

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 GES et Tourbières	17
1.2.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières	18
1.2.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux	21
1.2.4 Bilans de carbone	26
2 Sites d'études et méthodologies employées	29
2.1 Présentation de la tourbière de La Guette	30
2.2 Autres sites du service national d'observation	35
2.3 Mesures de flux	36
2.3.1 Présentation des méthodologies possibles	36
2.3.2 Les mesures de CO ₂	37
2.3.3 Les mesures de CH ₄	39
2.3.4 Le calcul des flux	40
2.4 Facteurs contrôlants	41
2.4.1 acquisitions automatisées	41
3 Bilan de C de la tourbière de La Guette	43
3.1 Introduction	44
3.2 Procédure expérimentale et analytique	44
3.2.1 Méthodes de mesure	44
3.2.2 Modélisation du bilan de C	46
3.3 Résultats	50
3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la tourbière de La Guette	50
3.3.2 Sélection des modèles	56

3.3.3	Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle de l'écosystème	63
3.3.4	Variabilité spatiale du bilan	70
3.4	Discussion	72
3.4.1	Estimations des flux	72
3.4.2	Estimations des bilans	75
3.4.3	Sensibilité et limitations du bilan	75
3.4.4	Représentativité locale du modèle	76
3.4.5	Variation du bilan avec la végétation	76
3.4.6	perspectives	77
4	Effets de l'hydrologie sur les flux de GES	79
4.1	Introduction	80
4.2	Procédure expérimentale	81
4.2.1	Expérimentation A	82
4.2.2	Expérimentation B	82
4.2.3	traitement	83
4.3	Résultats	84
4.3.1	Expérimentation A	84
4.3.2	Expérimentation B	87
4.3.3	tendances générales	90
4.4	Discussion	90
4.4.1	Comparaison aux mesures <i>in-situ</i>	90
4.4.2	Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de gaz	92
4.4.3	Effet cycles multiples	93
5	Variation journalière de la respiration de l'écosystème (article)	95
5.1	Introduction	97
5.2	Procédure expérimentale et analytique	97
5.2.1	Synchronisation des données	97
5.2.2	Différence entre mesures de jour et mesures de nuit	97
5.2.3	Caractérisation physico-chimique	97
5.3	Résultats	97
5.3.1	Température de l'air et variabilité de RE	97
5.3.2	Synchronisation RE et température du sol	97
5.3.3	Équations utilisées	97
5.3.4	Relation entre RE et la température	97
5.3.5	Évolution du Q10	97
5.3.6	Différence entre mesures de jour et de nuit	97
5.3.7	Caractérisation de la tourbe	97
5.4	Discussion	97
5.4.1	Différence de RE entre les différents sites	97
5.4.2	Temps de latence entre température et RE	97
5.4.3	La synchronisation entre RE et la température améliore la représentation de la sensibilité de RE à la température	97
5.4.4	Différence entre mesure de RE faite le jour et la nuit	97
5.4.5	La sensibilité du Q10 à la profondeur de la température et à la synchronisation	97

Conclusions et perspectives	99
5.5 Bilan du bilan (de C) ?	100
5.6 Résilience de la tourbe par rapport aux 2 années sèches qui précèdent le BdC	100
5.7 Ouverture vers d'autre méthodes de mesures	100
Références bibliographiques	108
Index	109
Annexes	111
A Photos supplémentaires	112
B protocole végétation	112
C CARBIODIV	115
D package m70r	115

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	Décroissance de la proportion de CO ₂ de l'atmosphère suite à une émission idéalisée de 100 PgC. les graphes (a) et (b) est une moyenne de modèles (Joos <i>et al.</i> , 2013), le graphe (c) est une moyenne d'autres modèles (Archer <i>et al.</i> , 2009). Modifié d'après (Ciais <i>et al.</i> , 2014).	18
1.4	schéma des flux de carbone entre une tourbière et l'atmosphère	19
1.5	Productivités moyennes des espèces de sphagnes en g m ⁻² an ⁻¹ . Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard (Gunnarsson, 2005)	23
2.1	Site d'études SNO	30
2.2	Carte de la tourbière de La Guette	31
2.3	Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure.	33
2.4	Évolution du niveau de la pluviométrie, en mm, des années 2011 à 2014	34
2.5	Évolution du niveau de la nappe, en cm par rapport à la surface, des années 2011 à 2014	34
2.6	Évolution de la température de l'air (en °C) des années 2011 à 2014	35
2.7	Mesures de CO ₂	38
2.8	SPIRIT	39
3.1	Répartition des 20 placettes de mesures suivant un échantillonnage aléatoire stratifié.	45
3.2	Partitionnement des placettes en fonction de leur similarité en termes de composition végétale (pourcentage des strates muscinale, herbacées et arbustives)	49
3.3	Évolution du niveau de la nappe moyen des 20 embases mesuré pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	50
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	51
3.5	Évolution de la conductivité pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	51
3.6	Évolution du pH pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	52

3.7	Évolution de la concentration en carbone organique dissous dans l'eau du sol pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	52
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.	53
3.9	Évolution des flux de méthane moyen (N ?) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	55
3.10	Relations entre les flux de gaz et une sélection de facteurs contrôlant	55
3.11	PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.1	57
3.12	PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.3	59
3.13	RE modèles avec Tair	61
3.14	RE modèles avec Tair	62
3.15	CH ₄ modèle H	63
3.16	Flux de CO ₂ interpolé à partir de PPB-1 et PPB-2	65
3.17	Flux de CO ₂ interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3	66
3.18	Flux de CO ₂ interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3	66
3.19	Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres des modèles RE-1 et RE-3	69
3.20	Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2	70
3.21	Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2	71
4.1	Prélèvement des mésocosmes	83
4.2	Schéma d'un mésocosme	84
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.	85
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.	88
4.5	Relations entre les flux de GES et le niveau de la nappe	91
1	Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure.	112
2	Calibration de la biomasse en fonction de la hauteur	113
3	Scanne des feuilles	113
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	114

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 $\text{gC m}^{-2} \text{s}^{-1}$	27
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.	64
3.2	Bilan des flux en gCm2an1	67
3.3	Bilan des flux en gCm2an1	67
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.	68
3.5	Bilan des flux de CO ₂ en gCm2an1, en utilisant PPB-2 et RE-3	71
4.1	Récapitulatif des mesures pour les deux expérimentations	83

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 GES et Tourbières	17
⁹³	1.2.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières	18
⁹⁴	1.2.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux	21
⁹⁵	1.2.4 Bilans de carbone	26
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, 2013b). 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).

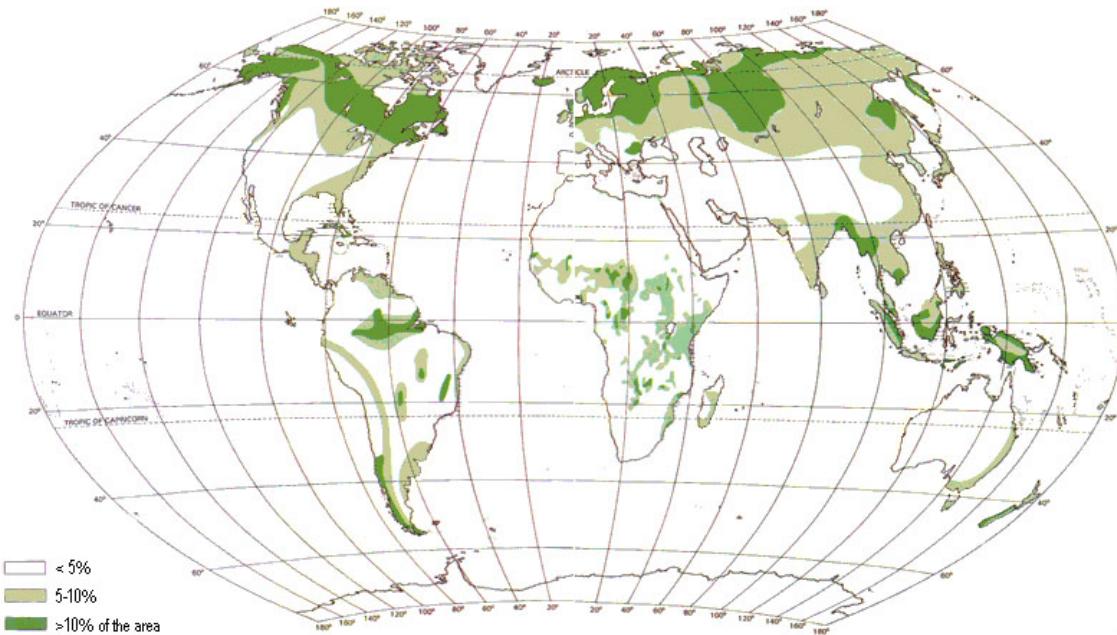


FIGURE 1.1 – Global distribution of peatlands

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

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

1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

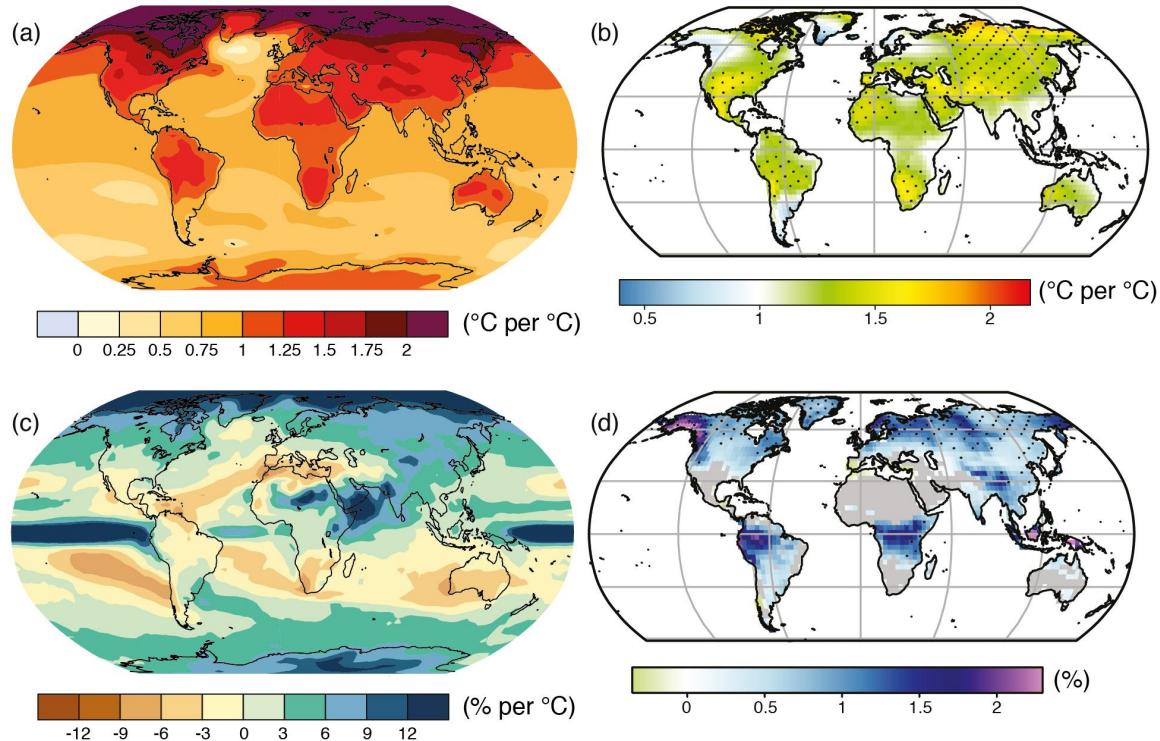


FIGURE 1.2 – Projection des changements à l'horizon 2100, des moyennes et extrêmes annuels (sur terre) des températures de l'air et des précipitations : (a) température de surface moyenne par °C de changement global moyen, (b) 90^e percentile des températures journalières maximum par °C de changement 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).

