RE-2, et RE-3
 976 correspondent respectivement aux équations 3.4, 3.5 et 3.6. À l'inverse de la PPB les
 977 paramètres des modèles de la RE ont, à l'exception du paramètre c du modèle RE-2,
 978 une significativité importante et une erreur standard faible.

3.3. Résultats

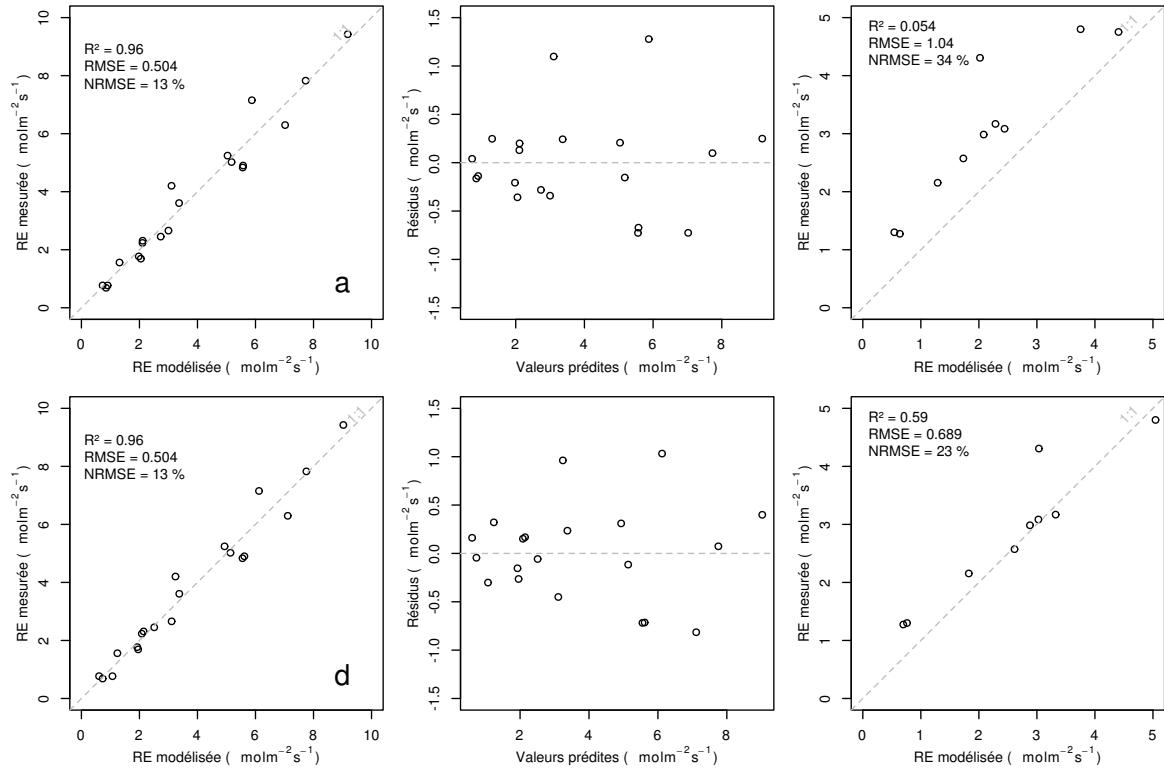


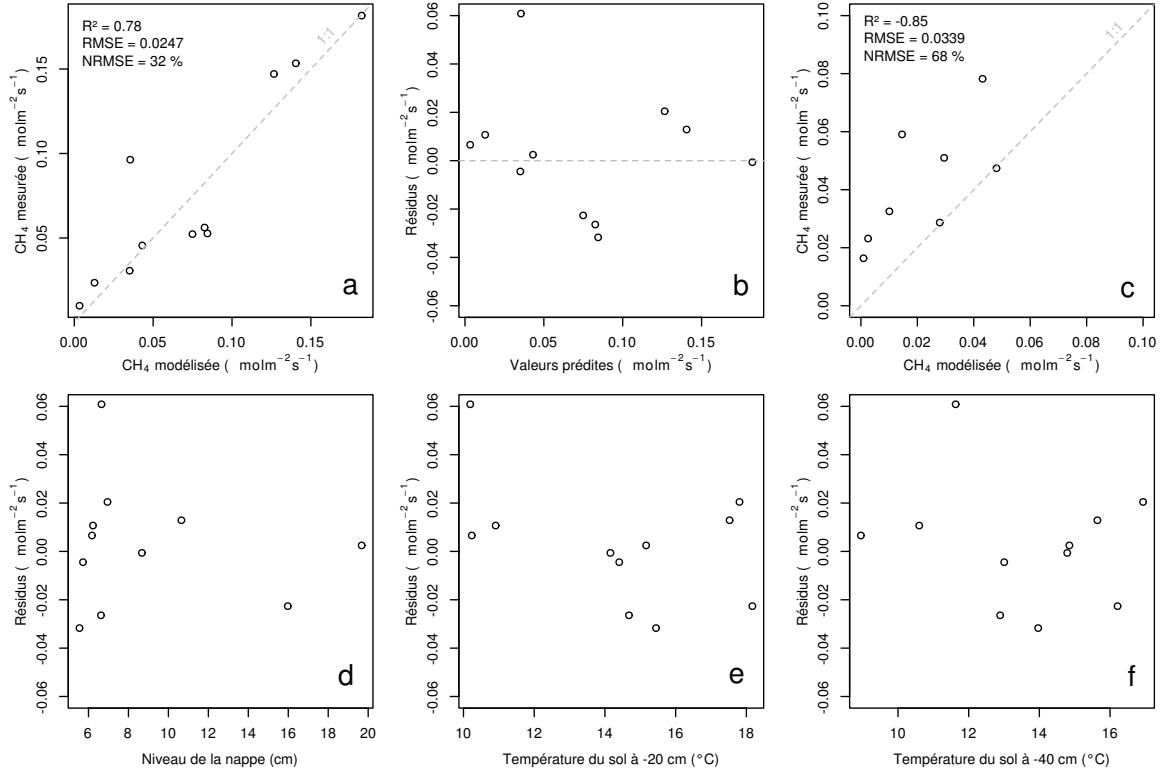
FIGURE 3.14 – RE modèles avec Tair

979 Le flux de CH₄

980 Les relations entre les facteurs contrôlant mesurés et le CH₄ sont moins claires
 981 que celles concernant le CO₂. La corrélation la plus importante semble être liée à
 982 la végétation (Figure 3.10). le méthane est également corrélé avec les températures,
 983 faiblement avec les températures de surface puis plus fortement avec les températures
 984 du sol à plus forte profondeur. Enfin il est anti-corrélé ($R=-0.51$) avec le niveau de la
 985 nappe. Les relations CH₄ et végétation ont donc pu être modélisées avec

$$F_{CH_4} = a * \exp(b * IV) \quad (3.7)$$

986 Avec les données acquises, l'indice de végétation est le meilleur prédicteur (Fi-
 987 gure 3.15), il explique 78 % de la variabilité du CH₄ avec une erreur standard de 32 %.
 988 Aucune tendance ne semble se dégager entre les résidus de cette équation et les facteurs
 989 contrôlant mesurés. L'évaluation de cette équation montre une tendance à sous-estimer
 990 les flux de CH₄ et une erreur standard qui double par rapport à la phase de calibration


 FIGURE 3.15 – CH₄ modèle H

en atteignant 68 %. Les détails de l'estimation des paramètres de l'équation 3.7 est visible dans le tableau 3.1 sous le nom FCH4.

993 Le COD

994 3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle 995 de l'écosystème

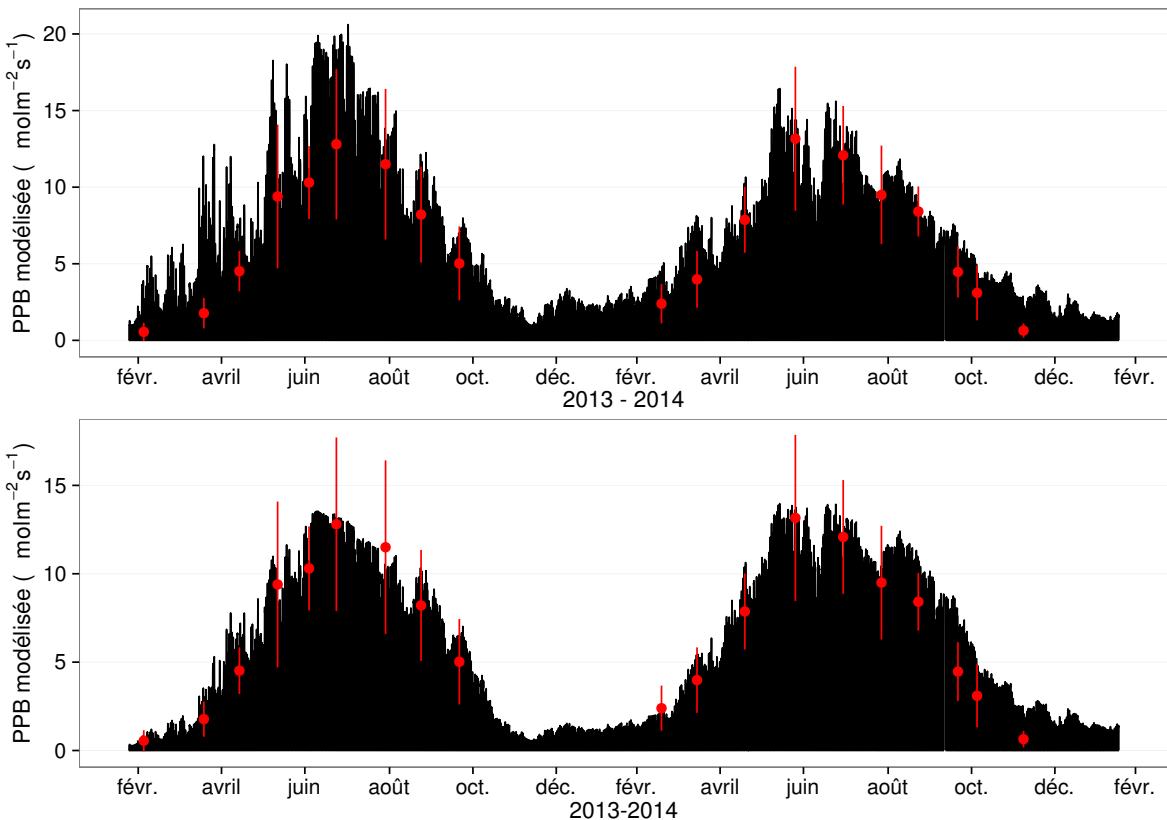
996 L'interpolation des flux de PPB montrent une variabilité saisonnière proche de celle
997 mesurée sur le terrain (Figure 3.16). Les valeurs les plus fortes mesurées ne semblent
998 pas atteinte par le modèle PPB-2 à l'inverse du modèle PPB-1. Dans les deux cas les
999 modèles semblent sur-estimer la valeur de PPB mesurées fin 2014.

1000 Pour la RE, l'interpolation suit également les variations saisonnières mesurées men-
1001 suellement (Figure 3.17). Les gammes de valeurs mesurées sont très proche des gammes
1002 interpolées. L'interpolation des flux de la RE est très proche quel que soit le modèle
1003 (Figure 3.17) utilisé. On observe que l'intégration de la végétation dans les modèles

3.3. Résultats

Tableau 3.1 – Valeur des paramètres des équations utilisées pour modéliser les flux et sensibilité relative (en %) des flux en réponse à une variation de $\pm 10\%$ de chacun des paramètres des modèles.

	par	valeur	se	pval	-10 %	+10 %
PPB-1 – équations 3.1 et 3.2						
	a	26.23	62.07	0.68	-9.7	+9.6
	b	53.68	61.27	0.39	+43.7	-35.1
	c	27.21	28.56	0.35	-22.5	+21.9
	i	1.84	21.6	0.93	-0.4	+0.4
PPB-2 – équations 3.3 et 3.2						
	a	39.44	18.89	0.05	-11.8	+11.5
	b	40.27	19.11	0.05	+15.8	-17.2
	c	25.23	14.35	0.1	-8.1	+6.7
	d	-3.73	3.49	0.3	+2.8	-2.8
	i	0.26	0.25	0.31	-1.3	+1.1
RE-1 – équation 3.4						
	a	0.34	0.08	0	-10	+10
	b	0.10	0.01	0	-22.6	+29.9
RE-2 – équation 3.5						
	a	0.92	0.34	0.02	-7.3	+7.3
	b	0.09	0.01	0.00	-19.5	24.7
	c	0.14	0.09	0.14	+2.7	-2.7
RE-3 – équation 3.6						
	a	0	0	0.01	-3.9	+3.9
	b	0.08	0.01	0	-18.8	+23.6
	c	0.33	0.06	0	-6.1	+6.1
FCH4 – équation 3.7						
	a	0	0	0.48	-10	+10
	b	13.01	2.82	0	-43.9	+79.2

FIGURE 3.16 – Flux de CO_2 interpolé à partir de PPB-1 et PPB-2

¹⁰⁰⁴ RE-2 et RE-3 diminue la RE maximum modélisée en 2013 par rapport au modèle RE-1.

¹⁰⁰⁵ Les flux de CH_4 interpolés (Figure 3.18), suivent également une cyclicité saisonnière.

¹⁰⁰⁶ L'estimation du CH_4 semble rendre compte dans les grandes lignes de la différence de
¹⁰⁰⁷ flux mesurée entre 2013 et 2014.

¹⁰⁰⁸ Les flux interpolés à l'heure puis sommés par années sont présentés dans le ta-
¹⁰⁰⁹ bleau 3.2 pour les différents modèles. Sur les deux années, selon le modèle utilisé, la
¹⁰¹⁰ PPB stocke du carbone pour 1070 à 1290 $\text{gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ pour PPB-2 et PPB-1 respecti-
¹⁰¹¹ vement. Dans le détail on observe une différence entre les deux modèles : Celui utilisant
¹⁰¹² uniquement la température de l'air (PPB-1) présente un stockage plus important en
¹⁰¹³ 2013 qu'en 2014. Tandis que le modèle prenant en compte la végétation (PPB-2) stocke
¹⁰¹⁴ moins de carbone en 2013 par rapport à 2014. L'intégration de la végétation minimise
¹⁰¹⁵ également l'erreur standard de l'estimation, la divisant approximativement par deux.