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

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

²⁷¹ 1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs ²⁷² contrôlants

²⁷³ 1.2.1 GES et Tourbières

²⁷⁴ Dans l'atmosphère le carbone est principalement présent dans l'atmosphère sous
²⁷⁵ forme de dioxyde de carbone (CO_2) et de méthane (CH_4).

²⁷⁶ La concentration en CO_2 dans l'atmosphère fluctuait avant l'ère industrielle entre
²⁷⁷ 180 et 290 ppm. En 1750 au début de l'ère industrielle sa concentration était toujours
²⁷⁸ de 280 ppm avant d'augmenter pour atteindre 391 ppm aujourd'hui (en 2011) (Ciais
²⁷⁹ et al., 2014). Différents processus permettent d'extraire du CO_2 de l'atmosphère, la
²⁸⁰ photosynthèse, la dissolution du CO_2 dans l'océan et enfin l'altération de silicate et les
²⁸¹ réactions avec le carbonate de calcium. Ces processus s'effectuent avec des échelles de
²⁸² temps différentes, en conséquence après une émission de CO_2 , il ne reste que 40 % de
²⁸³ cette émission après 100 ans, mais il reste toujours plus de 20 % après 1000 ans et plus
²⁸⁴ de 10 % après 10 000 ans (Joos et al., 2013; Ciais et al., 2014) (Figure 1.3).

²⁸⁵ La concentration en méthane de l'atmosphère est estimée à 350 ppb il y a 18 000 ans
²⁸⁶ environ lors de la dernière glaciation, à 720 ppb en 1750, et à 1800 ppb aujourd'hui (ou
²⁸⁷ plutôt en 2011) (Ciais et al., 2014). À l'inverse du CO_2 sa durée de vie dans l'atmosphère
²⁸⁸ est limitée : moins de 10 ans (Lelieveld et al., 1998; Prather et al., 2012). Malgré sa faible
²⁸⁹ durée dans l'atmosphère son potentiel de réchauffement global (PRG) est important 72
²⁹⁰ à 20 ans. Les zones humides sont la première source naturelle de CH_4 atmosphérique
²⁹¹ pour avec un flux à l'échelle globale estimé entre 145 et 285 Tg an^{-1} (Lelieveld et al.,
²⁹² 1998; Wuebbles et Hayhoe, 2002; Ciais et al., 2014) (Tableau ?). Les tourbières de
²⁹³ l'hémisphère nord comptent pour 46 Tg an^{-1} (Gorham, 1991) (pas de source plus
²⁹⁴ récente ?).

²⁹⁵ À l'échelle globale, le stockage de C par les tourbières, prenant en compte à la fois

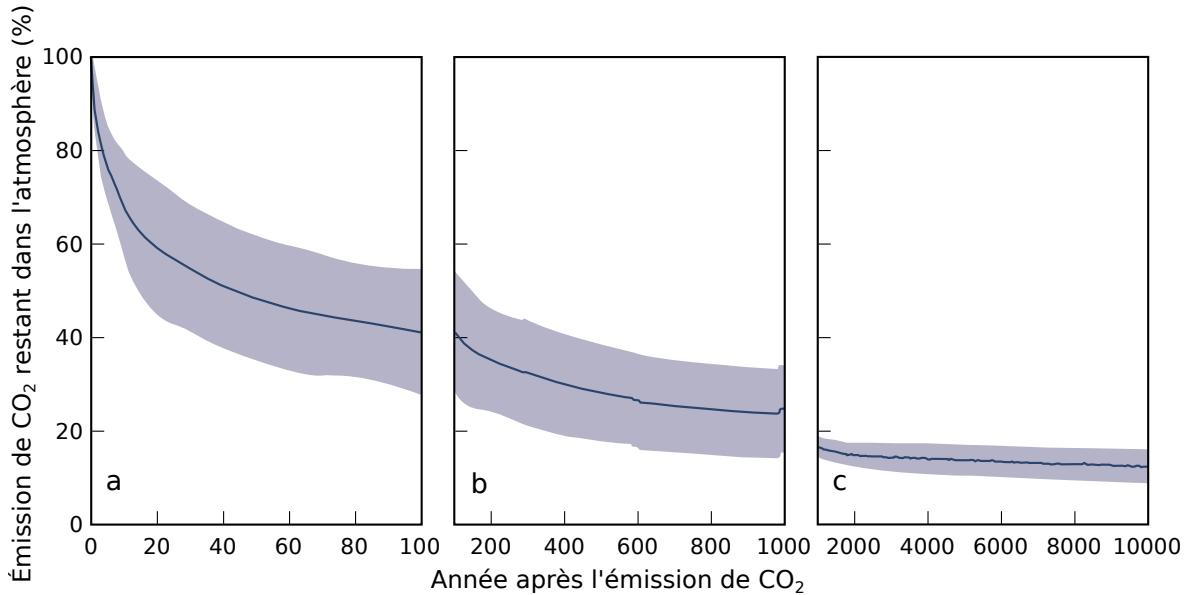


FIGURE 1.3 – Décroissance de la proportion de CO₂ de l'atmosphère suite à une émission idéalisée de 100 PgC. les graphes (a) et (b) est une moyenne de modèles ([Joos et al., 2013](#)), le graphe (c) est une moyenne d'autres modèles ([Archer et al., 2009](#)). Modifié d'après ([Ciais et al., 2014](#)).

²⁹⁶ le CO₂ et le CH₄, est estimé à 70 Tg an⁻¹ ([Clymo et al., 1998](#)).

²⁹⁷ 1.2.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières

²⁹⁸ 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 CO₂, 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 :



²⁹⁹ Ce flux est généralement appelé **Production Primaire Brute** (PPB), *Gross Primary Production*, (*GPP*) en anglais (Figure 1.4). Les tourbières sont des écosystèmes dont ³⁰⁰ la production primaire est estimée à environ 500 gC m⁻² ([Francez, 2000](#)). Si la photo-³⁰¹ synthèse est un processus majeur d'assimilation du CO₂, il existe d'autres voies mé-³⁰²

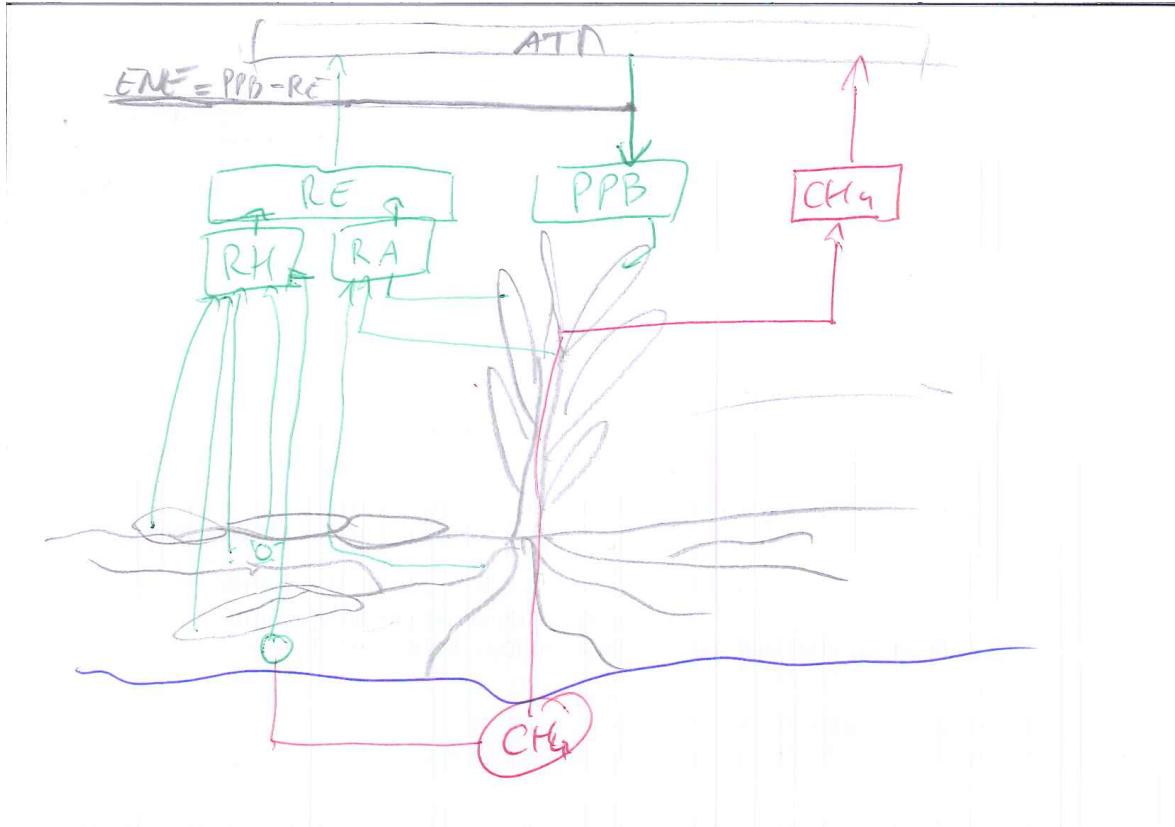


FIGURE 1.4 – schéma des flux de carbone entre une tourbière et l'atmosphère

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

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

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

316 De l'écosystème à l'atmosphère

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

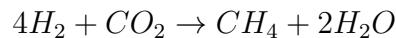
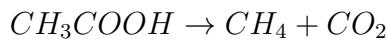
318 D'abord différents gaz peuvent être émis, notamment le CO₂ et le CH₄, éventuellement
319 du N₂O, et certains d'entre eux peuvent avoir plusieurs sources.

320 Le CO₂ est émis dans l'atmosphère à travers différents processus, la respiration
321 aérobie (le plus gros contributeur), les respirations anaérobies ou fermentations (e.g.
322 du glucose, de l'acétate), ou encore l'oxydation du méthane. Les principales sources de
323 CO₂, sont représentées dans la figure 1.4. La ou plutôt les respirations sont généralement
324 séparées en deux. D'un côté la respiration végétale, que ce soit celle de feuilles, des tiges,
325 des racines et que l'on appelle la **respiration autotrophe**. De l'autre rassemblé sous le
326 vocable de **respiration hétérotrophe**, la respiration de la rhizosphère, liée à l'émission
327 d'exsudats par les racines, la décomposition des litières et des matières organiques, la
328 respiration de la faune et l'oxydation du CH₄ par les organismes méthanotrophes. On
329 appelle **Respiration de l'Écosystème** (RE) l'ensemble des respirations autotrophe
330 et hétérotrophe, en incluant à la fois ses composantes aérienne et souterraine. On la
331 distingue de la respiration du sol qui est définie comme l'ensemble des respirations de
332 la colonne de sol, en excluant la partie aérienne. La production de CO₂ est donc un
333 signal intégré sur l'ensemble de la colonne de tourbe. C'est cette multitude de processus
334 qui rend l'estimation de ce flux difficile, en effet chacune des respirations n'aura pas la
335 même sensibilité vis à vis de facteurs contrôlant.

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

342 Conséquence du niveau de nappe élevé des tourbières, le développement d'une zone
343 anoxique importante dans la colonne de sol favorise la production de CH₄. En moyenne
344 des flux de CH₄ mesurés dans les tourbières s'étendent de 0 à plus 0,96 µmol m⁻² s⁻¹,

345 avec généralement des flux compris entre 0,0048 et 0,077 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Blodau, 2002).
 346 Le CH₄ est principalement produit à partir d'acétate (CH₃COOH) ou de dihydrogène
 347 (H₂), ces deux composés étant dérivés de la décomposition préalable de matières orga-
 348 niques (Lai, 2009).



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



354 Le méthane (Lai2009, seger1998, barlett1993 review)

355 1.2.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux

356 Les facteurs qui contrôlent ces flux de carbone sont globalement connus : la tempé-
 357 rature, le niveau de la nappe et la végétation. L'augmentation de la vitesse de réaction
 358 de nombreuses réactions biochimiques avec la température est connue depuis long-
 359 temps. Elle a été mise en évidence par un chimiste suédois en 1889 : Svante August
 360 Arrhenius sur la base de travaux réalisés par un autre chimiste, néerlandais, Jaco-
 361 bus Henricus Van't Hoff. Depuis, de nombreuses mesures de terrain confirment cette
 362 relation (**Réf needed**). La photosynthèse et l'ensemble des respirations sont donc
 363 contrôlées, au moins en partie, par la température. L'hydrologie est un autre facteur
 364 contrôlant majeur. Le niveau de la nappe, défini ici comme la distance entre la sur-
 365 face du sol de l'écosystème et le toit de l'aquifère/l'eau libre/la zone saturée, sépare la
 366 colonne de tourbe en une zone oxique, et une zone anoxique. L'épaisseur relative de

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

ces deux zones va influer sur la production du CO₂, majoritairement produit dans la zone oxique, et du CH₄ produit dans la zone anoxique. Le niveau de la nappe contraint également le teneur en eau du sol et la hauteur de la frange capillaire qui va influer sur la végétation ([Laiho, 2006](#)). La végétation est également un facteur important. D'abord car elle exerce une influence directe sur les flux, avec d'un côté la photosynthèse et les respirations des plantes vivantes, ou la décomposition des plantes mortes. La composition des communautés végétales va également influer sur le potentiel photosynthétique de l'écosystème, ce potentiel pouvant varier selon le végétal considéré [Moore et al. \(2002\)](#), et sur la vitesse de décomposition des litières qui peut également varier en fonction du végétal. De façon plus indirecte, la végétation peut également stimuler la respiration des micro-organismes présent dans la rhizosphère⁵ via la libération d'exsudats racinaires [Moore et al. \(2002\)](#). Enfin certaines plantes vasculaires, adaptées aux conditions de saturations en eau, peuvent faciliter l'échange de gaz entre l'atmosphère et l'écosystème grâce à un espace intercellulaire agrandi, l'Aerenchyme.

Cependant la sensibilité des flux à ces facteurs ne fait pas consensus et peut varier selon les conditions environnementales ou l'échelle de temps ou d'espace considérée. Par la suite nous considérons les processus à l'échelle d'une colonne de sol ou d'un écosystème

Facteurs contrôlant la production primaire brute

Le premier facteur contrôlant la PPB est bien sur la végétation et notamment la composition végétale des communautés présentes. Les bryophytes n'ont pas la même productivité primaire que les graminées ou que les arbustes. En plus de ces différences entre groupes de végétaux, il existe également des différences de productivité pour un même groupe selon le type de tourbière ([Moore et al., 2002](#) dans [Rydin et Jeglum, 2013b](#)) . Alors que dans les tourbières de haut-marais, les sphagnes et les arbustes ont une productivité importante, les herbacées et graminées ont une productivité beaucoup plus faible. À l'inverse ce sont les herbes et les graminées qui ont la plus forte producti-

5. zone du sol impacté par les racines

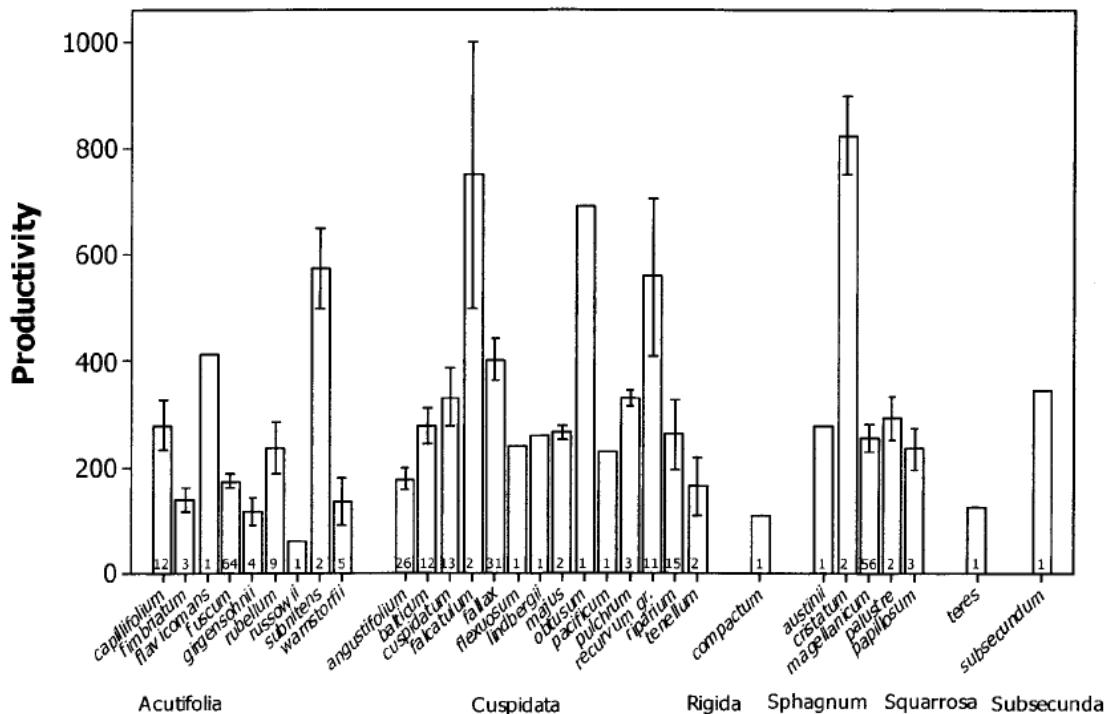


FIGURE 1.5 – Productivités moyennes des espèces de sphaignes en $\text{g m}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard ([Gunnarsson, 2005](#))

394 vité dans les tourbières de bas-marais pauvres. Elles sont suivie par les sphaignes puis
 395 les arbustes. Au sein même de ces groupes la productivité peut varier de façon impor-
 396 tante, c'est ce que montrent [Gunnarsson \(2005\)](#) avec les sphaignes, dont la productivité,
 397 selon l'espèce et les conditions dans lesquelles elle vit, varie fortement (Figure 1.5).

398 L'effet d'une variation du niveau de la nappe et de la température, jouant sur
 399 la végétation va également jouer sur la PPB. Distinguer ces deux facteurs n'est pas
 400 anodin, la majorité des études réalisées sur le terrain montre les effets des deux fac-
 401 teurs combinés. Ainsi [Cai et al. \(2010\)](#) ont montrés que des conditions plus chaudes
 402 et sèches pouvaient augmenter la PPB. L'effet du niveau de la nappe peut varier se-
 403 lon le contexte : Dans une étude des effets à long terme de variation du niveau de la
 404 nappe, [Ballantyne et al. \(2014\)](#) montrent qu'une baisse du niveau de la nappe entraîne
 405 une augmentation de la PPB en facilitant l'accès des plantes vasculaire à l'oxygène
 406 et aux nutriments. Paradoxalement, la hausse d'un niveau de nappe, initialement bas
 407 et entraînant un stress hydrique important, conduira également à une augmentation
 408 de la PPB ([Strack et Zuback, 2013](#)). Ces effets sont variables selon les communautés

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

végétales et le contexte dans lequel elles se trouvent. Pour un gradient de niveau de nappe qui augmente dans une tourbière de haut-marais, Weltzin *et al.* (2000) montent une diminution de la productivité des arbustes, tandis que celle des graminées n'est pas affectée. À l'inverse, pour un gradient similaire dans une tourbière de bas-marais, la productivité des arbustes n'est pas affectés tandis que celle des graminées augmente. Un opposition similaire est également relevé concernant les graminées soumises à un traitement infra-rouge afin de les réchauffer. Ces dernières voient leur productivité diminuer dans la tourbière de haut-marais et augmenter dans la tourbière de bas-marais. Munir *et al.* (2015) isolent également l'effet de la température en utilisant des OTC (*Open Top Chamber*). Ces dispositifs, ressemblant à des serres ouvertes, permettent de réchauffer une zone de la tourbière. Ils montrent que dans les zones sans manipulation du niveau de la nappe, le réchauffement des OTC, augmente la PPB.

421 Facteurs contrôlant la respiration de l'écosystème

422 Un facteur majeur contrôlant la RE est la température. Dans des conditions plus
423 sèches et plus chaude Cai *et al.* (2010) qui montrait une augmentation de la PPB,
424 montre une augmentation plus importante encore de la RE. Updegraff *et al.* (2001)
425 montrent, dans une expérimentation à base de mésocosme, que la respiration de l'éco-
426 système est contrôlée presque exclusivement par la température du sol. La modélisation
427 de ce flux se fait donc généralement en utilisant la température que se soit celle de l'air
428 (Bortoluzzi *et al.*, 2006) ou celle du sol à différentes profondeurs (Görres *et al.*, 2014;
429 Zhu *et al.*, 2015).

430 Le niveau de nappe, conditionnant l'accès à l'oxygène, joue également un rôle im-
431 portant. Un niveau qui diminue se traduit généralement pas une hausse de la RE que
432 ce soit à long terme (Strack *et al.*, 2006; Ballantyne *et al.*, 2014) ou à plus court terme
433 (Réf needed).

434 Facteurs contrôlant l'ENE

435 On défini l'Échange Net de l'Écosystème (ENE) comme la différence entre la Pho-
436 tosynthèse Primaire Brute (PPB) et la Respiration de l'écosystème (RE). Les facteurs
437 contrôlants l'ENE sont donc les mêmes que ceux qui contrôlent ces 2 flux. Cependant
438 l'effet d'un même facteur de contrôle peut être différent vis à vis de PPB et de RE
439 selon le contexte environnemental, que ce soit par rapport à la nature de l'effet ou son
440 importance. Ainsi une variation de l'ENE peut parfois est contrôlé majoritairement
441 soit par la PPB soit par la RE soit par les deux. Par exemple, une baisse du niveau de
442 la nappe est souvent liée dans la littérature à une baisse de l'ENE. Cependant certains
443 attribuent cette baisse à une augmentation de la Respiration ([Alm et al., 1999; Ise et al., 2008](#)) ([aurela2013, oechel1993](#)) quand d'autres l'attribuent à une diminution de
444 la photosynthèse ([Sonnenstag et al., 2010; Peichl et al., 2014](#)). Enfin certain voient un ef-
445 fet à la fois de l'augmentation de la respiration et de la diminution de la photosynthèse
446 ([Strack et Zuback, 2013](#)).