¹⁰¹⁶ La différence de comportement, entre les années de mesures, liée à l'intégration de
¹⁰¹⁷ la végétation est également visible sur l'estimation de la RE. La prise en compte de la

3.3. Résultats

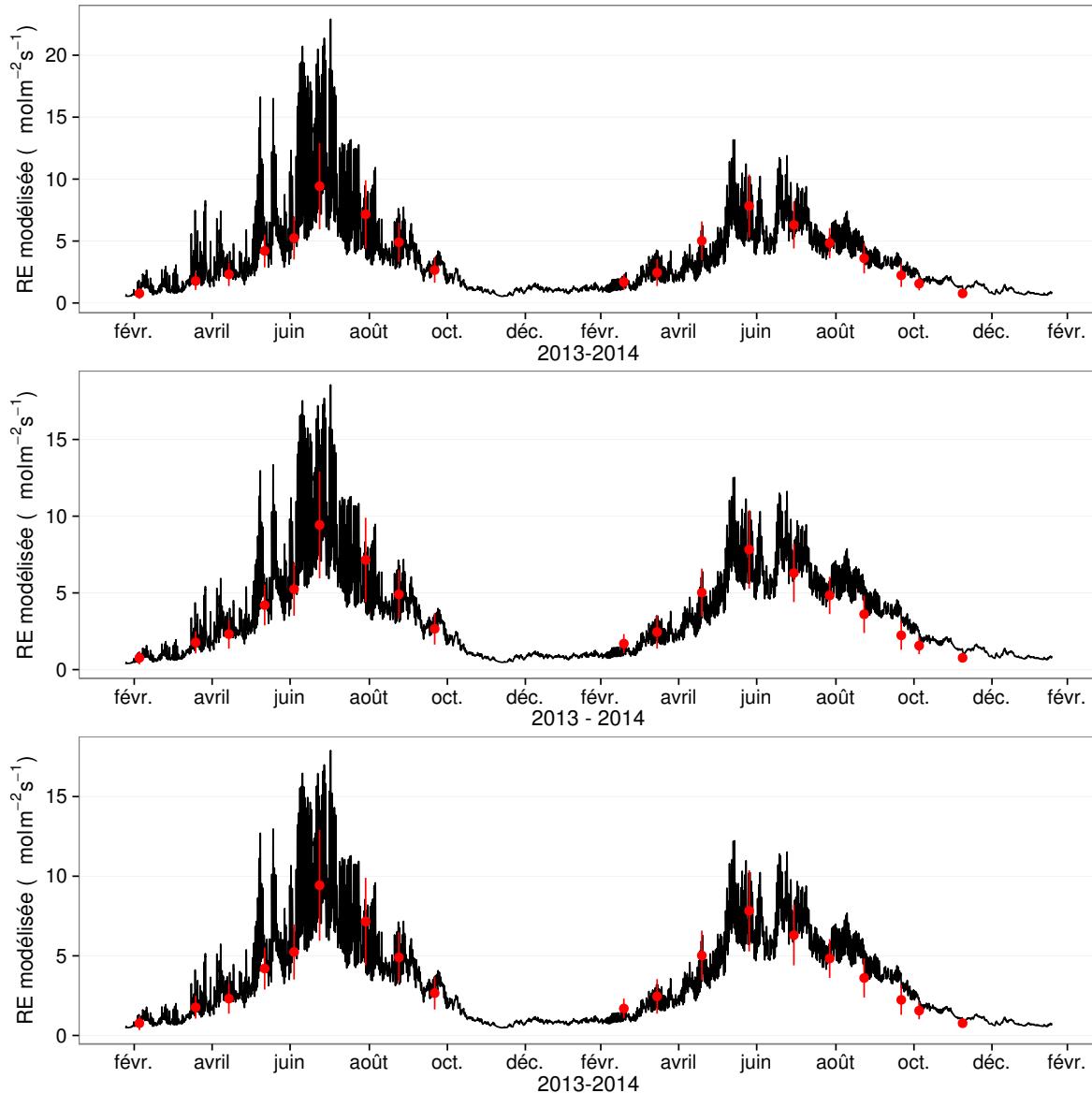


FIGURE 3.17 – Flux de CO₂ interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3

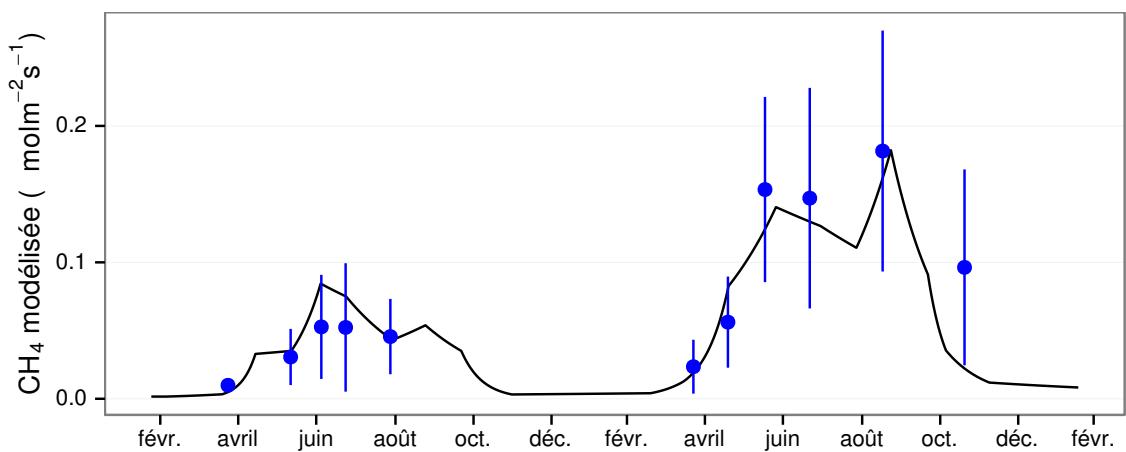


FIGURE 3.18 – Flux de CO₂ interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3

Tableau 3.2 – Bilan des flux en gCm²an⁻¹

ID	Flux	équation	2013	2014	moyen
PPB-1	PPB	3.1 et 3.2	1322 ± 410	1258 ± 390	1290 ± 400
PPB-2		3.3 et 3.2	957 ± 182	1184 ± 225	1070 ± 203
RE-1	RE	3.4	1337 ± 241	1235 ± 222	1286 ± 231
RE-2		3.5	1232 ± 160	1310 ± 170	1271 ± 165
RE-3		3.6	1240 ± 161	1281 ± 167	1261 ± 164
FCH4	CH4	3.7	10 ± 3	24 ± 8	17 ± 5

 Tableau 3.3 – Bilan des flux en gCm²an⁻¹

combinaison de modèles	2013	2014	moyen
PPB-1, RE-1, FCH4	-25	-2	-14
PPB-1, RE-3, FCH4	+72	-48	+12
PPB-2, RE-1, FCH4	-390	-75	-233
PPB-2, RE-3, FCH4	-293	-122	-208

1018 végétation (modèles RE-2 et RE-3) conduit à une respiration plus forte en 2014 qu'en
 1019 2013 à l'inverse de RE-1. La différence entre l'estimation de la RE en 2013 et en 2014
 1020 diminue avec l'intégration de la végétation. Elle passe de 102 pour RE-1 à 78 puis
 1021 41 pour RE-2 et RE-3. Malgré ces différences, on observe une grande proximité dans
 1022 les valeurs des flux interpolés sur les 2 années, quel que soit le modèle, avec un écart
 1023 maximum de 25 gC m⁻² an⁻¹.

1024 Les flux de CH₄ entachés d'une erreur importante, sont cependant beaucoup plus
 1025 faible en valeur absolue que ceux de la PPB ou de la RE. On y observe malgré tout un
 1026 flux qui fait plus que doubler en 2014 par rapport à 2013.

1027 Les bilans issus des différentes combinaisons (à l'exception de RE-3, très proche de
 1028 RE-2) de modèles sont présentés dans le tableau 3.3 et varient de -233 gC m⁻² an⁻¹
 1029 à +12 gC m⁻² an⁻¹ stocké dans la tourbière. L'intégration de la végétation dans la
 1030 modélisation de PPB fait baisser les bilans de carbone dans le négatif au-delà de
 1031 -200 gC m⁻² an⁻¹, avec une différence entre les bilans de 220 gC m⁻² an⁻¹ environ.
 1032 Cette différence sur les bilans est bien moindre, environ 26 gC m⁻² an⁻¹ entre les mo-
 1033 dèles de RE qui intègrent et ceux qui n'intègrent pas la végétation.

3.3. Résultats

Tableau 3.4 – Sensibilité relative (en %) du bilan de CO₂ (ENE) en réponse à une variation de $\pm 10\%$ de chacun des paramètres des modèles.

PPB		RE		CH ₄			
	-10 %		+10 %		-10 %		+10 %
PPB-1		RE-1		FCH4			
a	-3263	+3243	a	+3371	-3371	a	+0,05
b	+14 788	-11 859	b	+7616	-10 078	b	+0,2
c	-7597	+7398					-0,36
i	+119	-139					
PPB-2		RE-1		FCH4			
a	+59	-57	a	-60	+60	a	0
b	-78	+85	b	-135	+178	b	0
c	+40	-33					+0,01
d	-14	+14					
i	6,22	-5,40					
PPB-1		RE-3		FCH4			
a	-426	+423	a	+168	-168	a	+0,01
b	+1931	-1548	b	+813	-1018	b	+0,03
c	-992	+966	c	+263	-263		-0,05
i	-18	+15					
PPB-2		RE-3		FCH4			
a	+67	-65	a	-26	+26	a	0
b	-89	+97	b	-125	+157	b	0
c	+45	-38	c	-40	+40		0
d	-16	+16					
i	+7,1	-6,1					

1034 Évaluation du bilan

1035 L'analyse de sensibilité, consistant à faire varier chaque paramètre des modèles
 1036 de $\pm 10\%$, les combinaisons de modèles PPB-1, PPB-2, RE-1 et RE-3 ont été testé
 1037 (Tableau 3.4). Le modèle RE-2, très proche du modèle RE-3 n'a pas été testé. **Attente**
 1038 **du COD, les valeurs du tableau sont fausse pour le moment**

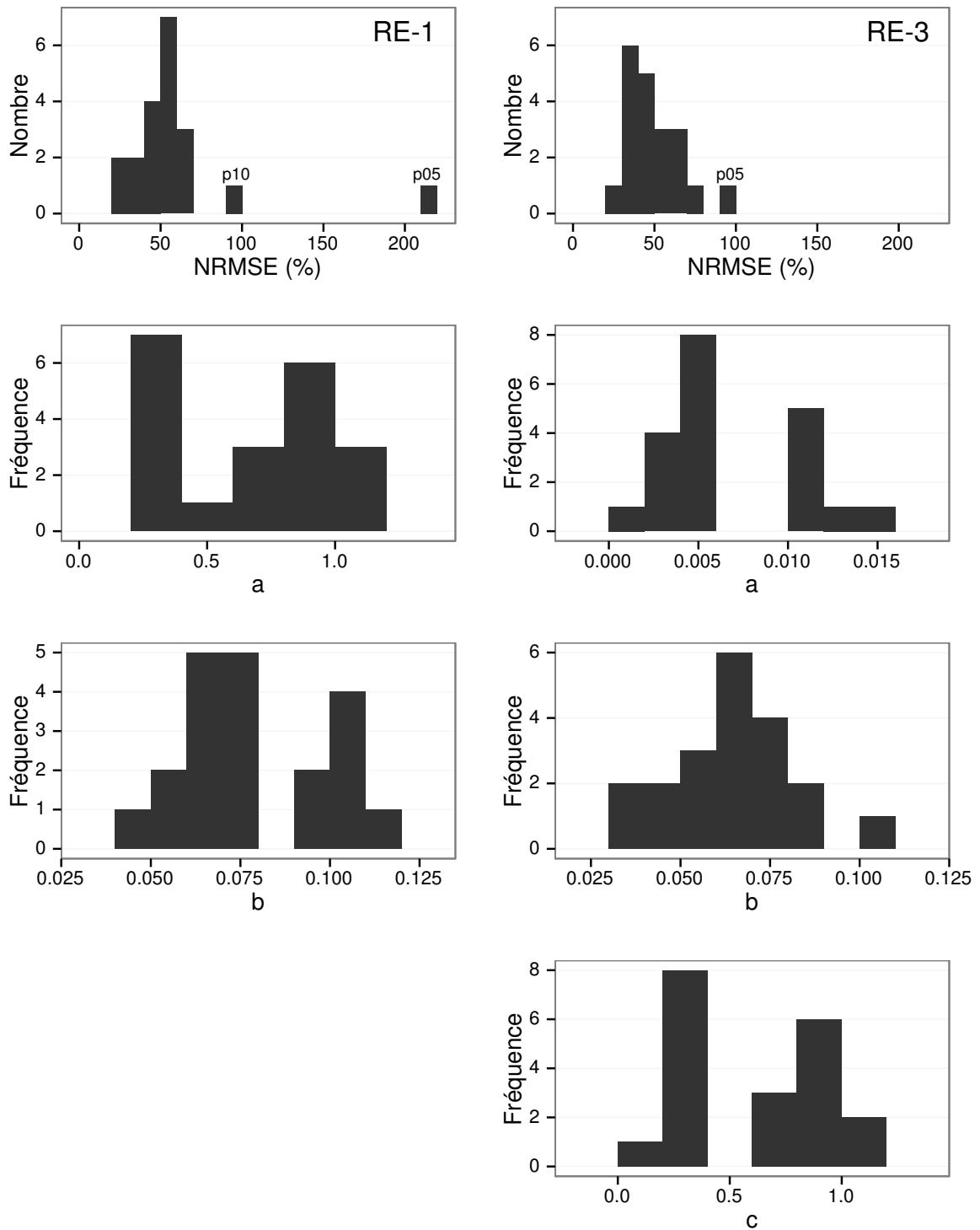


FIGURE 3.19 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres des modèles RE-1 et RE-3

3.3. Résultats

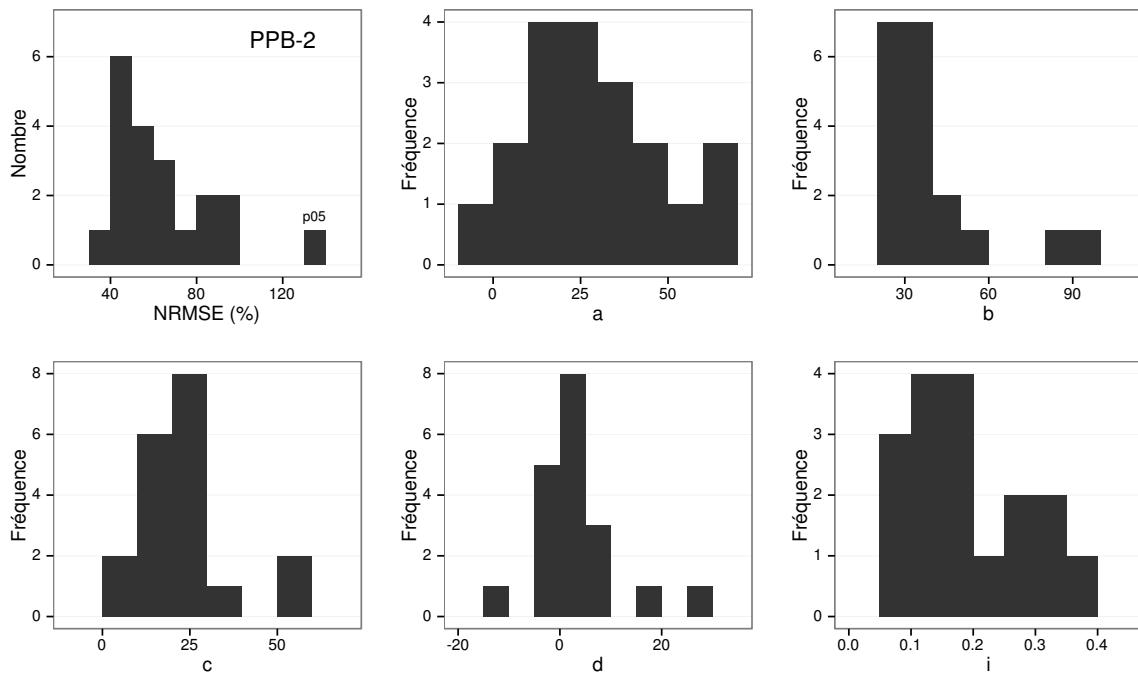


FIGURE 3.20 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2

1039 3.3.4 Variabilité spatiale du bilan

1040 Représentativité locale

1041 La classification hiérarchique a permis de distinguer 4 groupes de végétation (Fi-
1042 gure 3.21). Dans le premier groupe, la strate muscinale est majoritaire avec un recou-
1043 rvement moyen de 91 %, moins de 35 et 15 % de recouvrement pour les herbacées et les
1044 arbustes respectivement. Le deuxième groupe est le plus homogène avec un recouvre-
1045 ment moyen des strates muscinales et arbustives de 63 58 % chacune. C'est également
1046 le groupe où il y a de moins d'herbacées avec un recouvrement de 24 %. La strate her-
1047 bacée est majoritaire dans le troisième groupe avec un recouvrement moyen de 63 %, la
1048 strate arbustive y est peu présente (19 % en moyenne) et la strate muscinale y est pour
1049 ainsi dire absente (1 %). La strate muscinale est également absente, ou presque, dans
1050 le groupe quatre (1 %). Groupe dans lequel la strate arbustive est majoritaire avec de
1051 65 % de recouvrement moyen, et la strate herbacée avec 33 %.