448 À noter un article particulièrement intéressant ([Lund et al., 2012](#)) dans lequel,
449 dans un même site une baisse du niveau de la nappe 2 année différente entraînera une
450 baisse de l'ENE dans les 2 cas, mais dans l'un des cas cette baisse est contrôlée par
451 un augmentation de la respiration et dans l'autre cas cette baisse est contrôlée par une
452 diminution de la photosynthèse.

453 Également un article de [Ballantyne et al. \(2014\)](#) qui lui ne note pas d'effet d'une
454 baisse du niveau de la nappe sur l'ENE car l'augmentation de la respiration est com-
455 pensée par une augmentation de la photosynthèse.

456 Facteurs contrôlant les flux de méthane

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

459 La prépondérance relative des ces différents flux, contrôlée par les conditions envi-
460 ronnementale, va donc impacter le fonctionnement des tourbières. Soit elles stockent
461 du carbone, en accumulant des matières organiques, et donc fonctionnent comme des

462 puits ou soit elle relâchent du carbone et fonctionnent comme des sources.

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

467 1.2.4 Bilans de carbone

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

480 passé

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

483 tableau LORCA ajouter colonne contexte (exple : 7 tourbières ombro-
484 tropiques)

485 présent

486 Dans cette approche on estime les flux actuels de carbone entrant et sortant de
487 l'écosystème afin de déterminer un bilan. Un certain nombre de flux de carbone sont

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

⁴⁸⁸ présent au sein des écosystèmes terrestre (équation (1.1))

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

⁴⁸⁹ — ENE : Échange Net de l’Écosystème

⁴⁹⁰ — PPB : Production Primaire Brute

⁴⁹¹ — Re : Respiration de l’Écosystème

⁴⁹² — F_{COP} : Flux de Carbone Organique Dissous

⁴⁹³ — F_{COP} : Flux de Carbone Organique Particulaire

⁴⁹⁴ — F_{CH₄} : Flux de Méthane

⁴⁹⁵ — F_{CID} : Flux de Carbone Inorganique Dissous

⁴⁹⁶ — F_{COV} : Flux de Composés Organique Volatils

⁴⁹⁷ — F_{CO} : Flux de Monoxyde de Carbone

⁴⁹⁸ Les bilans les plus complets réalisées sur les tourbières comprennent la partie gazeuse, dissoute...

⁵⁰⁰ Dans les tourbières, les flux de CO₂ sont généralement les plus importants (**Réf needed**), puis les flux de CH₄ et/ou de COD et enfin les flux de COP.

⁵⁰² Pour estimer ces flux différentes techniques existent, notamment l’eddy covariance
⁵⁰³ et les méthodes de chambre pour les flux de gaz.

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

504 D'autres méthodes, moins souvent utilisées, existent comme l'utilisation du ratio
505 C :N (Kirk2015)

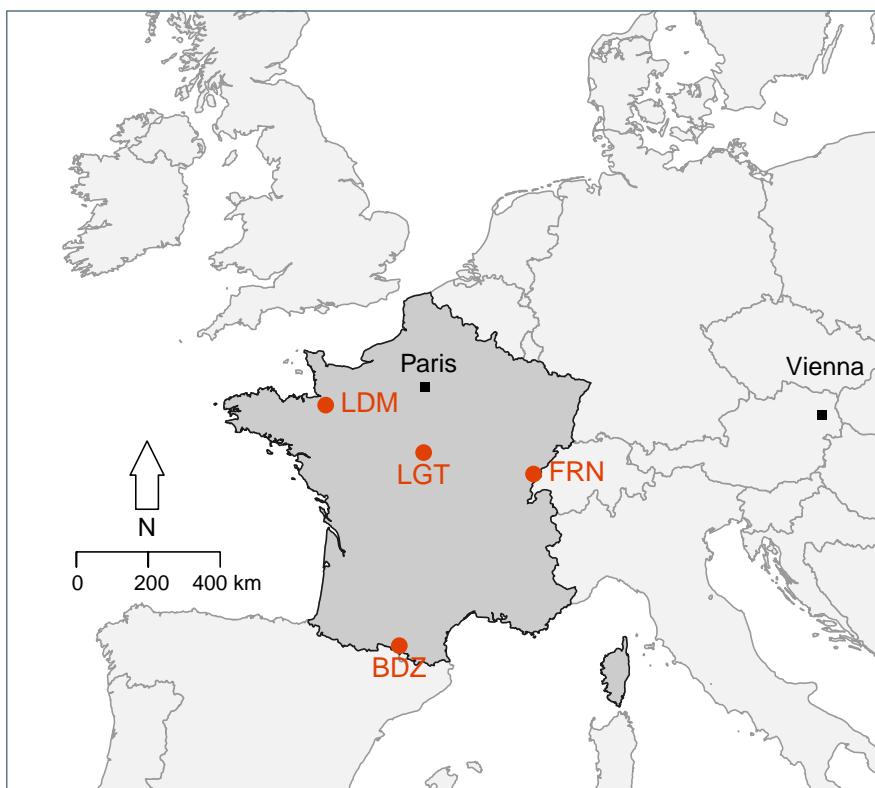
506 2 Sites d'études et méthodologies employées

507

508	2.1 Présentation de la tourbière de La Guette	30
509	2.2 Autres sites du service national d'observation	35
510	2.3 Mesures de flux	36
511	2.3.1 Présentation des méthodologies possibles	36
512	2.3.2 Les mesures de CO ₂	37
513	2.3.3 Les mesures de CH ₄	39
514	2.3.4 Le calcul des flux	40
515	2.4 Facteurs contrôlants	41
516	2.4.1 acquisitions automatisées	41
517		
518		
519		

520 2.1 Présentation de la tourbière de La Guette

521 Le site d'étude, la tourbière de La Guette, est l'un des quatre sites du service
522 national d'observation des tourbières (SNOT) qui vise à étudier la fonction puits de
523 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

524 La tourbière de La Guette est située à Neuvy-sur-Barangeon, en Sologne, ($N\ 47^{\circ}19'44''$,
525 E $2^{\circ}17'04''$) dans le département du Cher (Figure 2.1). Le site s'étend sur une surface
526 d'une vingtaine d'hectare avec une géométrie relativement allongée 2.2. Cette surface
527 la classe parmi les plus grandes de Sologne. L'épaisseur moyenne de la tourbe est de
528 80 cm avec des maximums locaux atteignant 180 cm. La tourbière de La Guette est pro-
529 bablement topogène (**Réf needed**), formée par l'accumulation d'eau de pluie dans une
530 cuvette imperméabilisée par une couche d'argile issue d'alluvions de la rivière du même
531 nom (La Guette). Les précipitations annuelles moyennes sur le site sont de 880 mm et

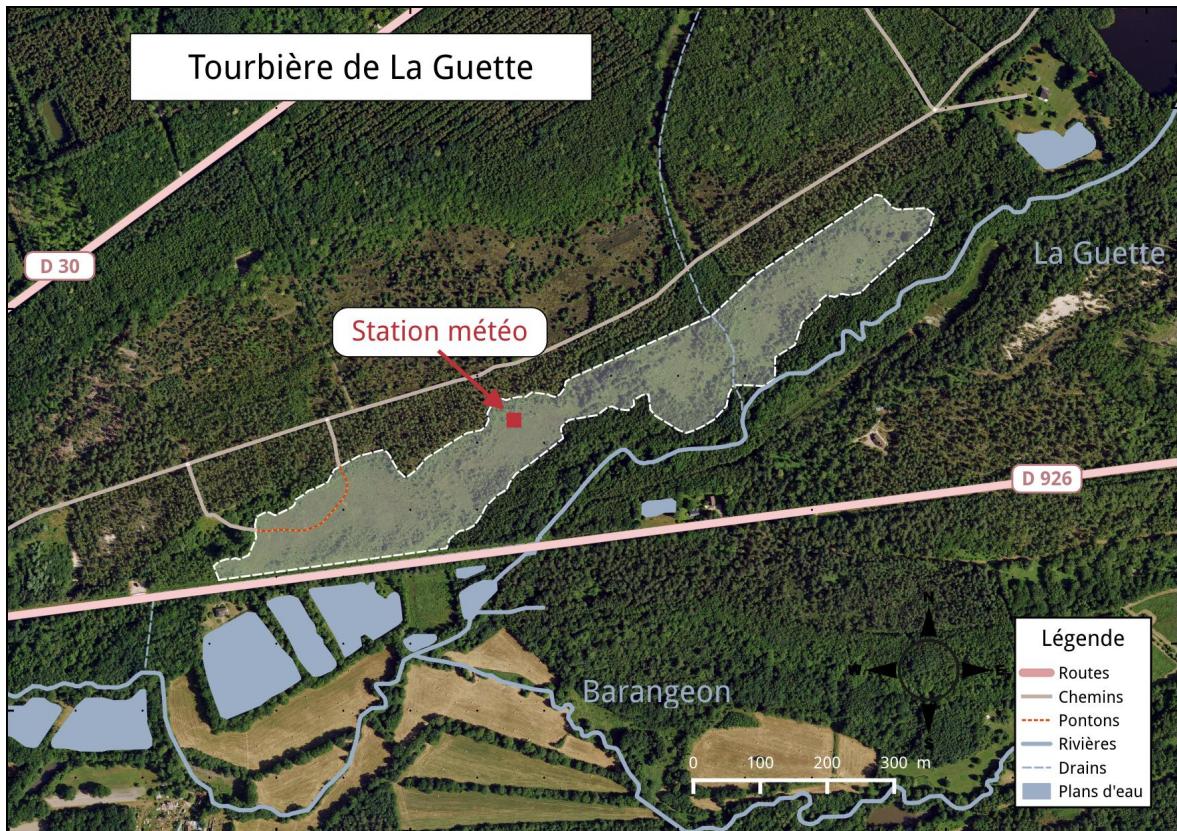


FIGURE 2.2 – Carte de la tourbière de La Guette

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

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

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

2.1. Présentation de la tourbière de La Guette

546 (2015) a pu calculé, grâce à l'étude de photos aérienne, la vitesse de fermeture du site,
547 entre 1945 et 2010, estimée à $2020 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$ avant l'incendie de 1976 et à $3469 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$
548 après. La tourbière est également envahie de façon importante par la molinie bleue
549 (*Molinia caerulea*) de la famille des *Poaceae* (Figure 2.3c). Leur présence favorisant la
550 dégradation des matières organiques (Gogo *et al.*, 2011). Sont également présentes sur
551 le site un certain nombre d'espèces caractéristiques des tourbières comme les sphaignes,
552 principalement *Sphagnum cuspidatum* et *Sphagnum rubellum*, qui forment des tapis.
553 Un tapis de sphaignes en cours de formation est visible sur la photo 2.3a. Sur cette
554 même photo sont également visible des Linaigrettes à feuilles étroites (*Eriophorum*
555 *angustifolium*), une plante de la famille des *Cyperaceae* caractéristique des marais et
556 des landes tourbeuses (Rameau *et al.*, 2008). Des bruyères sont également présentes de
557 façon importante sur le site avec notamment *Erica tetralix*, parfois appelée la Bruyère
558 des marais, de la famille des *Ericaceae* (Figure 2.3b). De la même famille est présente
559 sur le site, mais de façon moins omniprésente, la Callune (*Calluna vulgaris*). L'ensemble
560 de ces espèces tendent à préférer les milieux riches en matières organiques et pauvres
561 en nutriment (tela-botanica). D'autres espèces sont présentes sur ce site notamment,
562 *Rhynchospora alba* de la famille des *Cyperaceae*, *Juncus bulbosus*(image annexe ?),
563 de la famille de *Juncaceae*, et des Droséras, une plante insectivore, de la famille des
564 *Droseraceae* (Annexe A, Figure 1a) .