1052 Les bilans de CO₂ calculés par groupe de végétations sont présentés dans le ta-

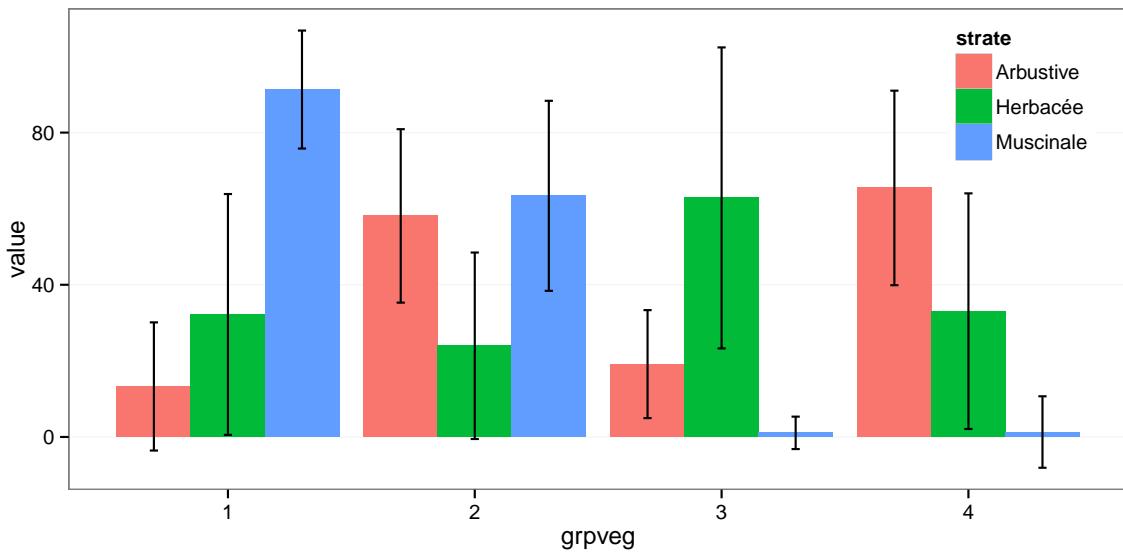


FIGURE 3.21 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2

Tableau 3.5 – Bilan des flux de CO₂ en gCm²an⁻¹, en utilisant PPB-2 et RE-3

groupe	PPB-2	RE-3	ENE
1	714	1023	-308
2	1045	1385	-340
3	1323	1057	266
4	1002	1262	-260

bleau 3.5. On constate que du point de vue de l'ENE les groupes 1 et 2 sont relativement proche, et que le groupe 3 est du même ordre de grandeur bien qu'avec une ENE un peu moins négative. Le groupe 3 est le seul groupe présentant une ENE positive, du même ordre de grandeur que les précédentes en valeur absolue. Dans le détail, la RE est la plus forte, supérieure à 1200 gC m⁻² an⁻¹, dans les groupes 2 et 4. Elle est plus faible dans les groupes 1 et 3 (environ 1000 gC m⁻² an⁻¹). Pour la PPB, la valeur la plus faible est dans le groupe 1 et la plus forte dans le groupe 3 avec plus de 1300 gC m⁻² an⁻¹, soit une différence de plus de 600 gC m⁻² an⁻¹. Les groupes 2 et 4 sont relativement proches avec des valeurs intermédiaires avoisinant 1000 gC m⁻² an⁻¹.

3.4. Discussion

1062 Modélisation par placette

1063 Corrélation avec facteurs contrôlant

1064 3.4 Discussion

1065 3.4.1 Estimations des flux

1066 PPB

1067 L'estimation des flux de PPB, est comprise entre 957 et 1322 gC m⁻² an⁻¹ selon
1068 l'année et le modèle utilisé. Ces valeurs sont très élevées comparées à des tourbières
1069 boréales comme celles étudiées par ([Trudeau et al., 2014](#)) ou encore ([Peichl et al., 2014](#))
1070 dont les valeurs de PPB sont respectivement comprise entre 123 et 131 gC m⁻² an⁻¹
1071 et entre 203 et 503 gC m⁻² an⁻¹. Une première hypothèse permettant d'expliquer une
1072 telle différence, est la différence entre les températures moyennes sur les sites. -4,3 °C
1073 et 1,2 °C respectivement pour [Trudeau et al. \(2014\)](#) et [Peichl et al. \(2014\)](#). Ces tempé-
1074 ratures sont bien plus faible pour les sites des études pré-citées que sur la tourbière de
1075 La Guette. Une seconde hypothèse, qui n'exclue pas la première, serait la composition
1076 végétale de ces sites. La tourbière de La Guette envahie par une végétation vasculaire,
1077 notamment herbacée, est peut-être plus proche d'une prairie tourbeuse. En effet lorsque
1078 la compare à ce type d'écosystèmes les valeurs observées sont plutôt proche. ([Jacobs](#)
1079 *et al., 2007*) estime des valeurs de PPB comprises entre 400 et 2000 gC m⁻² an⁻¹ avec
1080 une moyenne de 1300 gC m⁻² an⁻¹ dans des prairies tourbeuses hollandaises. Sur des
1081 écosystèmes similaires, au Danemark, ([Görres et al., 2014](#)) trouve des valeurs de PPB
1082 plus importantes encore, entre 1555 et 2590 gC m⁻² an⁻¹. Il apparaît cohérent que la
1083 tourbière de La Guette, par sa position géographique, et donc le climat qu'elle subit,
1084 mais également par sa problématique d'envahissement important par une végétation
1085 vasculaire notamment herbacée, s'approche en termes de flux de site tourbeux utilisés
1086 comme prairie.

1087 Le modèle PPB-1 souffre d'une incertitude importante sur l'estimation de ses para-
1088 mètres. L'apport de l'indice de végétation dans l'estimation de la PPB est important
1089 lors de la phase de calibration. Il permet de diminuer fortement l'incertitude sur les
1090 paramètres du modèles, d'augmenter leur significativité et d'améliorer la représentati-
1091 vité des données mesurées. L'intégration de la végétation aux modèles d'estimation de
1092 la PPB est rarement réalisé ([Bortoluzzi et al., 2006; Görres et al., 2014](#)), probablement
1093 à cause de la difficulté à prendre en compte ce signal aux sources multiples. Malgré
1094 cette amélioration lors de la calibration, lorsqu'il est évalué sur un jeu de données indé-
1095 pendante, le modèle PPB-2 à une erreur standard plus importante que celle du modèle
1096 PPB-1. L'apport de cet indice dans l'estimation de la PPB n'est donc pas généralisable.
1097 Bien que rarement faite à cause de la rareté des données, l'évaluation des modèles est
1098 cependant d'un intérêt majeur afin de confirmer ou d'inflimer l'apport de l'ajout d'un
1099 prédicteur à un modèle, particulièrement si l'on souhaite l'extrapoler.

1100 Les différences observées selon la façon d'estimer la PPB peuvent paraître impor-
1101 tante, néanmoins elles sont du même ordre de grandeur que celle rencontré par [Worrall](#)
1102 *et al.* ([2009](#)) qui compare différentes façons de modéliser des flux de gaz avec des équa-
1103 tions différentes (et non pas juste des variations sur un type de modèle). Ces différences
1104 sont également liées à l'importance des flux qui font que, surtout dans le cas de mo-
1105 dèles exponentiels, de faibles variations peuvent avoir des effets importants comme en
1106 témoigne l'analyse de sensibilité des paramètres du modèle (Tableau [3.4](#)).

1107 **Discussion 2013-2014 ?** Dans le détail l'intégration de l'indice de végétation à un
1108 effet beaucoup plus important en 2013, avec un flux qui diminue de $365 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$,
1109 qu'en 2014 où la baisse n'est que de $74 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

1110 RE

1111 De la même façon que pour la PPB, les flux de la RE sont important si on les
1112 compare à des tourbières boréales et s'approchent davantage des flux mesurés dans
1113 les prairies sur sols tourbeux. La Re sur la tourbière de La Guette, comprise entre
1114 1232 et $1337 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ est plus importante que celle observée par ([Peichl et al.,](#)

3.4. Discussion

1115 2014; Trudeau *et al.*, 2014) (pour reprendre les études citées précédemment) qui s'éta-
1116 blissent respectivement entre 137 et 443 gC m⁻² an⁻¹ et 206 et 234 gC m⁻² an⁻¹. Elles
1117 sont en revanche plus faible que celle mesurées par (Jacobs *et al.*, 2007), entre 500 et
1118 2000 gC m⁻² an⁻¹, ou par (Görres *et al.*, 2014) : entre 2070 et 3500 gC m⁻² an⁻¹.

1119 À l'inverse de la PPB, l'intégration de la végétation pour modéliser la RE n'amé-
1120 liore que peu l'estimation de la RE lors de la phase de calibration : la différence entre
1121 les valeurs d'erreur standard est de 5 %. En revanche lors de la phase d'évaluation,
1122 l'utilisation du recouvrement des herbacées semble améliorer l'estimation de façon plus
1123 importante avec une différence de 11 % entre les valeurs d'erreur standard. Contraî-
1124 rement à la PPB la différence apportée par l'intégration de la végétation (RE-2 ou
1125 RE-3) est du même ordre de grandeur en 2013 et en 2014. Sur les 2 années, l'effet
1126 de l'intégration de la végétation est limité avec une différence de 25 gC m⁻² an⁻¹ au
1127 maximum (entre ER-1 et ER-3), soit moins de 2 % du flux. Encore une fois l'intérêt
1128 de l'évaluation est mis en avant puisqu'il permet de distinguer des modèles très proche
1129 lors de la calibration.

1130 Les incertitudes sur l'estimation des paramètres RE sont beaucoup moins impor-
1131 tante que celle de la PPB. L'estimation des paramètres des modèles, à l'exception du
1132 paramètre c du modèles RE-2, ont une p-value inférieure à 0.05. L'erreur calculée lors
1133 de l'évaluation de ces modèles, si elle augmente par rapport à la calibration, reste faible
1134 particulièrement pour le modèle RE-3 où elle vaut moins de 25 %. La RE semble donc
1135 relativement contrainte, avec une estimation des paramètres fiable et une différence
1136 entre les estimations issues des modèles relativement limitée.

1137 CH₄

1138 Les flux de CH₄ sont faibles comparés aux flux de CO₂. Les valeurs mesurées sont
1139 plus forte que celles mesurés entre 0 et 0,03 μmol m⁻² s⁻¹ par Bortoluzzi *et al.* (2006).
1140 Pour 2013 les valeurs mesurées sont proches de celle mesurée par Long *et al.* (2010).
1141 L'absence d'étiage en 2014 explique peut-être le doublement des flux... (**Réf needed**)

1142 La faible relation observée entre le niveau de la nappe et les flux de méthane va dans

le même sens que les observations faites par [Trudeau et al. \(2012\)](#) et (à développer, de
ref ds trudeau2012)

1145 COD

1146 3.4.2 Estimations des bilans

1147 D'une manière générale, les bilans sont principalement contraint par les flux de CO₂,
1148 le CH₄ ne jouant qu'un rôle marginal en termes de quantité de carbone. Ces observations
1149 sont cohérentes avec d'autres études comme [Bortoluzzi et al. \(2006\); Worrall et al.](#)
1150 ([2009](#)). La forte variabilité entre les différents bilans est à attribuer en grande majorité
1151 à l'erreur sur l'estimation du flux de PPB.

1152 Selon le bilan considéré, la tourbière de La Guette stocke légèrement du C pour
1153 une dizaine de grammes par mètre carré, ou relâche du carbone dans l'atmosphère soit
1154 un légèrement, soit de façon important pour plus de 200 gC m⁻² an⁻¹. La tourbière de
1155 La Guette ayant subie un drainage et un envahissement important d'une végétation
1156 vasculaire, ces derniers chiffres ne sont pas incohérents.

1157 3.4.3 Sensibilité et limitations du bilan

1158 Les incertitudes les plus fortes du bilan sont sur les flux de CH₄ avec une erreur
1159 standard de 32 % lors de la calibration et de 68 % lors de la validation. Cette différence
1160 importante montre que l'estimation des flux de CH₄ à l'aide de l'indice de végétation
1161 à permis l'estimation de sa contribution au bilan de carbone de l'écosystème, mais que
1162 sont utilisation dans d'autre conditions est fortement limité. L'importance faible du
1163 CH₄ dans le bilan de carbone de la tourbière rend ces erreurs moins critiques que celles
1164 faite lors de l'estimation de la PPB. Les incertitudes importantes sur la PPB, sont
1165 mise en évidence par les variations fortes des flux interpolés selon l'équation utilisée.
1166 Elles sont la source des variations observées en termes de bilan. L'ajout d'un indice de
1167 végétation diminue d'incertitude des paramètres du modèle, mais cet apport semble
1168 spécifique à l'étude, n'étant pas reflété par l'évaluation. À l'inverse la RE semble rela-

3.4. Discussion

1169 tivement bien contrainte, sur les 2 années la différence entre les différentes équations
1170 utilisées ne dépassent pas $25 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

1171 sensibilité du bilan au variation des paramètres

1172 **limitations** Outre ces aspects ce bilan de carbone est aussi limité par sa repré-
1173 sentativité. Ainsi la strate arborée fortement présente dans certaines zones n'est pas
1174 directement prise en compte. De la même manière une partie restreinte de la tourbière
1175 mais néanmoins présente est constitué de touradons dont l'effet n'a pas été pris en
1176 compte.**(Réf needed)(biblio effet microtype)**.

- 1177 — pas de cartographie (pas grave si p7 maj bien représentée par mdl ecos)
1178 — extrapolation sur d'autres site difficile (cf validation)

1179 3.4.4 Représentativité locale du modèle

1180 Distribution des paramètres

1181 Pourquoi certaines placette mieux que d'autres

1182 Concernant la respiration la représentativité locale des modèles calibrés à l'échelle
1183 de l'écosystème semble plus homogène pour le modèle RE-3 que pour le modèle RE-1.

1184 Une telle comparaison entre PPB-1 et PPB-2 n'a pas été possible car vu le faible
1185 nombre de données et la qualité relative des modèles PPB par rapport aux modèles
1186 RE, peu de modèles sont parvenus à converger pour PPB-1 (11 sur 20 placettes) et
1187 pour PPB-2 (17 sur 20 placettes).

1188 3.4.5 Variation du bilan avec la végétation

1189 Le calcul des bilans avec les groupes de végétation permet de mettre en évidence
1190 des comportements différents des flux selon la végétation majoritaire. Ainsi le groupe 3
1191 dans lequel la strate herbacée est la plus importante est celui où la PPB est la plus forte.
1192 Ce point semble en cohérence avec la croissance annuelle importante des herbacées. À
1193 l'inverse le groupe 1 dans lequel la strate muscinale est la plus importante est également
1194 le groupe pour lequel la PPB est la plus faible. **(Réf needed)**

1195 Pour la RE, ce sont les groupes 3 et 4 qui ont les flux estimés les plus importants
1196 avec une différence d'environ $200 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ avec les deux autres groupes. Malgré
1197 leurs différences, le groupe 2 possède une strate muscinale importante alors qu'elle est
1198 absente dans le groupe 3, ils ont en commun d'avoir une strate arbustive importante.

1199 **3.4.6 perspectives**

1200 cartographie ?

4 Effets de l'hydrologie sur les flux de GES

1202

1203	4.1 Introduction	78
1204	4.2 Procédure expérimentale	79
1205	4.2.1 Expérimentation A	80
1206	4.2.2 Expérimentation B	80
1207	4.2.3 traitement	81
1208	4.3 Résultats	82
1209	4.3.1 Expérimentation A	82
1210	4.3.2 Expérimentation B	85
1211	4.3.3 tendances générales	88
1212	4.4 Discussion	88
1213	4.4.1 Comparaison aux mesures <i>in-situ</i>	88
1214	4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de gaz	90
1215	4.4.3 Effet cycles multiples	91
1216		
1217		
1218		

₁₂₁₉ 4.1 Introduction

₁₂₂₀ Au cours des deux années qu'ont duré les suivis des émissions de flux de CO₂ et
₁₂₂₁ de CH₄ sur la tourbière de La Guette, le niveau de la nappe n'a que très faiblement
₁₂₂₂ varié comparé aux années précédentes bien plus sèches. En conséquence de cette faible
₁₂₂₃ variation peu de variations des flux ont pu y être relié. Malgré tout il est connu que
₁₂₂₄ l'hydrologie est un facteur contrôlant important des flux.

₁₂₂₅ Ainsi de nombreuses études on reliées les émissions de CO₂ au niveau de la nappe
₁₂₂₆ avec, cependant, des résultats et des conclusions variables. La majorité des études
₁₂₂₇ montrent qu'une tourbière dont le niveau de la nappe est abaissé, soit par un drainage,
₁₂₂₈ soit par une sécheresse, aura tendance à avoir un ENE plus faible : Ainsi [Strack et](#)
₁₂₂₉ [Zuback \(2013\)](#) expliquent des valeurs d'ENE plus faibles qu'escompté, par des mesures
₁₂₃₀ faites pendant une période relativement sèche. Une observation similaire est faite par
₁₂₃₁ [Aurela et al. \(2007\)](#) qui mesure un ENE plus faible lors d'une année sèche, sur une
₁₂₃₂ tourbière à Carex du sud de la Finlande. Ils attribuent la variation de l'ENE à une
₁₂₃₃ augmentation de la RE et à une baisse de la PPB, dans des conditions plus chaudes
₁₂₃₄ et plus sèches. [Peichl et al. \(2014\)](#) observent également une baisse de l'ENE lors d'une
₁₂₃₅ année où le niveau de la nappe baisse de façon importante, au delà de -30 cm. Ils
₁₂₃₆ expliquent cette baisse par une baisse de la PPB. Cette observation va dans le même
₁₂₃₇ sens que [Lund et al. \(2012\)](#) qui, lors de l'étude d'une tourbière située au sud de la suède,
₁₂₃₈ observent en 2008 une baisse de l'ENE. Les mesures de RE faites cette année là étant
₁₂₃₉ similaires à celles effectuées les autres années, ils lient cette baisse à une diminution
₁₂₄₀ de la PPB. En 2006, sur la même tourbière, [Lund et al. \(2012\)](#) observent une autre
₁₂₄₁ baisse de l'ENE. Mais cette fois, les mesures de PPB à leur tour similaires à celle
₁₂₄₂ des autres années n'expliquent pas cette baisse. À l'inverse de 2008, cette baisse est
₁₂₄₃ expliqué par une augmentation de la RE Ce paradoxe apparent est interprété grâce
₁₂₄₄ au type de sécheresse : courte et intense pendant la saison de végétation de 2006 et
₁₂₄₅ d'intensité plus faible mais d'une durée plus longue en 2008. Enfin et à l'inverse des

1246 résultats précédemment cités, [Ballantyne et al. \(2014\)](#) dans une étude des effets à long
 1247 terme d'une baisse du niveau de la nappe, n'observe que peu d'effet sur l'ENE tandis
 1248 que les flux de RE et de PPB augmentent tous deux. Toutes ces études montrent que
 1249 si le niveau de la nappe est incontestablement reconnu comme un facteur de contrôle
 1250 des flux de CO₂, il est difficile d'en dégager, avec certitude, un comportement valable
 1251 de façon générale.

1252 Concernant le méthane, une baisse du niveau de la nappe est généralement liée à
 1253 une baisse des émissions de CH₄, et inversement ([Strack et al., 2006; Pelletier et al.,](#)
 1254 [2007; Turetsky et al., 2008](#)). Cependant d'autres études, principalement dans des sites
 1255 où le niveau de la nappe est proche de la surface du sol, montrent une absence de
 1256 relation entre le niveau de la nappe et les émissions de méthane, voire une relation
 1257 inverse, avec des flux plus faibles liés à des niveaux de nappe plus élevés ([Kettunen](#)
 1258 [et al., 1996; Bellisario et al., 1999; Treat et al., 2007](#)). Là encore selon les conditions
 1259 environnementales, la relation entre les flux de CH₄ et le niveau de la nappe n'est pas
 1260 aisément généralisable.

1261 L'objectif de ce chapitre est donc d'explorer plus en avant l'effet du niveau de la
 1262 nappe sur les émissions de GES, effet peu ou pas visible *in-situ*. Plus précisément il
 1263 s'agit de déterminer l'effet de cycles de dessication/ré-humectation sur les émissions de
 1264 CO₂ et de CH₄.

1265 4.2 Procédure expérimentale

1266 L'étude des cycles de dessication/ré-humectation s'est effectué sur des mésocosmes,
 1267 prélevés sur la tourbière de La Guette. L'expérimentation a été testé durant l'été 2013
 1268 avec un seul cycle relativement long, on s'y référera par la suite comme l'expérimenta-
 1269 tion A. Cette expérimentation a été renouvelée l'été 2014 afin d'augmenter à trois le
 1270 nombre de cycles, ceux-ci étant plus court. On appellera cette seconde expérimentation,
 1271 l'expérimentation B (Tableau 4.1).

4.2.1 Expérimentation A

Le 12 avril 2013, ont été prélevés, sur la tourbière de La Guette 6 mésocosmes. Le prélèvement de mésocosmes s'effectue à l'aide de cylindres de PVC qui, dans un premier temps, posé sur le sol, permettent de faire un pré-découpage au couteau, puis dans un second temps sont insérés, délicatement, dans la tourbe. Les mésocosmes sont finalement dégagés en creusant de chaque côté (Figure 4.1). Les mésocosmes sont transportés au laboratoire où ils sont enterrés en extérieur et saturé en eau (eau prélevée dans la tourbière), afin que leur conditions hydrologique de départ soient les plus proche possible (Figure 4.2). Trois mésocosmes sont choisi pour servir de contrôle, et trois vont subir un cycle de dessication/ré-humectation. À partir du 31 mars 2013 les précipitations ont été interceptées à l'aide d'abri bâchés installable rapidement en cas de pluie et la nuit. Ces interceptions ont été faites jusqu'au 17 juillet dans les 3 mésocosmes traités pour simuler une sécheresse. À cette date de l'eau est ajouté aux mésocosmes, que ce soit les contrôles ou les traitements, pour simuler de fortes précipitations.

4.2.2 Expérimentation B

Le 17 avril 2014, 6 nouveaux mésocosmes ont été prélevés sur la tourbières de La Guette et installé près du laboratoire, en suivant le même protocole que pour l'expérimentation A. Une station météo a été installée à côté des mésocosmes afin de mesurer la température de l'air, l'humidité relative, l'irradiation solaire, la vitesse et la direction du vent et les précipitations toutes les 15 minutes. Cette station permettait également l'enregistrement des températures mesurées par des sondes (T107) installées à -5, -10, et -20 cm. Les conditions météorologiques moins ensoleillée qu'en 2013 et l'objectif de suivre plusieurs cycles de dessication/réhumectation ont nécessité la mise en place d'un abaissement manuel du niveau de la nappe. Pendant les phases d'assèchement les niveaux de nappes des placettes traitées étaient donc abaissés en moyenne de 2,5 cm par jour. Le premier cycle de dessication/réhumectation dura du 30 juin au 6 juillet pour la phase de dessication est du 7 au 16 juillet pour la phase de réhumectation.



FIGURE 4.1 – Prélèvement des mésocosmes

Tableau 4.1 – Récapitulatif des mesures pour les deux expérimentations

expérimentation	A	B
année	2013	2014
réplicats	6	6
cycles	1	3
station météo	non	oui

¹²⁹⁹ Le deuxième cycle dura du 17 au 28 juillet et du 29 juillet au 3 aout, Enfin le dernier
¹³⁰⁰ cycle fut mesuré du 4 au 11 aout pour la dessication et du 12 au 14 aout pour la
¹³⁰¹ réhumectation.

¹³⁰² 4.2.3 traitement

¹³⁰³ Les flux sont moyennés par jour de mesure.

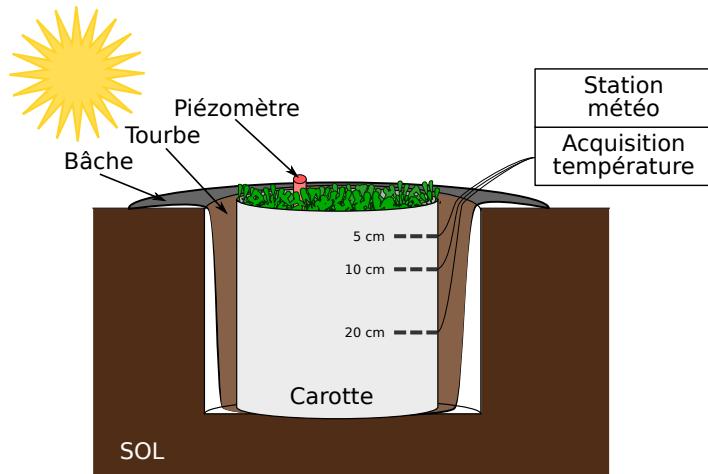


FIGURE 4.2 – Schéma d'un mésocosme

¹³⁰⁴ 4.3 Résultats

¹³⁰⁵ 4.3.1 Expérimentation A

¹³⁰⁶ Pendant la phase de dessication de l'expérimentation A, on observe une baisse du
¹³⁰⁷ niveau de la nappe pour les placettes contrôles comme pour les placettes traitements
¹³⁰⁸ (Figure 4.3–A). Malgré tout leur comportement est différent : les placettes contrôles ont
¹³⁰⁹ un niveau de nappe relativement élevé jusqu'au 24 juin puis ce niveau baisse fortement
¹³¹⁰ alors que les placettes du groupe traité ont un niveau de nappe qui diminue de façon
¹³¹¹ plus continue sur l'ensemble de la phase. La remontée du niveau de la nappe s'effectue
¹³¹² de façon similaire pour les deux groupes. Enfin après la phase de ré-humectation, le
¹³¹³ niveau de la nappe baisse à nouveau, plus rapidement pour le groupe traitement que
¹³¹⁴ pour le groupe contrôle.

¹³¹⁵ Les émissions de CH_4 , s'étendant de 0 et $0,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sont relativement si-
¹³¹⁶ milaires entre les deux groupes jusqu'au 24 juin 2013, date à partir de laquelle ils
¹³¹⁷ commencent à diverger (Figure 4.3–B). À cette date les émissions du groupe contrôle
¹³¹⁸ augmentent rapidement pour atteindre $0,55 \pm 0,31 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ tandis que celles du
¹³¹⁹ groupe traité restent stable. Finalement mi-juillet, à la fin de la phase de dessicca-
¹³²⁰ tion les deux groupes retrouvent des niveaux d'émission similaires compris entre 0,1 et

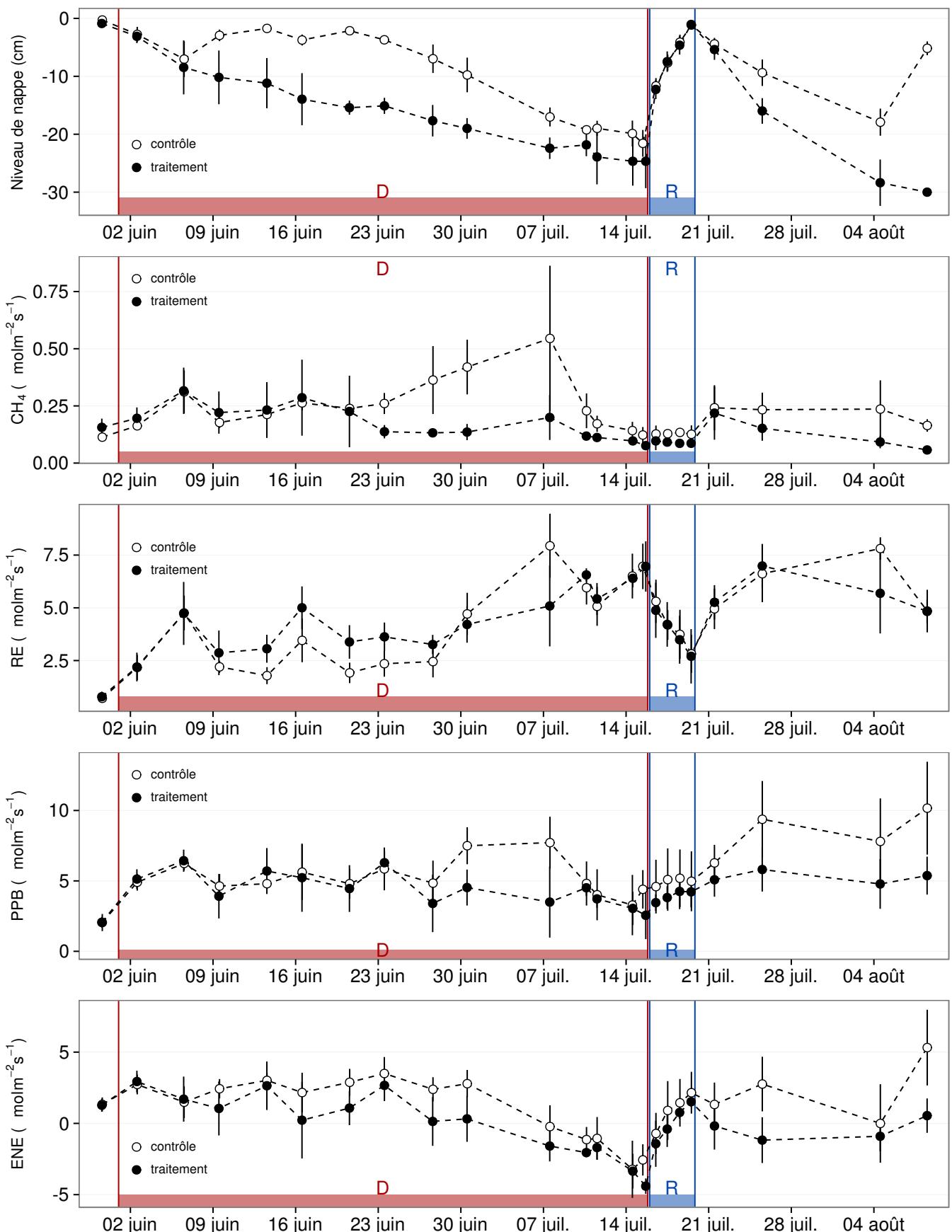


FIGURE 4.3 – Expérimentation A : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH_4 , RE, PPB, ENE en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent à la phase de dessiccation (D) en rouge et à la phase de réhuméction (R) en bleu.