565 Au cours des dernières années, les précipitations sont relativement différentes avec
566 deux années plus sèche que la moyenne avant 2013 et deux années plus humide en 2013
567 et 2014 (Figure 2.4). On observe également cette dualité au niveau du niveau de la
568 nappe. Avant 2013 les étés sont marqués par des étiages important avec des baisses du
569 niveau de nappe allant jusqu'à -60 cm en 2012 (Figure 2.5). Après 2013, les étiages
570 sont beaucoup moins importants sur le site (Figure 2.6). Les variations inter-annuelles
571 de la température moyenne de l'air semblent moins marquées. L'année 2011 est très
572 proche de 2014 avec une température moyenne supérieure à 11 °C. De la même façon
573 les années 2012 et 2013 sont très proche avec des température moyenne inférieure à
574 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

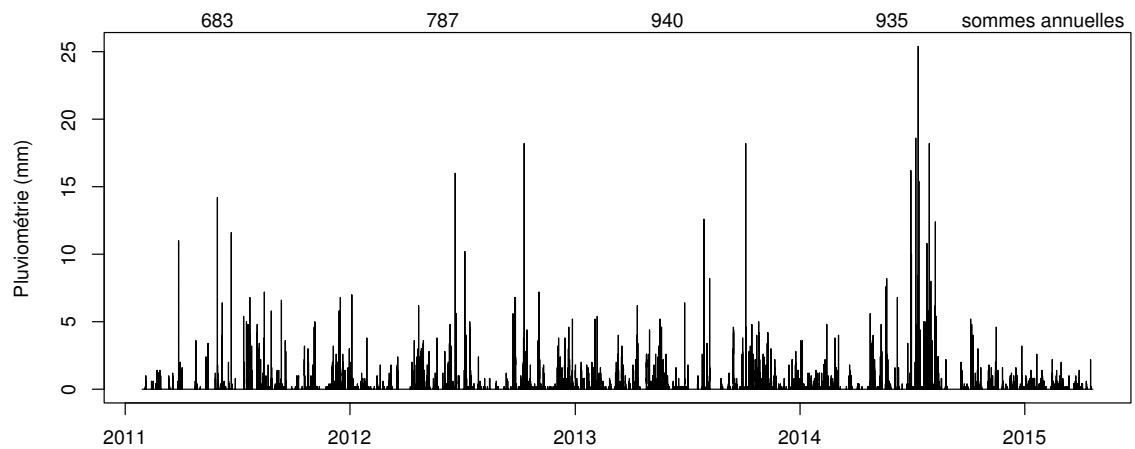


FIGURE 2.4 – Évolution du niveau de la pluviométrie, en mm, des années 2011 à 2014

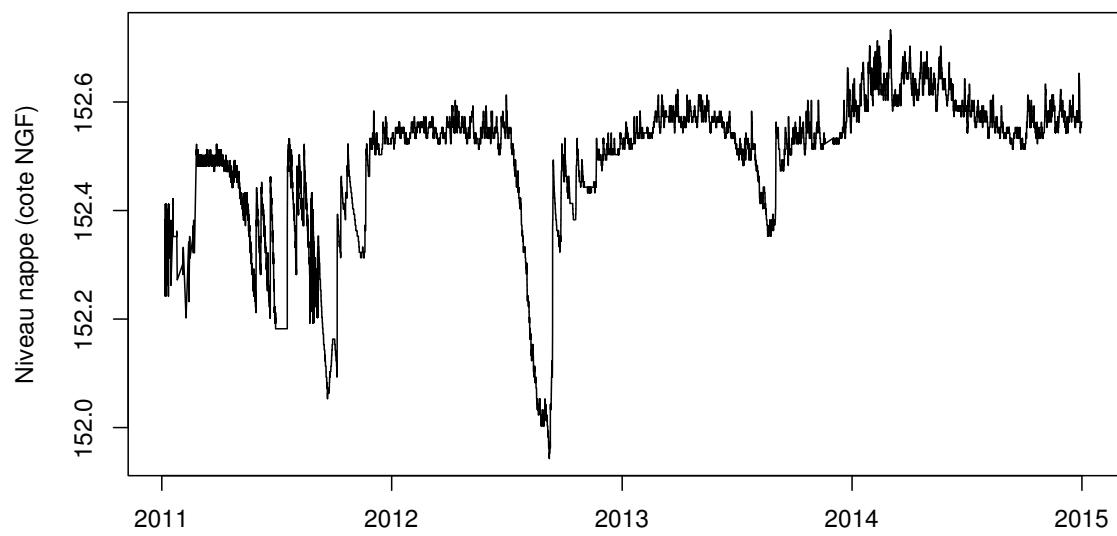


FIGURE 2.5 – Évolution du niveau de la nappe, en cm par rapport à la surface, des années 2011 à 2014

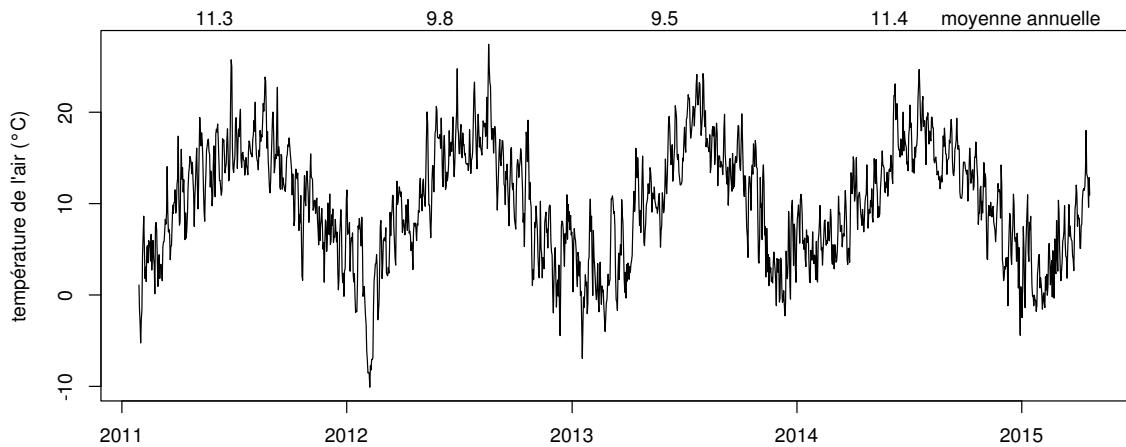


FIGURE 2.6 – Évolution de la température de l'air (en °C) des années 2011 à 2014

575 2.2 Autres sites du service national d'obser- 576 vation

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

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

⁵⁸⁹ 2.3 Mesures de flux

⁵⁹⁰ 2.3.1 Présentation des méthodologies possibles

⁵⁹¹ De nombreuses techniques permettent de mesurer des flux de gaz, avec en premier
⁵⁹² lieu les méthodes de chambres.

⁵⁹³ Les chambres peuvent être ouvertes, c'est à dire que la mesure se fait lorsque le
⁵⁹⁴ gaz à l'intérieur de la chambre à l'équilibre avec celui à l'extérieur, ou fermées, dans
⁵⁹⁵ ce cas le gaz à l'intérieur de la chambre n'est pas à l'équilibre avec celui à l'extérieur.
⁵⁹⁶ Elles peuvent également être dynamique, lorsqu'un système de pompe, permettant
⁵⁹⁷ notamment de transporter le gaz jusqu'à l'analyseur, est présent. Ou statique si le
⁵⁹⁸ système est sans flux artificiel.

⁵⁹⁹ Trois grandes techniques de chambre existent. D'abord les chambres **dynamiques**
⁶⁰⁰ **ouvertes** qui se basent sur un état d'équilibre et mesurent une différence de concen-
⁶⁰¹ tration d'un gaz dont une partie passe par la chambre et l'autre non. Cette méthode
⁶⁰² 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
⁶⁰³ chambre à l'aide d'un système de pompe permettant l'envoi du gaz dans un analyseur
⁶⁰⁴ externe. Enfin les chambres **statiques fermées** qui mesurent également l'évolution de
⁶⁰⁵ la concentration du gaz au sein de la chambre sans qu'un système de pompe ne soit
⁶⁰⁶ présent. Dans ce cas soit l'analyseur est présent dans la chambre, soit des prélèvements
⁶⁰⁷ sont fait à intervalles réguliers puis analysés par la suite en chromatographie gazeuse.

⁶⁰⁹ Il faut noter que les dénominations anglaises de ces méthodes doit faire l'objet d'une
⁶¹⁰ attention particulière. *Closed chamber* par exemple est parfois utilisé pour se référer
⁶¹¹ à l'état ou non d'équilibre, comme défini dans ce document, mais parfois également
⁶¹² pour désigner les méthodes de chambre sans système de flux ce qui peut prêter à
⁶¹³ confusion [Pumpenan et al. \(2004\)](#). Souvent utilisées les dénominations *open/closed* et
⁶¹⁴ *dynamic/static* sont décrites dans [Luo et Zhou \(2006\)](#), une autre convention peut être
⁶¹⁵ rencontrée : *flow-through/non-flow-through* et *steady state/non-steady state* [Livingston](#)

616 et Hutchinson (1995)

617 Ces différentes méthodes ont divers avantages et inconvénients.

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

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

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

623 2.3.2 Les mesures de CO₂

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

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

635 Pour les raisons détaillée précédemment, la méthode mise en œuvre est celle de
636 la chambre statique fermée, aucun système de pompe n'est donc utilisé. la chambre
637 est posée sur l'embase, elle contient l'analyseur de CO₂ qui mesure la variation de
638 la concentration en gaz au cours du temps. Un ventilateur de faible puissance est
639 également présent à l'intérieur de la chambre afin d'homogénéiser l'air. 1 à 3 min de
640 stabilisation sont nécessaires après la pose de la chambre afin d'éviter les effets pouvant
641 y être liés. Ensuite l'enregistrement est lancé, avec l'acquisition toutes les 5 s pendant
642 5 min de la concentration en CO₂, de la température et de l'humidité. La mesure se
643 déroule donc sur une période de temps relativement courte afin de minimiser le dés-

2.3. Mesures de flux

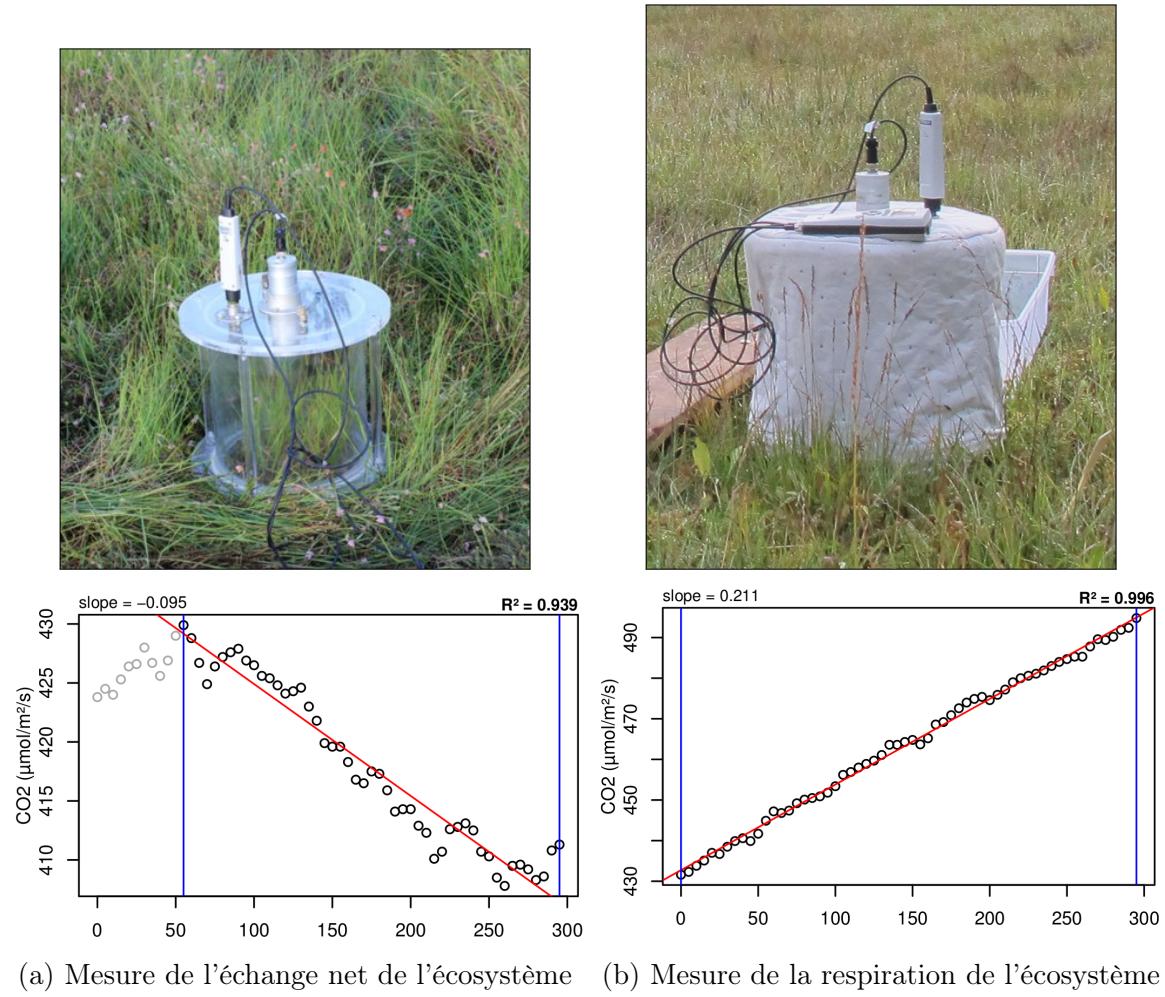


FIGURE 2.7 – Mesures de CO₂

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

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

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

667 2.3.3 Les mesures de CH₄

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

2.3. Mesures de flux

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

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

695 2.3.4 Le calcul des flux

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

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

698 Avec :

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

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

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

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

703 T : la température dans la chambre en K

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

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

706 2.4 Facteurs contrôlants

707 Afin de déterminer l'impact de facteurs contrôlants sur ces flux, mesurer les flux

708 ne suffit pas il faut également mesurer les variables environnementales dont on pense

709 qu'elles seront des facteurs contrôlants important. La description des techniques et

710 matériels communs aux différentes expérimentations utilisées est développée ci-dessous.

711 Par contre leur mise en œuvre ou caractéristiques spécifiques, comme la fréquence des

712 mesures, sera décrite individuellement au niveau des parties détaillant chacune des

713 expérimentations.

714 2.4.1 acquisitions automatisées

715 Les paramètres météorologiques ont été mesurés, en un point, au centre de la tour-

716 bière (Figure 2.2)(carte ?) à l'aide d'une station d'acquisition Campbell installée sur le

717 site en 2008. Les variables ont été acquises à une fréquence horaire jusqu'au 20 février

718 2014 puis toutes les demi-heures par la suite. Les paramètres enregistrés sont la pres-

719 sion atmosphérique, l'humidité relative de l'air, la pluviométrie, l'irradiation solaire,

720 la vitesse et la direction du vent. (détail du matos ?). Cette même station à égale-

2.4. Facteurs contrôlants

721 ment permis l'acquisition de la température de l'air et de la tourbe à -5, -10, -20 et
722 -40 cm. Installées à la même époque, quatre sondes **OTT?** de mesure du niveau de
723 la nappe d'eau permettent le suivi du niveau de la nappe dans la tourbière.

724 3 Bilan de C de la tourbière de La Guette

725	
726	3.1 Introduction 44
727	
728	3.2 Procédure expérimentale et analytique 44
729	3.2.1 Méthodes de mesure 44
730	3.2.2 Modélisation du bilan de C 46
731	3.3 Résultats 50
732	3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la tour-
733	bière de La Guette 50
734	3.3.2 Sélection des modèles 56
735	3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle
736	de l'écosystème 63
737	3.3.4 Variabilité spatiale du bilan 70
738	3.4 Discussion 72
739	3.4.1 Estimations des flux 72
740	3.4.2 Estimations des bilans 75
741	3.4.3 Sensibilité et limitations du bilan 75
742	3.4.4 Représentativité locale du modèle 76
743	3.4.5 Variation du bilan avec la végétation 76
744	3.4.6 perspectives 77
745	
746	

747 3.1 Introduction

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

760 3.2 Procédure expérimentale et analytique

761 3.2.1 Méthodes de mesure

762 Mesures de flux de gaz

763 Les mesures des flux de CO₂ et de CH₄ ont été effectués en utilisant la méthode
764 décrite dans la partie 2.3. En juin 2011, 20 placettes ont été installées¹ selon un échan-
765 tillonnage aléatoire stratifié : La surface de la tourbière a été divisée selon une grille
766 de 20 mailles et un point choisi aléatoirement dans chaque maille localise chaque pla-
767 cette. Cette méthode permet de conserver un échantillonnage aléatoire tout en étant
768 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.

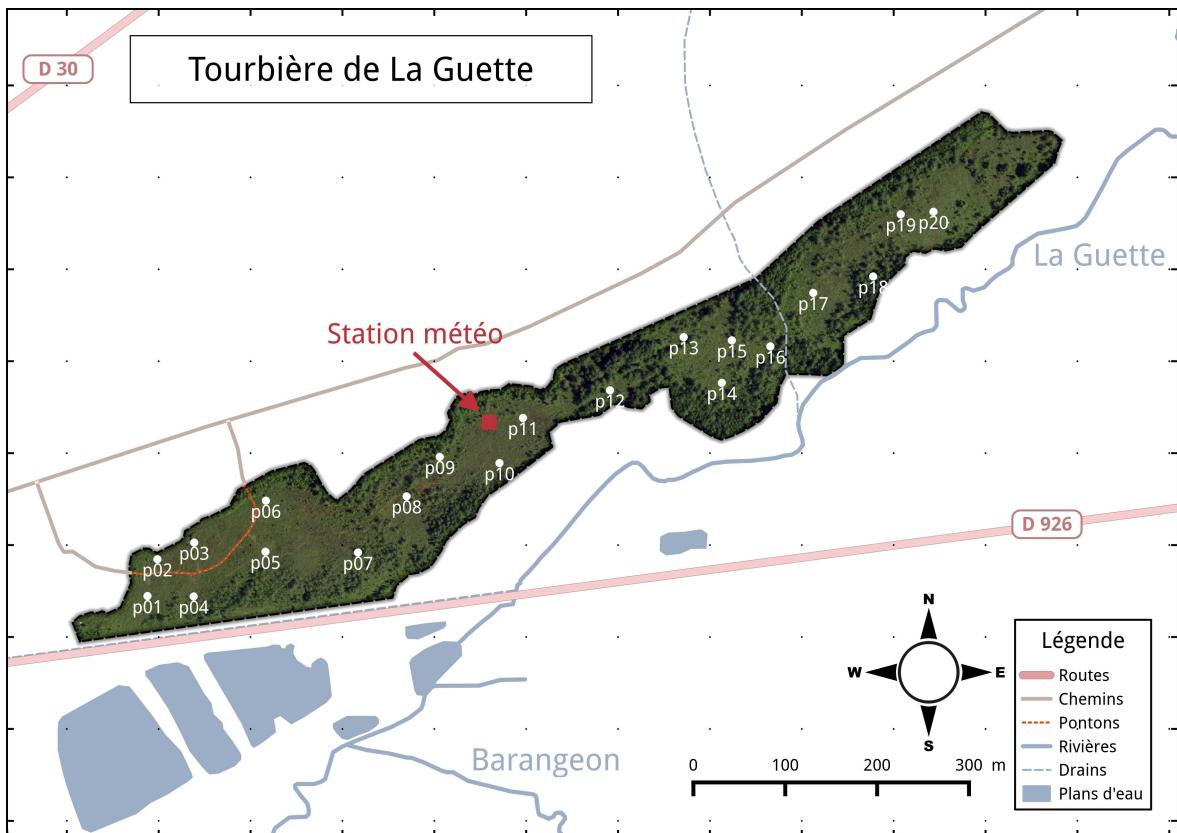


FIGURE 3.1 – Répartition des 20 placettes de mesures suivant un échantillonnage aléatoire stratifié.

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

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

3.2. Procédure expérimentale et analytique

783 (20 campagnes, pour 24 mois de mesure). Quand aux mesures de CH₄ ont été effectuées
784 avec une fréquence moindre (12 campagnes) principalement liée au difficulté de mise
785 en oeuvre de l'instrument SPIRIT (lourd, difficilement transportable dans un milieu
786 tourbeux).

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

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

799 3.2.2 Modélisation du bilan de C

800 Estimation du bilan et variabilité temporelle

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

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

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

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

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

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

2. Valeurs moyennes - Valeurs moyennes estimées

3.2. Procédure expérimentale et analytique

838 dans le contrôle du CH₄. La température, peut être utilisée ([Alm *et al.*, 1999; Bubier
839 et al., 1995](#)), le niveau de la nappe ([Bubier *et al.*, 1993](#)) ou la végétation ([Bortoluzzi
840 et al., 2006](#)).