4.3. Résultats

1321 0,2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ces niveaux restent constant pendant toute la phase de réhumecta-
1322 tion, avant d'augmenter légèrement par la suite ; ils ne dépassent pas 0,25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
1323 mais franchissent la barre des 0,2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

1324 Pendant la phase de dessication, les valeurs de la RE tendent à augmenter quel
1325 que soit le groupe de placettes considéré (Figure 4.3–C). Ces valeurs inférieures à
1326 2,5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ début juin, atteignent environ 7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour les deux groupes
1327 mi-juillet, avant la réhumectation. Dans le détail cependant les deux groupes ne se
1328 comportent pas de la même façon : la RE du groupe traité augmente régulièrement
1329 pendant l'ensemble de cette phase, tandis que les valeurs du groupe de contrôle res-
1330 tent, dans un premier temps, stable jusqu'à fin juin. La RE de ce groupe vaut alors
1331 $2,45 \pm 0,75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ contre $3,26 \pm 0,46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le groupe traité. Cet
1332 écart, pouvant varier dans le temps, étant installé depuis le 9 juin. À partir de dé-
1333 but juillet, les valeurs de RE du groupe de contrôle augmentent fortement dépas-
1334 sant les valeurs du groupe traité. La RE de ce groupe atteint alors un maximum à
1335 $7,93 \pm 1,52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ le 8 juillet avant de retrouver des valeurs proche de celles ob-
1336 servées dans le groupe traité. Cette augmentation brusque correspond temporellement
1337 à celle observée, pour le même groupe, dans les flux de CH₄. Lors de la phase de réhu-
1338 mectation, les flux de RE diminuent de façon très similaire pour les deux groupes ou
1339 ils atteignent un minimum proche de 2,75 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ce minimum reste cependant
1340 plus élevé que les valeurs mesurées initialement. Après la phase de réhumectation, les
1341 flux des deux groupes restent relativement proches pendant le reste des mesures, où ils
1342 remontent à mesure que le niveau de la nappe diminue à nouveau.

1343 Pour les deux groupes, les flux de PPB restent relativement stables pendant la
1344 phase de dessiccation (Figure 4.3–D). Jusqu'au 24 juin, les flux des deux groupes sont
1345 très proches et sont compris entre 5 et 6 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ($5,29 \pm 0,76 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de
1346 moyenne pour les deux groupes). Après cette date, et comme pour le CH₄ et la RE,
1347 les valeurs de la PPB du groupe de contrôle augmentent et s'écartent de celles me-
1348 surées dans le groupe traité, en attendant de les rejoindre avant la fin de cette phase
1349 de dessiccation. Par ailleurs, à la fin de cette phase, les flux diminuent légèrement at-

teignant un minimum proche de $3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Pendant la phase de réhumectation, la PPB augmente très légèrement pour les deux groupes, le groupe de contrôle ayant des valeurs systématiquement supérieures à celles du groupe traité. Après la réhumectation, la PPB augmente un peu pour le groupe traité, atteignant un maximum de $5,83 \pm 1,61 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, et plus fortement pour le groupe de contrôle où le maximum atteint, de $10,17 \pm 3,30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, est quasiment le double du précédent.

L'ENE mesuré sur les deux groupes est systématiquement supérieure pour le groupe contrôle, avec une évolution parallèle des flux pour les deux groupes (Figure 4.3–E). Pendant la phase de dessiccation l'ENE reste relativement constante jusque fin juin avec une valeur moyenne pour les deux groupes de $1,18 \pm 0,58 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. L'écart entre le groupe contrôle et le groupe traitement tend à augmenter du 10 au 30 juin environ, avant que les valeurs du groupe de contrôle ne rejoignent celles du groupe traité. Au delà du 24 juin, l'ENE baisse fortement pour les deux groupes pour atteindre un minimum proche de $-4,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Pendant la phase de réhumectation l'ENE monte rapidement pour atteindre $1,52 \pm 0,36$ et $2,15 \pm 1,47 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le groupe de contrôle et de groupe traité respectivement. Après la réhumectation, l'ENE du groupe contrôle varie en suivant généralement les variations du niveau de nappe. Pour le groupe traité, l'ENE baisse par rapport au maximum atteint lors de la réhumectation puis se stabilise autour de 0.

Les variations du niveau de la nappe sont principalement liée à la RE (Figure 4.5–C) et, à travers elle, à l'ENE (Figure 4.5–G). L'effet des variations du niveau de la nappe sur la PPB est quasiment nul (Figure 4.5–E), même si la PPB semble diminuer aux plus fortes profondeurs. Pour le CH₄ il est également difficile de distinguer des tendances générales entre les flux et les niveaux de nappe (Figure 4.5–A).

4.3.2 Expérimentation B

Contrairement à l'expérimentation A, le niveau de nappe du groupe de contrôle de l'expérimentation B reste relativement constant pendant l'ensemble de la période de mesure. Le drainage artificiel du groupe traité permet d'abaisser le niveau de la nappe

4.3. Résultats

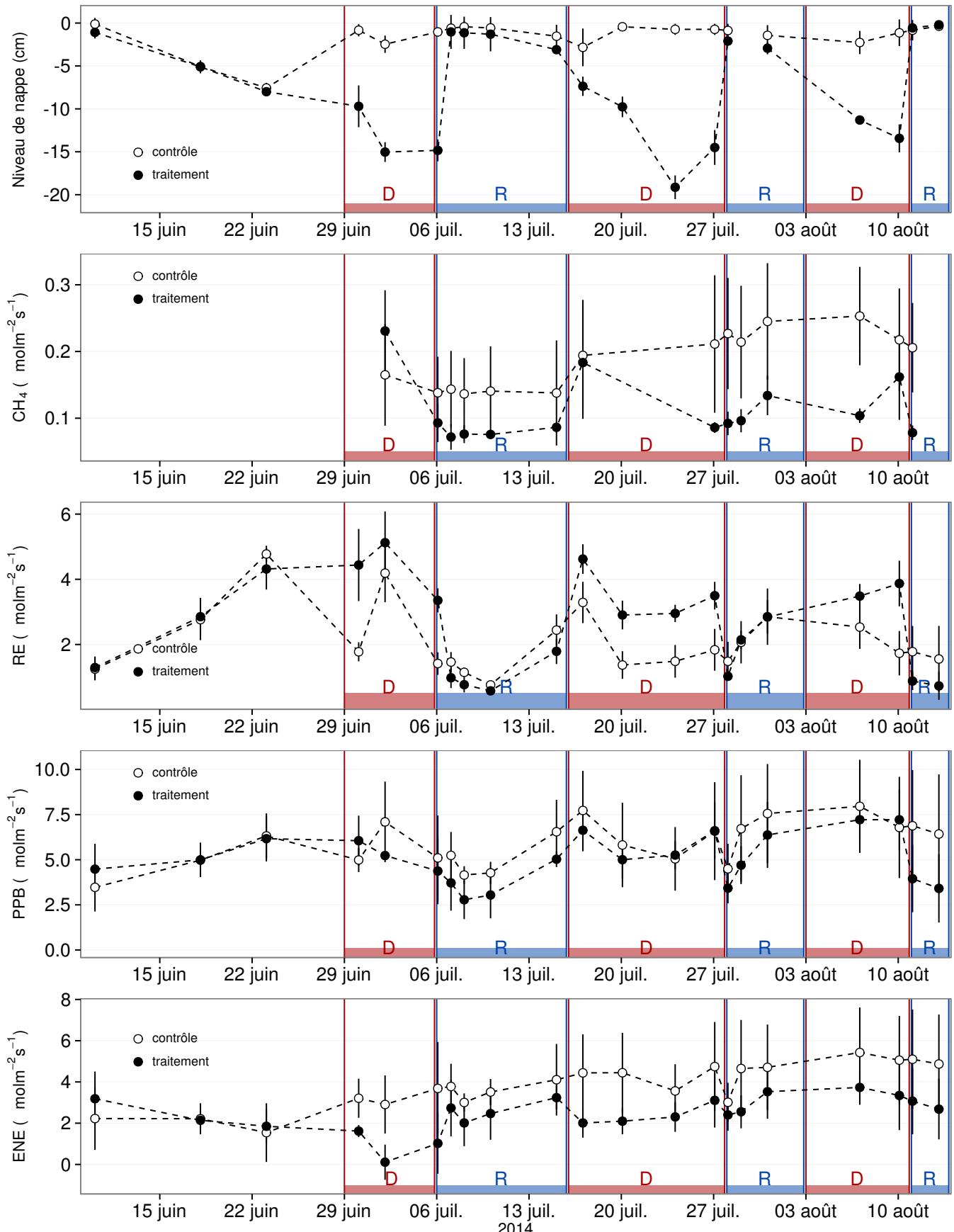


FIGURE 4.4 – Expérimentation B : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH_4 , RE, PPB, ENE en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent aux phases de dessiccation (D) en rouge et aux phases de réhumectation (R) en bleu.

1378 d'une quinzaine de centimètres en moyenne pour chaque cycle (Figure 4.4–A).

1379 Les flux de CH₄ moyen s'étendent de 0,07 à 0,34 µmol m⁻² s⁻¹. Les flux du groupe
1380 de contrôle, à l'exception de la première mesure, sont supérieurs aux flux du groupe
1381 traité, leurs moyennes respectives sur l'ensemble des mesures étant de 0,20 ± 0,06 et
1382 0,11 ± 0,05 µmol m⁻² s⁻¹ respectivement. Les émissions du groupe de contrôle tendent
1383 à augmenter sur la période de mesure. Une tendance similaire, quoique moins mar-
1384 quée, est également visible pour le groupe traité. Concernant les cycles de dessicca-
1385 tion/réhumectation, il est difficile de dégager des comportements communs, même s'il
1386 semble que l'assèchement conduit à une baisse des émissions (Figure 4.4–B) Cette re-
1387 lation, mise en exergue pas un nombre de points très faible, n'apparaît cependant pas
1388 sur l'ensemble des données (Figure 4.5–B) Un pic d'émission de CH₄ est également à
1389 noter pour chaque cycle pendant la phase de dessiccation.

1390 La RE varie pour les deux groupes entre 0,42 et 5,12 µmol m⁻² s⁻¹ (Figure 4.4–C)).
1391 Avant le démarrage des manipulations du niveau de la nappe, les valeurs des deux
1392 groupes sont très proches et augmentent tandis que le niveau de nappe diminue. Pen-
1393 dant les phases de dessiccation, les valeurs du groupe traité sont systématiquement supé-
1394 rieures, de 1,5 à 1,8 µmol m⁻² s⁻¹ en moyenne par phase, par rapport à celle du groupe
1395 de contrôle. À l'inverse pendant les phases de réhumectation les flux entre les deux
1396 groupes sont beaucoup plus proches avec une tendance de la RE du groupe de contrôle
1397 à être au dessus de celle du groupe traité. La RE du groupe traité est systématiquement
1398 plus faible pendant les phases de réhumectations que pendant les phases de dessicca-
1399 tions. En moyenne la RE vaut respectivement 2,28 ± 1,00 et 3,86 ± 0,80 µmol m⁻² s⁻¹
1400 pour les groupes de contrôle et traité pendant les phases de dessiccation et 1,70 ± 0,62
1401 et 1,51 ± 0,98 µmol m⁻² s⁻¹ pendant les phases de réhumectation.

1402 Sur l'ensemble de la période de mesure la PPB est comprise entre 2,78 et 7,96 µmol m⁻² s⁻¹.

1403 Avant le début des traitements les flux des deux groupes sont similaires (Figure 4.4–D).
1404 La première phase de dessiccation fait passer la PPB du groupe de contrôle au dessus
1405 du groupe traité. Pour les deux groupes, la PPB est plus importante lors des phases
1406 de dessiccation comparée aux phase de réhumectation, avec des moyennes respectives

4.4. Discussion

¹⁴⁰⁷ de $6,35 \pm 2,19$ contre $5,80 \pm 2,20$ pour le groupe de contrôle et de $5,95 \pm 1,46$ contre
¹⁴⁰⁸ $4,05 \pm 1,60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le groupe traité.

¹⁴⁰⁹ Les valeurs d'ENE mesurées sont comprises entre $0,11$ et $5,42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, elles
¹⁴¹⁰ ont tendance à augmenter au cours du temps. Passé la période pré-traitements pendant
¹⁴¹¹ laquelle les flux de l'ENE sont similaires pour les deux groupes l'ENE du groupe de
¹⁴¹² contrôle est systématiquement supérieure à celle du groupe de traitement (Figure 4.4–
¹⁴¹³ E). L'évolution des deux groupes reste cependant relativement conjointe pendant la
¹⁴¹⁴ période de mesure avec pour le groupe traité une diminution récurrente de l'ENE au
¹⁴¹⁵ début de chaque phase de dessiccation.

4.3.3 tendances générales

¹⁴¹⁷ Pour les deux expérimentations une relation nette est visible entre le niveau de la
¹⁴¹⁸ nappe et l'ENE qui diminue lorsque le niveau de nappe augmente (Figure 4.5–G,H).
¹⁴¹⁹ La relation inverse est visible, pour les deux expérimentations, entre la RE et le niveau
¹⁴²⁰ de la nappe (Figure 4.5–C,D). La PPB par contre ne montre aucune tendance claire
¹⁴²¹ quelle que soit l'expérimentation. On peut malgré tout noter que les valeurs de PPB les
¹⁴²² plus faibles correspondent aux niveaux de nappe les plus élevés(Figure 4.5–E,F). Pour
¹⁴²³ le méthane, que ce soit pour l'expérimentation A ou B, aucune tendance ne semble se
¹⁴²⁴ dégager vis à vis du niveau de la nappe (Figure 4.5–A,B).

4.4 Discussion

4.4.1 Comparaison aux mesures *in-situ*

¹⁴²⁷ Les flux moyen de CH_4 mesurés dans les mésocosmes des deux expérimentations
¹⁴²⁸ font partie des valeurs hautes mesurées sur le terrain. Certaines campagnes dépassent
¹⁴²⁹ nettement, en faisant plus que doubler, le maximum de $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mesuré en
¹⁴³⁰ 2014 sur la tourbière de La Guette.

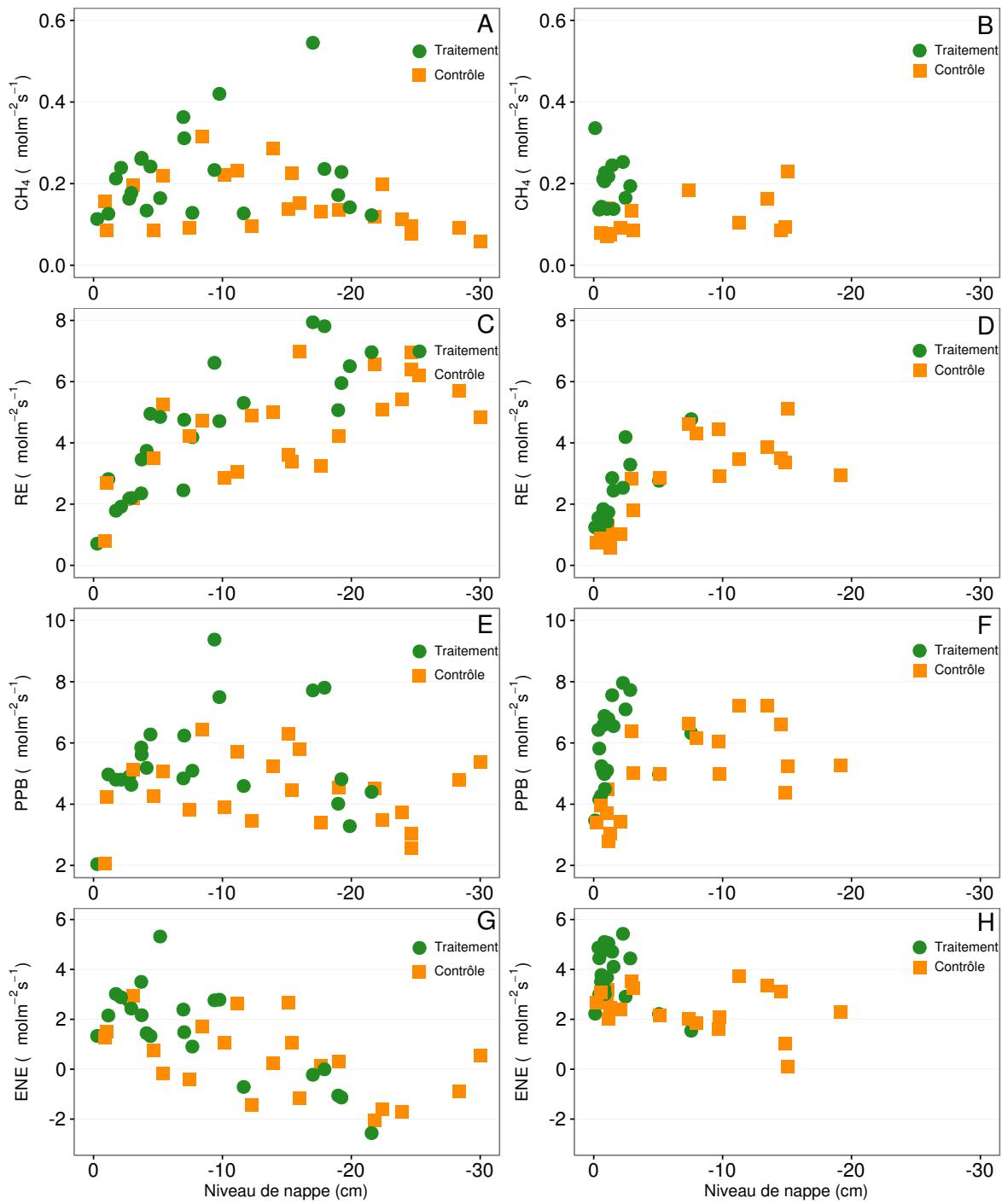


FIGURE 4.5 – Relations entre les flux de GES et le niveau de la nappe

4.4. Discussion

1431 Pour le CO₂ les flux sont généralement dans la gamme des valeurs mesurée sur la
1432 tourbière de La Guette. Pour l'expérimentation A, l'ENE moyen est plus faible que
1433 celui mesuré sur le terrain la même année : 0,81 contre 2,85 µmol m⁻² s⁻¹. Pour l'expé-
1434 rimentation B en revanche l'ENE moyen vaut 0,71 µmol m⁻² s⁻¹ ce qui est relativement
1435 proche de celui mesuré sur le terrain : 2,93 µmol m⁻² s⁻¹. Les flux de RE et de PPB
1436 sont moins fort que les flux mesurés sur le terrain mais restent dans leur gamme de
1437 valeurs. Ces comparaisons sont par ailleurs à relativiser puisque les mesures de flux
1438 n'ont pas nécessairement lieu aux mêmes moment de la journée.

1439 Comme pour la RE, les flux de PPB sont du même ordre de grandeur que ceux me-
1440 surés sur le terrain, mais légèrement plus faible : les maxima moyens mesurés dans les
1441 mésocosmes sont d'environ 7,5 pour des valeurs de 13 µmol m⁻² s⁻¹ mesuré directement
1442 sur la tourbière.

1443 4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de 1444 gaz

1445 Les résultats de ces deux expérimentations montrent clairement une augmentation
1446 de la RE quand le niveau de la nappe diminue. Ceci est en accord avec les résultats
1447 d'autres études que ce soit in-situ (Ballantyne *et al.*, 2014) ou en mésocosmes (Blodau
1448 *et al.*, 2004; Dinsmore *et al.*, 2009). Dans ces deux dernières publications, la baisse
1449 du niveau de la nappe diminue la PPB. Pas de variations claires de la PPB n'est vi-
1450 sible dans les données présentées, même si une légère tendance semble émergée aux
1451 plus fortes profondeur de nappe pour l'expérimentation A, ces observations restent à
1452 confirmer. Cette absence d'effet du niveau de la nappe sur la PPB peut, peut être,
1453 être liée à la profondeur des mésocosmes (30 cm). En effet dans Blodau *et al.* (2004)
1454 et Dinsmore *et al.* (2009), les mésocosmes utilisés sont plus grands, 75 et 41 cm res-
1455 pectivement, ont permis d'abaisser le niveau de l'eau au delà de -30 cm. Cette limite
1456 a été rapportée plusieurs fois comme étant un seuil au delà duquel son observés des
1457 changements importants (Blodau *et al.*, 2004; Peichl *et al.*, 2014). Ce seuil est expliqué
1458 comme étant la limite au delà de laquelle les forces de capillarités ne permettent plus

1459 d'alimenter en eau les sphaignes (Rydin et Jeglum, 2013b; Ketcheson et Price, 2014).
1460 Il résulte des constats précédents qu'une baisse du niveau de nappe, faisant augmenter
1461 la RE et ne changeant pas ou peu la PPB, conduit à une baisse de l'ENE. Cette di-
1462 minution de l'ENE est cohérente avec la littérature, que ce soit des expérimentations
1463 en mésocosmes (Aerts et Ludwig, 1997; Blodau *et al.*, 2004), ou in-situ (Bubier *et al.*,
1464 2003; Sonnentag *et al.*, 2010). Malgré tout l'extrapolation de ses résultats à d'autres
1465 situations n'est pas évidente car fortement fonction du contexte. D'autre études n'ont,
1466 par exemple, pas observé d'influence du niveau de la nappe sur la RE (Updegraff *et al.*,
1467 2001). Par ailleurs Laiho (2006) a montré l'importance du contexte et notamment celui
1468 de l'échelle de temps considéré qui peut impliquer des phénomènes différents et donc
1469 avoir des conséquences différentes.

1470 La dépendance entre les flux de CH₄ et le niveau de la nappe, devant conduire à une
1471 baisse des émissions quand le niveau de la nappe diminue, comme décrite dans Aerts et
1472 Ludwig (1997), Pelletier *et al.* (2007) ou Turetsky *et al.* (2008), n'a pas été clairement
1473 observée. Ce constat rejoins d'autres études dans lesquelles une relation inverse ou un
1474 absence de relation a été trouvé entre le CH₄ et le niveau de la nappe Kettunen *et al.*
1475 (1996); Bellisario *et al.* (1999); Treat *et al.* (2007). L'observation d'un pic de méthane
1476 suivant de quelques jours une phase de hausse du niveau de la nappe, est également
1477 rapportée par Kettunen *et al.* (1996). (**And so what ?**)

1478 4.4.3 Effet cycles multiples

1479 5 Variation journalière de la respiration de
1480 l'écosystème (article)

1481		
1482	5.1 Introduction	95
1483		
1484	5.2 Procédure expérimentale et analytique	95
1485	5.2.1 Synchronisation des données	95
1486	5.2.2 Différence entre mesures de jour et mesures de nuit	95
1487	5.2.3 Caractérisation physico-chimique	95
1488	5.3 Résultats	95
1489	5.3.1 Température de l'air et variabilité de RE	95
1490	5.3.2 Synchronisation RE et température du sol	95
1491	5.3.3 Équations utilisées	95
1492	5.3.4 Relation entre RE et la température	95
1493	5.3.5 Évolution du Q ₁₀	95
1494	5.3.6 Différence entre mesures de jour et de nuit	95
1495	5.3.7 Caractérisation de la tourbe	95
1496	5.4 Discussion	95
1497	5.4.1 Différence de RE entre les différents sites	95
1498	5.4.2 Temps de latence entre température et RE	95
1499	5.4.3 La synchronisation entre RE et la température améliore la	
1500	représentation de la sensibilité de RE à la température	95
1501	5.4.4 Différence entre mesure de RE faite le jour et la nuit	95
1502	5.4.5 La sensibilité du Q ₁₀ à la profondeur de la température et à	
1503	la synchronisation	95
1505		

5.4. Discussion

₁₅₀₆ 5.1 Introduction

₁₅₀₇ 5.2 Procédure expérimentale et analytique

₁₅₀₈ 5.2.1 Synchronisation des données

₁₅₀₉ 5.2.2 Différence entre mesures de jour et mesures de nuit

₁₅₁₀ 5.2.3 Caractérisation physico-chimique

₁₅₁₁ 5.3 Résultats

₁₅₁₂ 5.3.1 Température de l'air et variabilité de RE

₁₅₁₃ 5.3.2 Synchronisation RE et température du sol

₁₅₁₄ 5.3.3 Équations utilisées

₁₅₁₅ 5.3.4 Relation entre RE et la température

₁₅₁₆ 5.3.5 Évolution du Q10

₁₅₁₇ 5.3.6 Différence entre mesures de jour et de nuit

₁₅₁₈ 5.3.7 Caractérisation de la tourbe

₁₅₁₉ 5.4 Discussion

₁₅₂₀ 5.4.1 Différence de RE entre les différents sites

₁₅₂₁ 5.4.2 Temps de latence entre température et RE

₁₅₂₂ 5.4.3 La synchronisation entre RE et la température améliore

¹⁵²⁷ Conclusions et perspectives

₁₅₂₈ 5.5 Bilan du bilan (de C) ?

- ₁₅₂₉ Flux fort
- ₁₅₃₀ sensibilité param forte
- ₁₅₃₁ Modèles multi annuel et prise en compte de la végétation
- ₁₅₃₂ Quid des variations journalières dans un bilan annuel ?
- ₁₅₃₃ Les prendre en compte améliorerait-il les modèles
- ₁₅₃₄ modèles globaux ? **limitations des équations** : Plus généralement, la majorité des
- ₁₅₃₅ tourbières sont sous la neige une partie de l'année, ce qui n'arrive que rarement sur
- ₁₅₃₆ la tourbière de La Guette et une partie possède également des zones d'eau libre, qui
- ₁₅₃₇ n'existent pas sur ce site.
- ₁₅₃₈ modèles globaux et profondeur de tourbe

₁₅₃₉ 5.6 Résilience de la tourbe par rapport aux

- ₁₅₄₀ 2 années sèches qui précèdent le BdC

₁₅₄₁ (lien chap 3 et 4)

₁₅₄₂ 5.7 Ouverture vers d'autre méthodes de me-

₁₅₄₃ sures

- ₁₅₄₄ — chambre automatique (lien chap 5, et chap 3?)
- ₁₅₄₅ — tour eddy covariance (lien chap 5 et chap 3?)

₁₅₄₆ Bibliographie

- ₁₅₄₇ AERTS, R. et LUDWIG, F. (1997). Water-table changes and nutritional status affect
₁₅₄₈ trace gas emissions from laboratory columns of peatland soils. *Soil Biology and*
₁₅₄₉ *Biochemistry*, 29(11–12):1691–1698.
- ₁₅₅₀ ALM, J., SAARNIO, S., NYKÄNEN, H., SILVOLA, J. et MARTIKAINEN, P. (1999). Winter
₁₅₅₁ CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeo-*
₁₅₅₂ *chemistry*, 44(2):163–186.
- ₁₅₅₃ ALM, J., TALANOV, A., SAARNIO, S., SILVOLA, J., IKKONEN, E., AALTONEN, H.,
₁₅₅₄ NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1997). Reconstruction of the carbon balance
₁₅₅₅ for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland. *Oecologia*, 110:423–431.
- ₁₅₅₆ ANDREJKO, M. J., FIENE, F. et COHEN, A. D. (1983). Comparison of ashing techniques
₁₅₅₇ for determination of the inorganic content of peats. In *Testing of Peats and Organic*
₁₅₅₈ *Soils : A Symposium*, volume 820, pages 5–10. ASTM International.
- ₁₅₅₉ AURELA, M., RIUTTA, T., LAURILA, T., TUOVINEN, J.-P., VESALA, T., TUITILA,
₁₅₆₀ E.-S., RINNE, J., HAAPANALA, S. et LAINE, J. (2007). CO₂ exchange of a sedge fen
₁₅₆₁ in southern Finland—the impact of a drought period. *Tellus B*, 59(5):826–837.
- ₁₅₆₂ BALLANTYNE, D. M., HRIBLJAN, J. A., PYPKER, T. G. et CHIMNER, R. A. (2014).
₁₅₆₃ Long-term water table manipulations alter peatland gaseous carbon fluxes in nor-
₁₅₆₄ thern Michigan. *Wetlands Ecol. Manage.*, 22(1):35–47.
- ₁₅₆₅ BEER, C., REICHSTEIN, M., TOMELLERI, E., CIAIS, P., JUNG, M., CARVALHAIS, N.,
₁₅₆₆ RÖDENBECK, C., ARAIN, M. A., BALDOCCHI, D., BONAN, G. B., BONDEAU, A.,
₁₅₆₇ CESCATTI, A., LASSLOP, G., LINDROTH, A., LOMAS, M., LUSSAERT, S., MARGO-
₁₅₆₈ LIS, H., OLESON, K. W., ROUPSARD, O., VEENENDAAL, E., VIOVY, N., WILLIAMS,
₁₅₆₉ C., WOODWARD, F. I. et PAPALE, D. (2010). Terrestrial Gross Carbon Dioxide Up-
₁₅₇₀ take : Global Distribution and Covariation with Climate. *Science*, 329(5993):834–838.
- ₁₅₇₁ BELLISARIO, L. M., BUBIER, J. L., MOORE, T. R. et CHANTON, J. P. (1999). Controls
₁₅₇₂ on CH₄ emissions from a northern peatland. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(1):81–
₁₅₇₃ 91.
- ₁₅₇₄ BLODAU, C., BASILIKO, N. et MOORE, T. R. (2004). Carbon turnover in peatland
₁₅₇₅ mesocosms exposed to different water table levels. *Biogeochemistry*, 67(3):331–351.
- ₁₅₇₆ BOND-LAMBERTY, B. et THOMSON, A. (2010). Temperature-associated increases in
₁₅₇₇ the global soil respiration record. *Nature*, 464(7288):579–582.
- ₁₅₇₈ BORTOLUZZI, E., EPRON, D., SIEGENTHALER, A., GILBERT, D. et BUTTLER, A.
₁₅₇₉ (2006). Carbon balance of a European mountain bog at contrasting stages of re-
₁₅₈₀ generation. *New Phytol.*, 172(4):708–718.