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

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

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

857 Étude de la variabilité spatiale

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

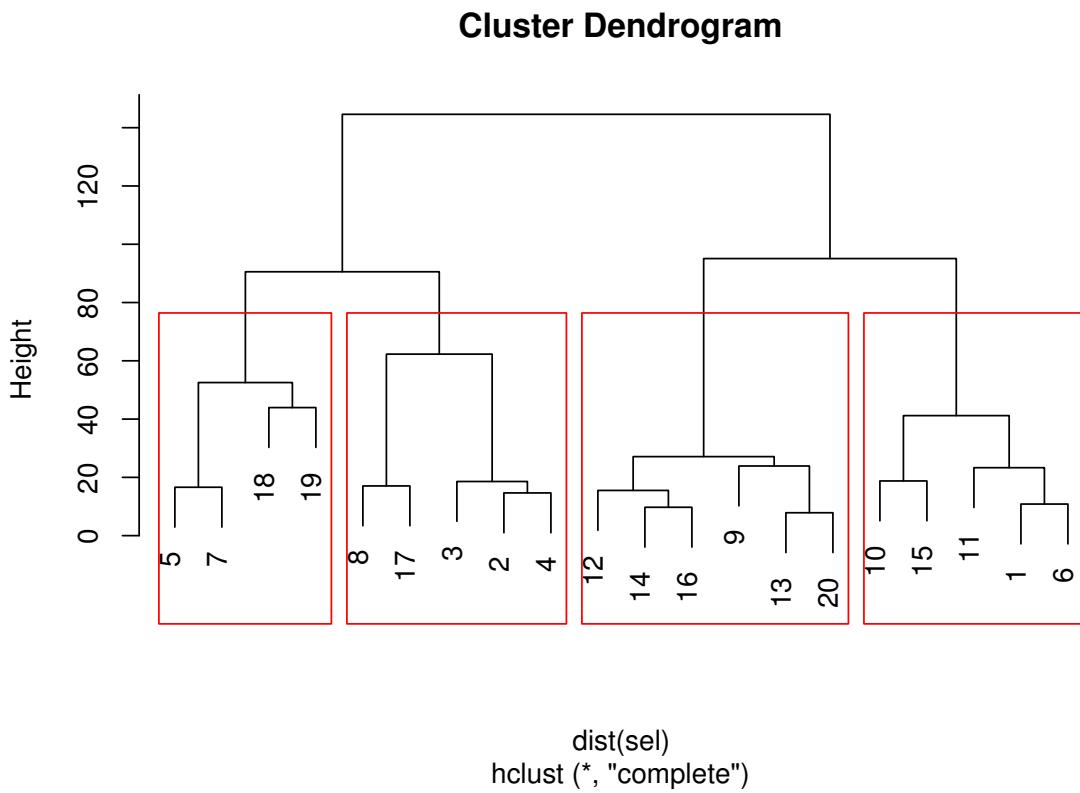


FIGURE 3.2 – Partitionnement des placettes en fonction de leur similarité en termes de composition végétale (pourcentage des strates muscinales, herbacées et arbustives)

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

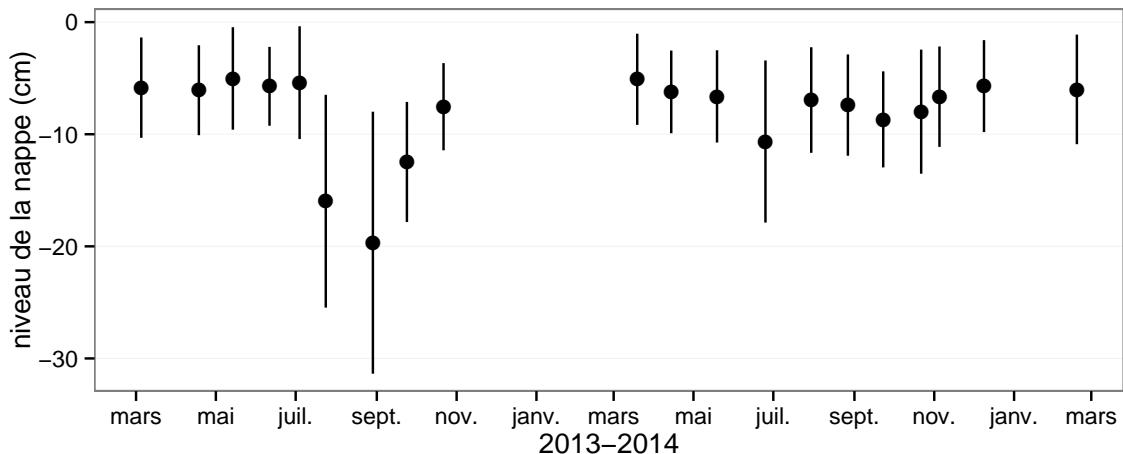


FIGURE 3.3 – Évolution du niveau de la nappe moyen des 20 embases mesuré pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

⁸⁷¹ 3.3 Résultats

⁸⁷² 3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la ⁸⁷³ tourbière de La Guette

⁸⁷⁴ Les Facteurs contrôlant

⁸⁷⁵ L'évolution du niveau de la nappe des 20 placettes, décrite dans la figure 3.3, est
⁸⁷⁶ marquée par un étiage d'une vingtaine de centimètres en moyenne en 2013 et l'absence
⁸⁷⁷ d'un étiage net en 2014 avec un niveau de la nappe moyen ne descendant que rarement
⁸⁷⁸ sous la barre des -10 cm . Ces observations sont cohérentes avec la figure 2.5 représen-
⁸⁷⁹ tant des données acquises à plus haute fréquence, et confirment la particularité de ces
⁸⁸⁰ 2 années vis-à-vis des précédentes qui présentent des étiages bien plus fort.

⁸⁸¹ La température de l'air mesurée manuellement montre une variabilité saisonnière
⁸⁸² cohérente avec celle mesurées par la station météo. La variabilité saisonnière de la
⁸⁸³ température est également visible dans le sol avec cependant un amortissement et une
⁸⁸⁴ diminution de la variabilité avec la profondeur (figure 3.4)

⁸⁸⁵ La conductivité moyenne mesurée sur le site varie entre 35 and $55 \mu\text{S m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (fi-
⁸⁸⁶ gure 3.5).

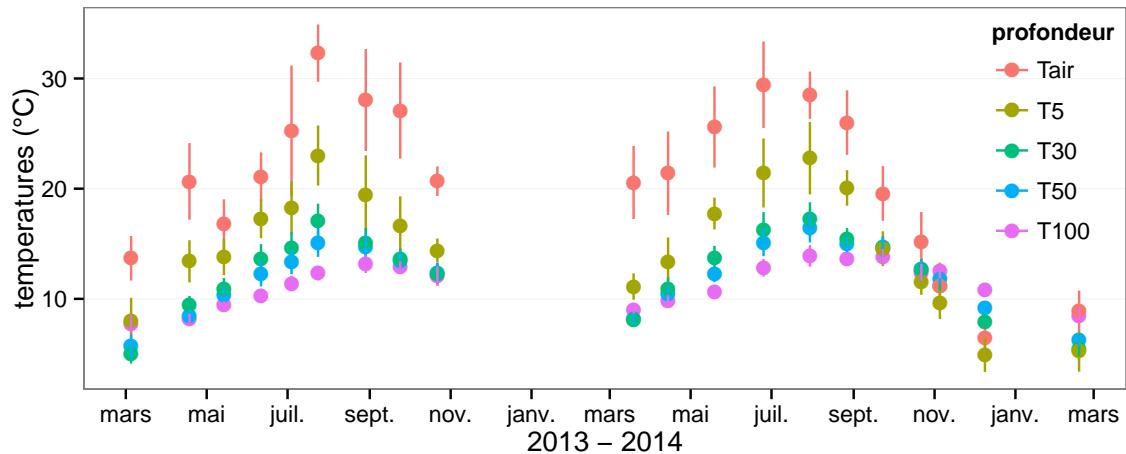


FIGURE 3.4 – Évolution des températures de l'air (Tair) et du sol à -5 , -30 , -50 et -100 cm (T5, T30, T50 et T100 respectivement) moyenne mesurée lors des campagnes de terrain de mars 2013 à février 2015

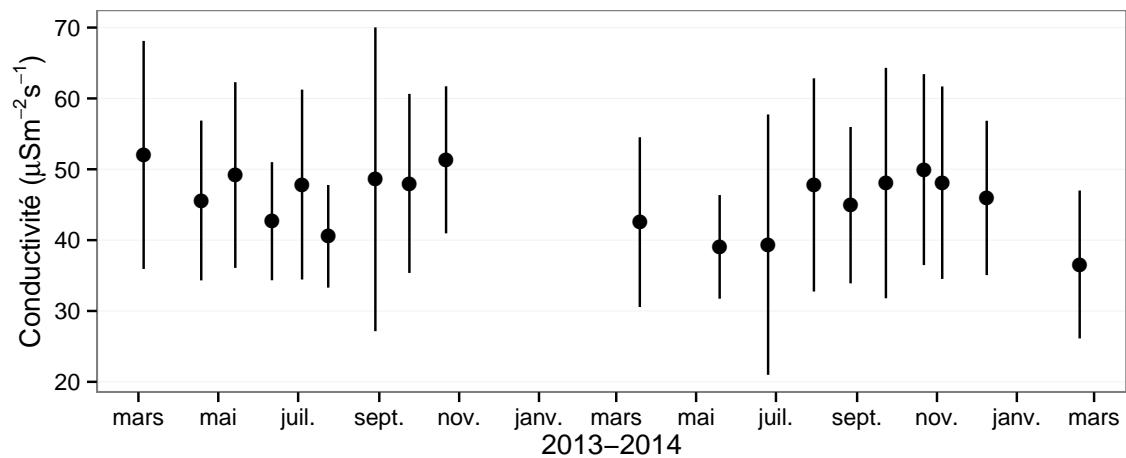


FIGURE 3.5 – Évolution de la conductivité pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

3.3. Résultats

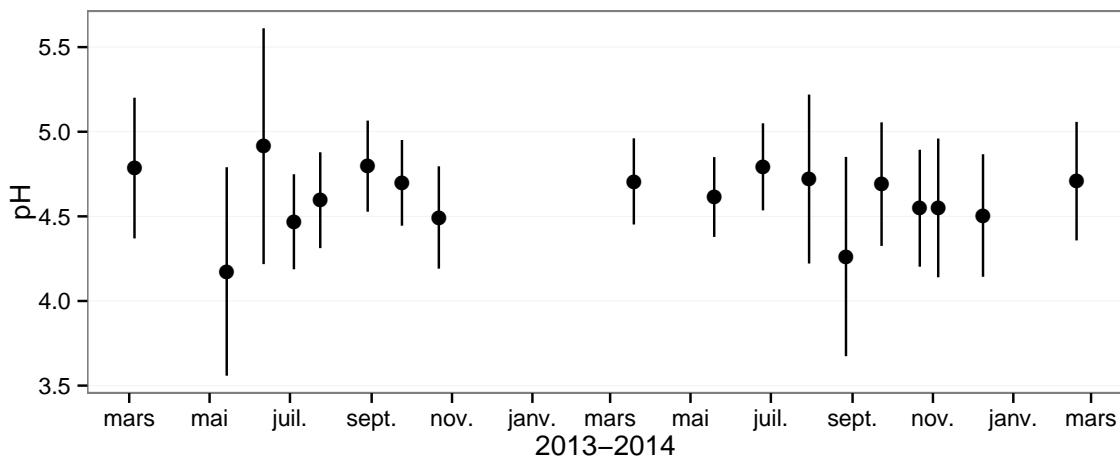


FIGURE 3.6 – Évolution du pH pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

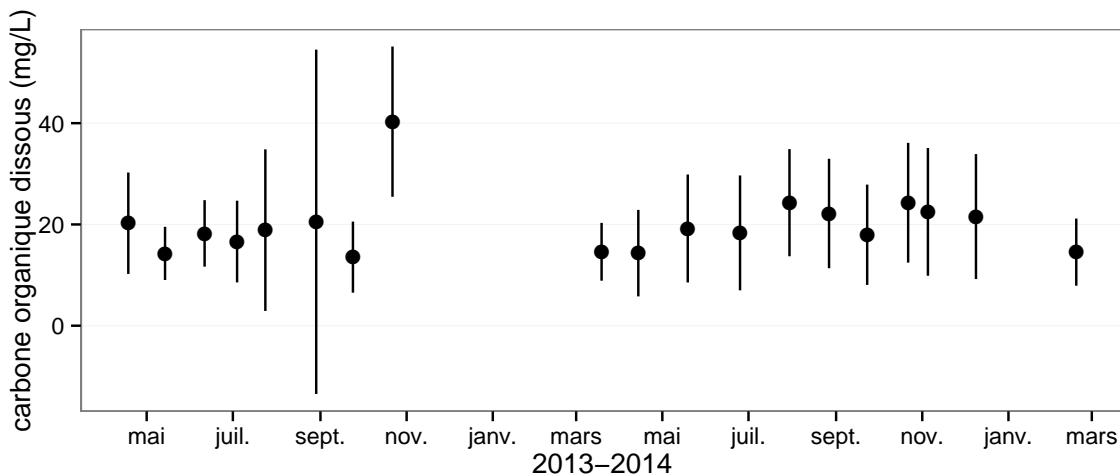


FIGURE 3.7 – Évolution de la concentration en carbone organique dissous dans l'eau du sol pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