- 1581 BUBIER, J., COSTELLO, A., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et SAVAGE, K. (1993).
1582 Microtopography and methane flux in boreal peatlands, northern Ontario, Canada.
1583 *Canadian Journal of Botany*, 71(8):1056–1063.
- 1584 BUBIER, J. L., BHATIA, G., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et LAFLEUR, P. M. (2003).
1585 Spatial and Temporal Variability in Growing-Season Net Ecosystem Carbon Dioxide
1586 Exchange at a Large Peatland in Ontario, Canada. *Ecosystems*, 6:353–367.
- 1587 BUBIER, J. L., CRILL, P. M., MOORE, T. R., SAVAGE, K. et VARNER, R. K. (1998).
1588 Seasonal patterns and controls on net ecosystem CO₂ exchange in a boreal peatland
1589 complex. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(4):703–714.
- 1590 BUBIER, J. L., MOORE, T. R., BELLISARIO, L., COMER, N. T. et CRILL, P. M. (1995).
1591 Ecological controls on methane emissions from a Northern Peatland Complex in the
1592 zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada. *Global Biogeochemical Cycles*,
1593 9(4):455–470.
- 1594 BUCKLAND, P. C. (1993). Peatland archaeology : a conservation resource on the edge
1595 of extinction. *Biodivers. Conserv.*, 2(5):513–527.
- 1596 CHAPMAN, S., BUTTLER, A., FRANCEZ, A.-J., LAGGOUN-DÉFARGE, F., VASANDER,
1597 H., SCHLOTER, M., COMBE, J., GROSVERNIER, P., HARMS, H., EPRON, D. et
1598 OTHERS (2003). Exploitation of northern peatlands and biodiversity maintenance :
1599 a conflict between economy and ecology. *Front. Ecol. Environ.*, 1(10):525–532.
- 1600 CHRISTENSEN, J. H., HEWITSON, B., BUSUIOC, A., CHEN, A., GAO, X., HELD, R.,
1601 JONES, R., KOLLI, R. K., KWON, W. K., LAPRISE, R. et OTHERS (2007). Regional
1602 climate projections. *Clim. Change 2007 Phys. Sci. Basis Contrib. Work. Group*
1603 *Fourth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Change Univ. Press Camb. Chapter 11*,
1604 pages 847–940.
- 1605 CHRISTENSEN, J. H., KANIKICHLARLA, K. K., MARSHALL, G. et TURNER, J. (2013).
1606 Climate phenomena and their relevance for future regional climate change.
- 1607 CIAIS, P., SABINE, C., BALA, G., BOPP, L., BROVKIN, V., CANADELL, J., CHHABRA,
1608 A., DEFRIES, R., GALLOWAY, J., HEIMANN, M. et OTHERS (2014). Carbon and
1609 other biogeochemical cycles. In *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis.*
1610 *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovern-*
1611 *mental Panel on Climate Change*, pages 465–570. Cambridge University Press.
- 1612 COLMER, T. D. (2003). Long-distance transport of gases in plants : a perspective on
1613 internal aeration and radial oxygen loss from roots. *Plant Cell Environ.*, 26(1):17–36.
- 1614 CROW, S. E. et WIEDER, R. K. (2005). Sources of CO₂ emission from a northern
1615 peatland : root respiration, exudation, and decomposition. *Ecology*, 86(7):1825–1834.
- 1616 DINSMORE, K. J., SKIBA, U. M., BILLETT, M. F. et REES, R. M. (2009). Effect
1617 of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms. *Plant Soil*,
1618 318(1-2):229–242.
- 1619 ESWARAN, H., VAN DEN BERG, E. et REICH, P. (1993). Organic carbon in soils of
1620 the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57(1):192–194.

- 1621 FARQUHAR, G. D., VON CAEMMERER, S. et BERRY, J. A. (1980). A biochemical model
1622 of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149(1):78–90.
- 1623 FRANCEZ, A.-J. (2000). La dynamique du carbone dans les tourbières à Sphagnum,
1624 de la sphaine à l'effet de serre. *L'Année Biologique*, 39:205–270.
- 1625 FROLKING, S., TALBOT, J., JONES, M. C., TREAT, C. C., KAUFFMAN, J. B., TUIT-
1626 TILA, E.-S. et ROULET, N. (2011). Peatlands in the Earth's 21st century climate
1627 system. *Environ. Rev.*, 19(NA):371–396.
- 1628 GIRARD, M. C., WALTER, C., REMY, J. C., BERTHELIN, J. et MOREL, J. L. (2011).
1629 *Sols et Environnement*, (2e édn), volume 28 de *Sciences Sup*. Editions Dunod : Paris,
1630 Vottem, Belgique, 2nd édition édition.
- 1631 GOGO, S., GUIMBAUD, C., LAGGOUN-DÉFARGE, F., CATOIRE, V. et ROBERT, C.
1632 (2011). In situ quantification of CH₄ bubbling events from a peat soil using a new
1633 infrared laser spectrometer. *Journal of Soils and Sediments*, 11:545–551.
- 1634 GORHAM, E. (1991). Northern Peatlands : Role in the Carbon Cycle and Probable
1635 Responses to Climatic Warming. *Ecol. Appl.*, 1(2):182–195.
- 1636 GÖRRES, C. M., KUTZBACH, L. et ELSGAARD, L. (2014). Comparative modeling of
1637 annual CO₂ flux of temperate peat soils under permanent grassland management.
1638 *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 186:64–76.
- 1639 GUIMBAUD, C., CATOIRE, V., GOGO, S., ROBERT, C., CHARTIER, M., LAGGOUN-
1640 DÉFARGE, F., GROSSEL, A., ALBÉRIC, P., POMATHIOD, L., NICOUILLAUD, B. et
1641 RICHARD, G. (2011). A portable infrared laser spectrometer for flux measurements
1642 of trace gases at the geosphere-atmosphere interface. *Measurement Science & Tech-*
1643 *nology*, 22(7):1–17.
- 1644 HARRIS, D. C. (2010). Charles David Keeling and the Story of Atmospheric CO₂
1645 Measurements†. *Anal. Chem.*, 82(19):7865–7870.
- 1646 JACOBS, C. M. J., JACOBS, A. F. G., BOSVELD, F. C., HENDRIKS, D. M. D., HENSEN,
1647 A., KROON, P. S., MOORS, E. J., NOL, L., SCHRIER-UIJL, A. et VEENENDAAL, E. M.
1648 (2007). Variability of annual CO₂ exchange from Dutch grasslands. *Biogeosciences*,
1649 4(5):803–816.
- 1650 JOABSSON, A., CHRISTENSEN, T. R. et WALLÉN, B. (1999). Vascular plant controls
1651 on methane emissions from northern peatforming wetlands. *Trends in Ecology &*
1652 *Evolution*, 14(10):385–388.
- 1653 JONES, M. C. et YU, Z. (2010). Rapid deglacial and early Holocene expansion of
1654 peatlands in Alaska. *PNAS*, 107(16):7347–7352.
- 1655 JOOSTEN, H. et CLARKE, D. (2002). *Wise use of mires and peatlands*. International
1656 mire conservation group.
- 1657 JUNE, T., EVANS, J. R. et FARQUHAR, G. D. (2004). A simple new equation for the
1658 reversible temperature dependence of photosynthetic electron transport : a study on
1659 soybean leaf. *Funct. Plant Biol.*, 31(3):275–283. WOS :000220831200008.

- 1660 KAUFMAN, D. S., AGER, T. A., ANDERSON, N. J., ANDERSON, P. M., ANDREWS,
1661 J. T., BARTLEIN, P. J., BRUBAKER, L. B., COATS, L. L., CWYNAR, L. C., DUVAL,
1662 M. L., DYKE, A. S., EDWARDS, M. E., EISNER, W. R., GAJEWSKI, K., GEIRSDÓT-
1663 TIR, A., HU, F. S., JENNINGS, A. E., KAPLAN, M. R., KERWIN, M. W., LOZHKN,
1664 A. V., MACDONALD, G. M., MILLER, G. H., MOCK, C. J., OSWALD, W. W., OTTO-
1665 BLIESNER, B. L., PORINCHU, D. F., RÜHLAND, K., SMOL, J. P., STEIG, E. J. et
1666 WOLFE, B. B. (2004). Holocene thermal maximum in the western Arctic (0–180°W).
1667 *Quaternary Science Reviews*, 23(5–6):529–560.
- 1668 KETCHESON, S. J. et PRICE, J. S. (2014). Characterization of the fluxes and stores of
1669 water within newly formed Sphagnum moss cushions and their environment. *Ecohy-
1670drology*, 7(2):771–782.
- 1671 KETTUNEN, A., KAITALA, V., ALM, J., SILVOLA, J., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN,
1672 P. J. (1996). Cross-correlation analysis of the dynamics of methane emissions from
1673 a boreal peatland. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 10(3):457–471.
- 1674 KIM, J. et VERMA, S. B. (1992). Soil surface CO₂ flux in a Minnesota peatland.
1675 *Biogeochemistry*, 18(1):37–51.
- 1676 LAI, D. (2009). Methane Dynamics in Northern Peatlands : A Review. *Pedosphere*,
1677 19(4):409–421.
- 1678 LAIHO, R. (2006). Decomposition in peatlands : Reconciling seemingly contrasting
1679 results on the impacts of lowered water levels. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8):
1680 2011–2024.
- 1681 LANDVA, A. O., KORPIJAAKKO, E. O. et PHEENEY, P. E. (1983). Geotechnical clas-
1682 sification of peats and organic soils. In *Testing of peats and organic soils*, volume
1683 820, pages 37–51.
- 1684 LAPPALAINEN, E. (1996). *Global peat resources*, volume 4. International Peat Society
1685 Jyskä.
- 1686 LELIEVELD, J. O. S., CRUTZEN, P. J. et DENTENER, F. J. (1998). Changing concentra-
1687 tion, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus B*, 50(2):128–150.
- 1688 LIVINGSTON, G. P. et HUTCHINSON, G. L. (1995). Enclosure-based measurement of
1689 trace gas exchange : applications and sources of error. *Biog. Trace Gases Meas.*
1690 *Emiss. Soil Water*, pages 14–51.
- 1691 LONG, K. D., FLANAGAN, L. B. et CAI, T. (2010). Diurnal and seasonal variation in
1692 methane emissions in a northern Canadian peatland measured by eddy covariance.
1693 *Global Change Biology*, 16(9):2420–2435.
- 1694 LUND, M., CHRISTENSEN, T. R., LINDROTH, A. et SCHUBERT, P. (2012). Effects
1695 of drought conditions on the carbon dioxide dynamics in a temperate peatland.
1696 *Environ. Res. Lett.*, 7(4):045704.
- 1697 LUO, Y. et ZHOU, X. (2006). Chapter 8 - Methods of measurements and estimations.
1698 In LUO, Y. et ZHOU, X., éditeurs : *Soil Respiration and the Environment*, pages 161
1699 – 185. Academic Press, Burlington.

- 1700 MACDONALD, G. M., BEILMAN, D. W., KREMENETSKI, K. V., SHENG, Y., SMITH,
 1701 L. C. et VELICHKO, A. A. (2006). Rapid early development of circumarctic peatlands
 1702 and atmospheric CH₄ and CO₂ variations. *Science*, 314(5797):285–288.
- 1703 MANNEVILLE, O. (1999). *Le monde des tourbières et des marais : France, Suisse,
 1704 Belgique et Luxembourg*. Delachaux & Niestle.
- 1705 NATIONAL WETLANDS WORKING GROUP (1997). *The Canadian wetland classifica-
 1706 tion system*. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 2nd edition édition.
- 1707 ORLOWSKY, B. et SENEVIRATNE, S. I. (2012). Global changes in extreme events :
 1708 regional and seasonal dimension. *Clim. Change*, 110(3-4):669–696.
- 1709 PEICHL, M., ÖQUIST, M., LÖFVENIUS, M. O., ILSTEDT, U., SAGERFORS, J., GRELLÉ,
 1710 A., LINDROTH, A. et NILSSON, M. B. (2014). A 12-year record reveals pre-growing
 1711 season temperature and water table level threshold effects on the net carbon dioxide
 1712 exchange in a boreal fen. *Environ. Res. Lett.*, 9(5):055006.
- 1713 PELLETIER, L., MOORE, T. R., ROULET, N. T., GARNEAU, M. et BEAULIEU-AUDY,
 1714 V. (2007). Methane fluxes from three peatlands in the La Grande Rivière watershed,
 1715 James Bay lowland, Canada. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).
- 1716 POST, W. M., EMANUEL, W. R., ZINKE, P. J. et STANGENBERGER, A. G. (1982). Soil
 1717 carbon pools and world life zones. *Nature*, 298:156–159.
- 1718 PUMPANEN, J., KOLARI, P., ILVESNIEMI, H., MINKKINEN, K., VESALA, T., NIINISTÖ,
 1719 S., LOHILA, A., LARMOLA, T., MORERO, M., PIHLATIE, M., JANSSENS, I., YUSTE,
 1720 J. C., GRÜNZWEIG, J. M., RETH, S., SUBKE, J.-A., SAVAGE, K., KUTSCH, W., ØS-
 1721 TRENG, G., ZIEGLER, W., ANTHONI, P., LINDROTH, A. et HARI, P. (2004). Com-
 1722 parison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agric. For.
 1723 Meteorol.*, 123(3–4):159–176.
- 1724 RAMEAU, J.-C., MANSION, D. et DUMÉ, G. (2008). *Flore forestière française : Plaines
 1725 et collines*. Forêt privée française.
- 1726 RAMSAR, C. (1987). *Convention relative aux zones humides d'importance internatio-
 1727 nale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau, (Ramsar, Iran, 1971) telle
 1728 qu'amendée en 1982 et 1987*.
- 1729 ROBERT, C. (2007). Simple, stable, and compact multiple-reflection optical cell for
 1730 very long optical paths. *Appl. Opt.*, 46(22):5408.
- 1731 ROBERT, M. et SAUGIER, B. (2003). Contribution des écosystèmes continentaux à la
 1732 séquestration du carbone. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(6–7):577–595.
- 1733 RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013a). Peat and organic soil. In *The biology of Peatlands*,
 1734 pages 85–107. Oxford University Press.
- 1735 RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013b). Sphagnum - the builder of boreal peatlands. In
 1736 *The biology of Peatlands*, pages 65–84. Oxford University Press.

- 1737 SIEGENTHALER, U. et OESCHGER, H. (1987). Biospheric CO₂ emissions during the
1738 past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus B*, 39B(1-
1739 2):140–154.
- 1740 SILVOLA, J., ALM, J., AHLHOLM, U., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1996).
1741 The contribution of plant roots to CO₂ fluxes from organic soils. *Biol Fertil Soils*,
1742 23(2):126–131.
- 1743 SMITH, L. C., MACDONALD, G. M., VELICHKO, A. A., BEILMAN, D. W., BORISOVA,
1744 O. K., FREY, K. E., KREMENETSKI, K. V. et SHENG, Y. (2004). Siberian Peatlands
1745 a Net Carbon Sink and Global Methane Source Since the Early Holocene. *Science*,
1746 303(5656):353–356.
- 1747 SONNENTAG, O., VAN DER KAMP, G., BARR, A. G. et CHEN, J. M. (2010). On the
1748 relationship between water table depth and water vapor and carbon dioxide fluxes
1749 in a minerotrophic fen. *Glob. Change Biol.*, 16(6):1762–1776.
- 1750 STRACK, M. (2008). *Peatlands and climate change*. IPS, International Peat Society,
1751 Jyväskylä, Finland.
- 1752 STRACK, M., WALLER, M. F. et WADDINGTON, J. M. (2006). Sedge succession and
1753 peatland methane dynamics : A potential feedback to climate change. *Ecosystems*,
1754 9(2):278–287.
- 1755 STRACK, M. et ZUBACK, Y. C. A. (2013). Annual carbon balance of a peatland 10 yr
1756 following restoration. *Biogeosciences*, 10(5):2885–2896.
- 1757 TREAT, C. C., BUBIER, J. L., VARNER, R. K. et CRILL, P. M. (2007). Timescale
1758 dependence of environmental and plant-mediated controls on CH₄ flux in a temperate
1759 fen. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).
- 1760 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2012). Methane fluxes from a
1761 patterned fen of the northeastern part of the La Grande river watershed, James Bay,
1762 Canada. *Biogeochemistry*, 113(1-3):409–422.
- 1763 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2014). Interannual variability in
1764 the CO₂ balance of a boreal patterned fen, James Bay, Canada. *Biogeochemistry*,
1765 118(1-3):371–387.
- 1766 TURETSKY, M. R., TREAT, C. C., WALDROP, M. P., WADDINGTON, J. M., HAR-
1767 DEN, J. W. et MC GUIRE, A. D. (2008). Short-term response of methane fluxes and
1768 methanogen activity to water table and soil warming manipulations in an Alaskan
1769 peatland. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 113(G3).
- 1770 TURUNEN, J., TOMPOPO, E., TOLONEN, K. et REINIKAINEN, A. (2002). Estimating
1771 carbon accumulation rates of undrained mires in Finland—application to boreal and
1772 subarctic regions. *The Holocene*, 12(1):69–80.
- 1773 UPDEGRAFF, K., BRIDGHAM, S. D., PASTOR, J., WEISHAMPEL, P. et HARTH, C.
1774 (2001). Response of CO₂ and CH₄ emissions from peatlands to warming and water
1775 table manipulation. *Ecol. Appl.*, 11(2):311–326.

- 1776 VIEL, E., BINET, S., GOGO, S. et LAGGOUN-DÉFARGE, F. (2015). Tree invasion
1777 controls the drainage pattern in La Guette peatland (France) : impact on the water
1778 storage capacity of the peat. *Journal of Hydrology* (*submitted*).
- 1779 WADDINGTON, J. M. et ROULET, N. T. (2000). Carbon balance of a boreal patterned
1780 peatland. *Global Change Biology*, 6(1):87–97.
- 1781 WHALEN, S. (2005). Biogeochemistry of Methane Exchange between Natural Wetlands
1782 and the Atmosphere. *Environmental Engineering Science*, 22(1):73–94.
- 1783 WORRALL, F., BURT, T., ROWSON, J., WARBURTON, J. et ADAMSON, J. (2009).
1784 The multi-annual carbon budget of a peat-covered catchment. *Science of The Total
1785 Environment*, 407(13):4084–4094.
- 1786 YU, Z., BEILMAN, D. W. et JONES, M. C. (2009). Sensitivity of northern peatland car-
1787 bon dynamics to Holocene climate change. In *Carbon cycling in northern peatlands*,
1788 volume 184, pages 55–69. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Se-
1789 ries Washington, DC.
- 1790 YU, Z., LOISEL, J., BROSSEAU, D. P., BEILMAN, D. W. et HUNT, S. J. (2010). Global
1791 peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophys. Res. Lett.*, 37(13).

Index

A

1792 atterrissage 11

C

1794 carbone

1796 stock 12

1797 changements globaux 2, 14

E

1799 échange net de l'écosystème

1800 contrôle 21

P

1802 paludification 11

1803 photosynthèse 17

1804 production primaire brute

1805 contrôle 21

R

1807 respiration 18

1808 de l'écosystème 18

1809 contrôle 20

1810 du sol 18

S

1812 services écologiques 3

T

1814 tourbières 8–16

1815 distribution 11

1816 formation 11

1817 surface 10

1818 utilisation 14

1819 tourbification 10

Z

1820 zone humide 8

1822 Annexes

₁₈₂₃ A Photos supplémentaires



(a) droséra

FIGURE 1 – Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure.

₁₈₂₄ B protocole végétation

₁₈₂₅ Le suivi non-destructif d'une végétation n'est pas triviale et nécessite la mise en
₁₈₂₆ place de protocoles particuliers en fonction du type de végétation. L'objectif est de
₁₈₂₇ pouvoir estimer une biomasse produite en impactant au minimum la végétation en
₁₈₂₈ place. Pour l'ensemble des espèces végétales présentes dans les embases servant à la
₁₈₂₉ mesure des flux un recouvrement à été estimé, à l'œil.

₁₈₃₀ **La strate arbustive**

₁₈₃₁ Pour la strate arbustive des mesures de hauteur moyenne ont été effectuées, en
₁₈₃₂ mesurant depuis le niveau du sol, ou le toit des sphaignes, si elles étaient présentes,
₁₈₃₃ jusqu'au sommet de l'individu.

₁₈₃₄ **La strate herbacée**

₁₈₃₅ Pour la strate herbacée, en 2013, 5 individus des deux espèces majoritaires (*Eriophorum vaginatum* ? *augustifolium* ?, *Molinia Caerulea*) ont été marqués afin de pourvoir
₁₈₃₆ les mesurer plusieurs fois au cours de la saison. Cependant les difficultés à retrouver
₁₈₃₇ les individus marqués couplés à la mort d'un nombre important d'entre eux n'ont pas
₁₈₃₈ permis d'acquérir de résultats significatifs. En conséquence en 2014 ces deux espèces
₁₈₃₉ ont fait l'objet de comptage exhaustif et de mesure de hauteur moyenne.

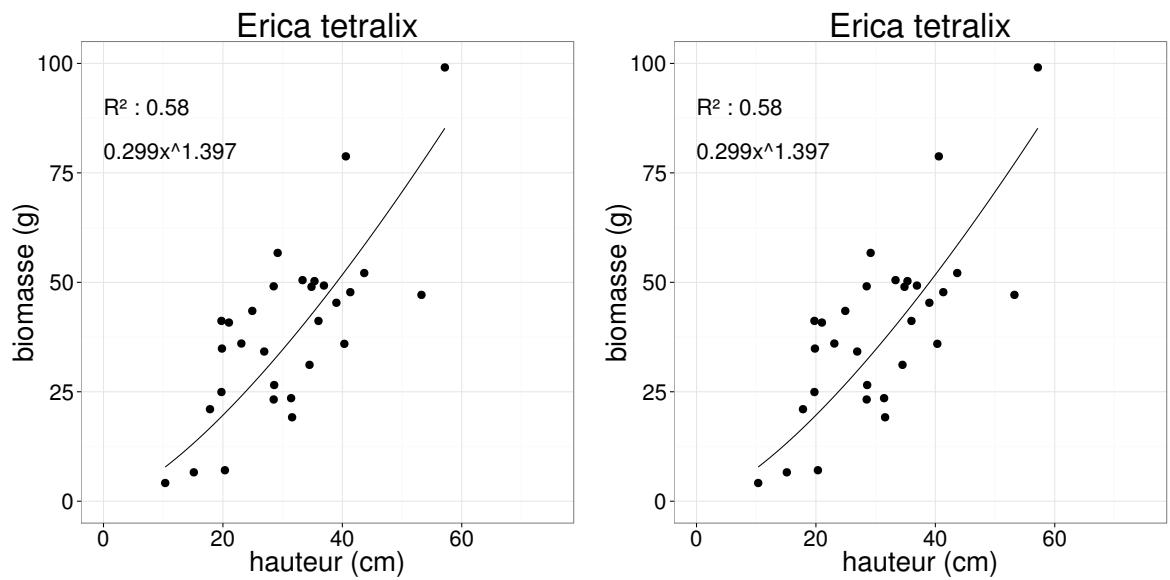


FIGURE 2 – Calibration de la biomasse en fonction de la hauteur

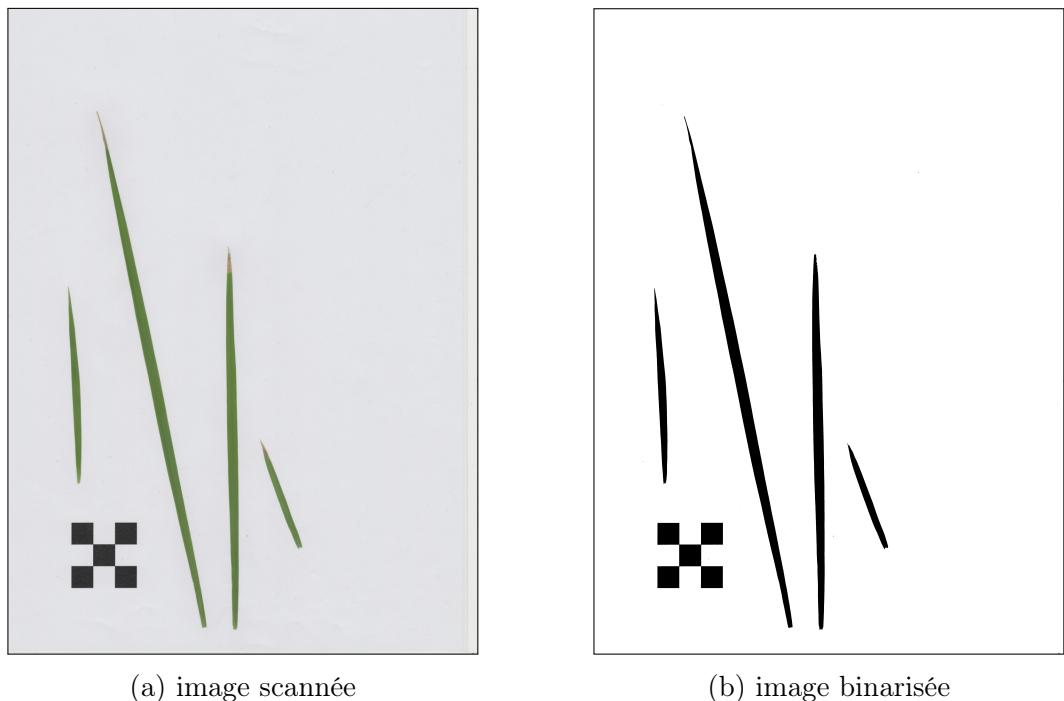


FIGURE 3 – Scanne des feuilles

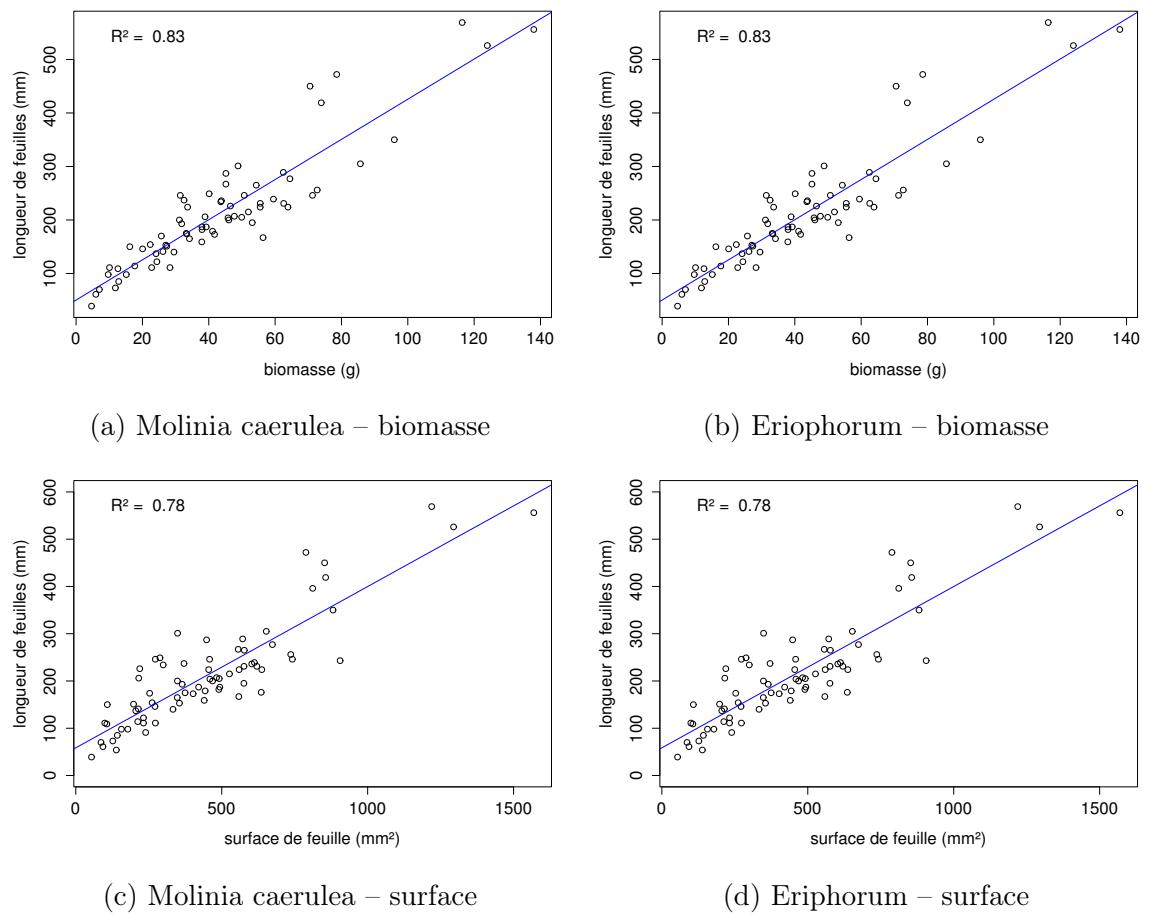


FIGURE 4 – Calibration de la biomasse herbacées pour *Molinia Caerulea* (a), pour *Eriophorum* (b) et de la surface de feuille pour *Molinia Caerulea* (c), pour *Eriophorum* (d) en fonction de la hauteur

₁₈₄₁ C CARBIODIV

₁₈₄₂ D package m70r

[Prénom NOM]
[Titre de la thèse (en français)]

Résumé : (1700 caractères max.)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Proin volutpat ipsum id purus ultrices lobortis. Maecenas ornare enim quis eros. Nunc eget mauris ut quam malesuada mattis. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae ; Integer vel tellus. Nam rutrum, purus non sodales rhoncus, quam magna imperdiet eros, sit amet euismod justo metus at orci. Suspendisse neque turpis, feugiat interdum, faucibus vel, aliquet quis, risus. Etiam est elit, eleifend a, consequat sit amet, scelerisque nec, odio. Quisque id odio quis libero iaculis tincidunt. Sed non mi. Morbi aliquam commodo nibh. Integer justo purus, pulvinar a, suscipit vel, iaculis a, justo. Morbi ut orci. Maecenas fringilla orci. Phasellus auctor, enim vitae tempus egestas, justo mi cursus sem, vel blandit leo turpis vitae quam. Etiam sit amet felis vitae eros ornare porttitor.

Curabitur felis velit, aliquam at, aliquet in, iaculis vitae, velit. Nunc lobortis magna id ligula. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae ; Integer congue ultrices mi. Isdem diebus Apollinaris Domitianus gener, paulo ante agens palatii Caesaris curam, ad Mesopotamiam missus a socero per militares numeros immode dicte scrutabatur, an quaedam altiora meditantis iam Galli secreta suscepit scripta, qui conpertis Antiochiae gestis per minorem Armeniam lapsus Constantinopolim petit.

Mots clés : mot 1, mot 2, ...

[Titre de la thèse (en anglais)]

Résumé : (1700 caractères max.)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Proin volutpat ipsum id purus ultrices lobortis. Maecenas ornare enim quis eros. Nunc eget mauris ut quam malesuada mattis. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae ; Integer vel tellus. Nam rutrum, purus non sodales rhoncus, quam magna imperdiet eros, sit amet euismod justo metus at orci. Suspendisse neque turpis, feugiat interdum, faucibus vel, aliquet quis, risus. Etiam est elit, eleifend a, consequat sit amet, scelerisque nec, odio. Quisque id odio quis libero iaculis tincidunt. Sed non mi. Morbi aliquam commodo nibh. Integer justo purus, pulvinar a, suscipit vel, iaculis a, justo. Morbi ut orci. Maecenas fringilla orci. Phasellus auctor, enim vitae tempus egestas, justo mi cursus sem, vel blandit leo turpis vitae quam. Etiam sit amet felis vitae eros ornare porttitor.

Curabitur felis velit, aliquam at, aliquet in, iaculis vitae, velit. Nunc lobortis magna id ligula. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae ; Integer congue ultrices mi. Isdem diebus Apollinaris Domitianus gener, paulo ante agens palatii Caesaris curam, ad Mesopotamiam missus a socero per militares numeros immode dicte scrutabatur, an quaedam altiora meditantis iam Galli secreta suscepit scripta, qui conpertis Antiochiae gestis per minorem Armeniam lapsus Constantinopolim petit.

Mots clés : mot 1, mot 2, ...