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

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

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

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

Les flux de carbone

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

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

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

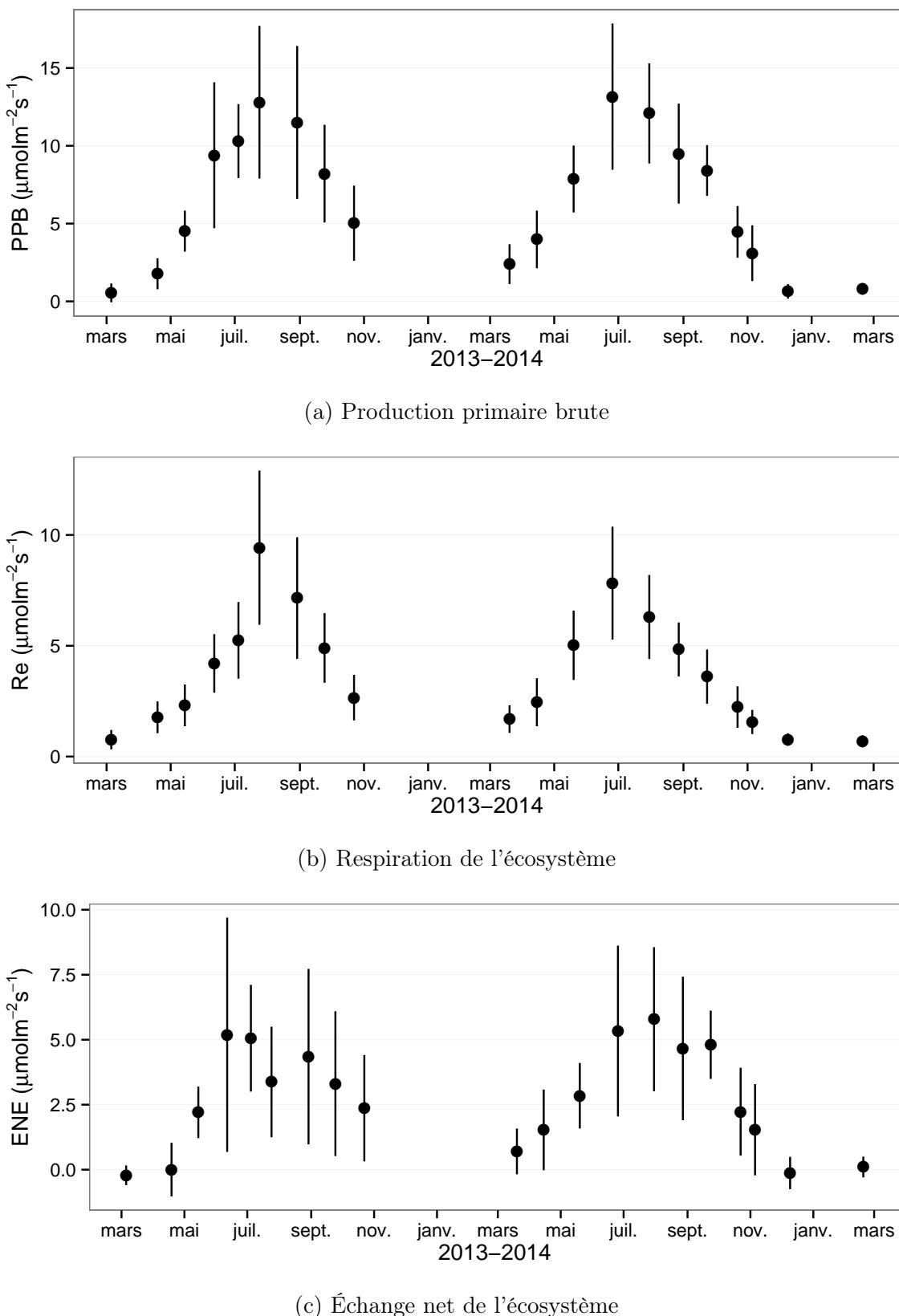


FIGURE 3.8 – Évolution du niveau de PPB, RE et ENE pendant la période de mesure. Moyenne des 20 embases de mars 2013 à février 2015.

3.3. Résultats

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

898 En 2013, les valeurs de la PPB augmentent au printemps et une partie de l'été
899 avec un maximum de $12,80 \pm 4,91 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ atteint fin juillet, avant de diminuer
900 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
901 en juin, soit plus tôt que l'année précédente. Puis pendant l'été et l'automne les va-
902 leurs décroissent jusqu'à être proche de 0. En moyenne les valeurs de la PPB sont de
903 $7,12 \pm 5,19 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en 2013 et de $6,56 \pm 4,72 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en 2014 (Figure 3.8a).

904 La RE en 2013 augmente pendant le printemps et une partie de l'été, elle atteint
905 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
906 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
907 de décroître jusqu'en hiver pour approcher des valeurs nulles. La moyenne annuelle de
908 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
909 2014 : $3,63 \pm 2,56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figure 3.8b).

910 Concernant l'ENE, en 2013 elle augmente jusque $5,19 \pm 4,51 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, son
911 maximum en juin, avant de diminuer jusqu'à la fin de l'année. Cependant, cette baisse
912 est moins homogène que celle des deux flux précédents, avec notamment une augmenta-
913 tion de l'ENE entre juillet et août 2013. Ceci étant, il faut également noter les valeurs
914 importantes de la déviation standard particulièrement en juin et en août. En 2014,
915 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
916 décroisse. Cette baisse est cependant plus homogène qu'en 2013. les moyennes de l'ENE
917 en 2013 et 2014 sont très proches et sont respectivement de $2,85 \pm 3,05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
918 et $2,93 \pm 2,77 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figure 3.8c).

919 Le CH₄ comme le CO₂ montre une variabilité saisonnière importante, cependant
920 les flux mesurés sont un ordre de grandeur en dessous de ceux mesurés pour le CO₂
921 (Figure 3.9). À l'inverse de ce dernier, l'importance des flux de CH₄ mesurés en 2013 et
922 2014 est différente. En 2013 les flux sont moins importants qu'en 2014 avec des maximum
923 de $0,078$ et $0,196 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivement.

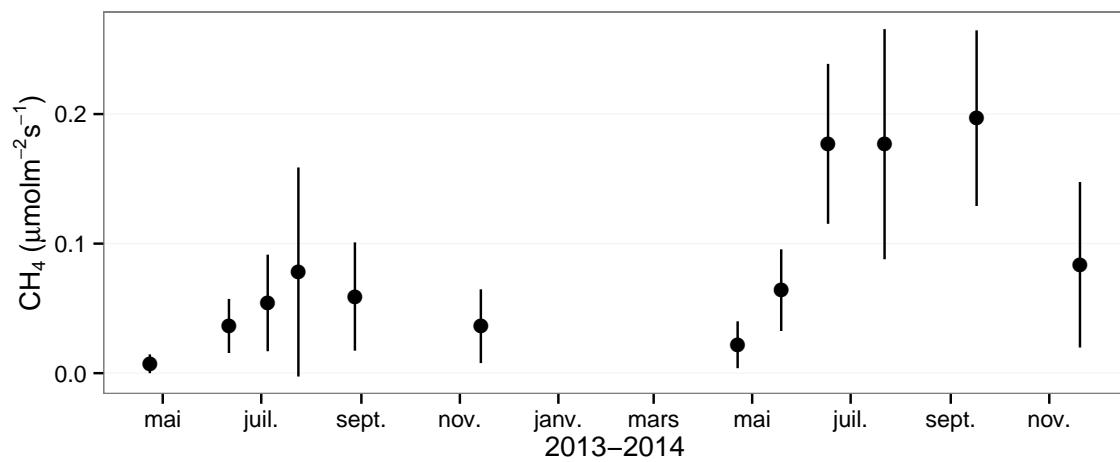


FIGURE 3.9 – Évolution des flux de méthane moyen (N ?) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

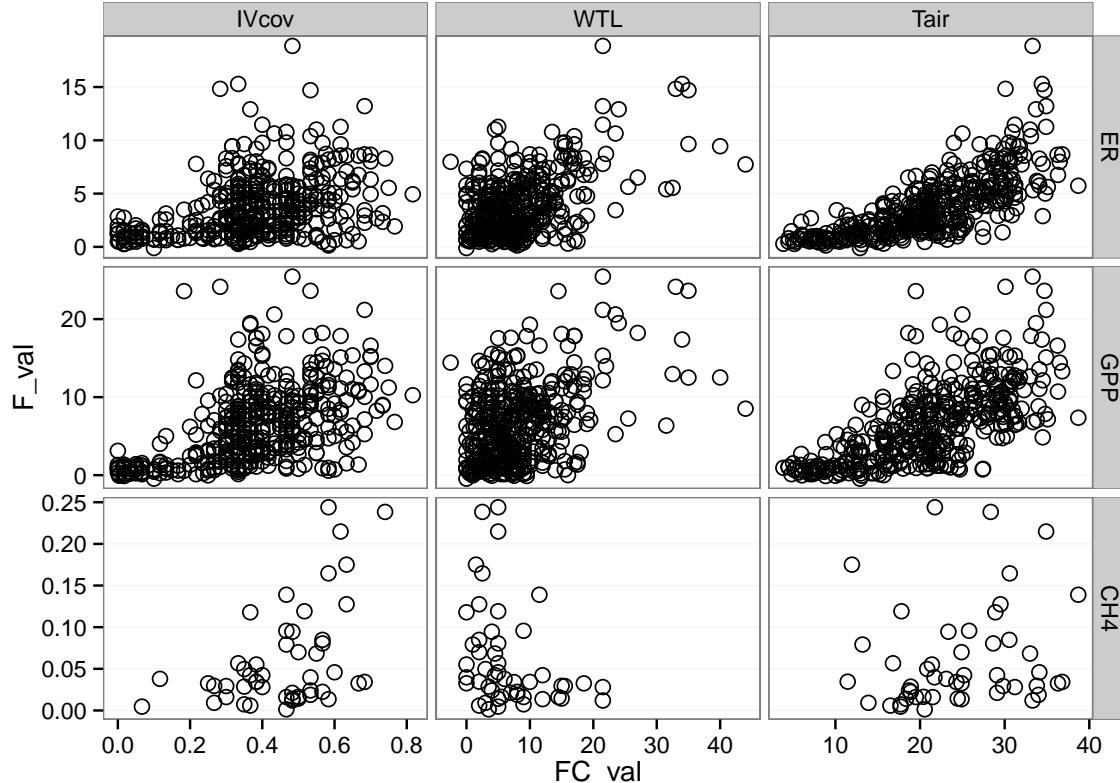


FIGURE 3.10 – Relations entre les flux de gaz et une sélection de facteurs contrôlant

3.3. Résultats

924 Les relations flux gazeux et facteurs contrôlant

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

933 3.3.2 Sélection des modèles

934 La Production Primaire Brute

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

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

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

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

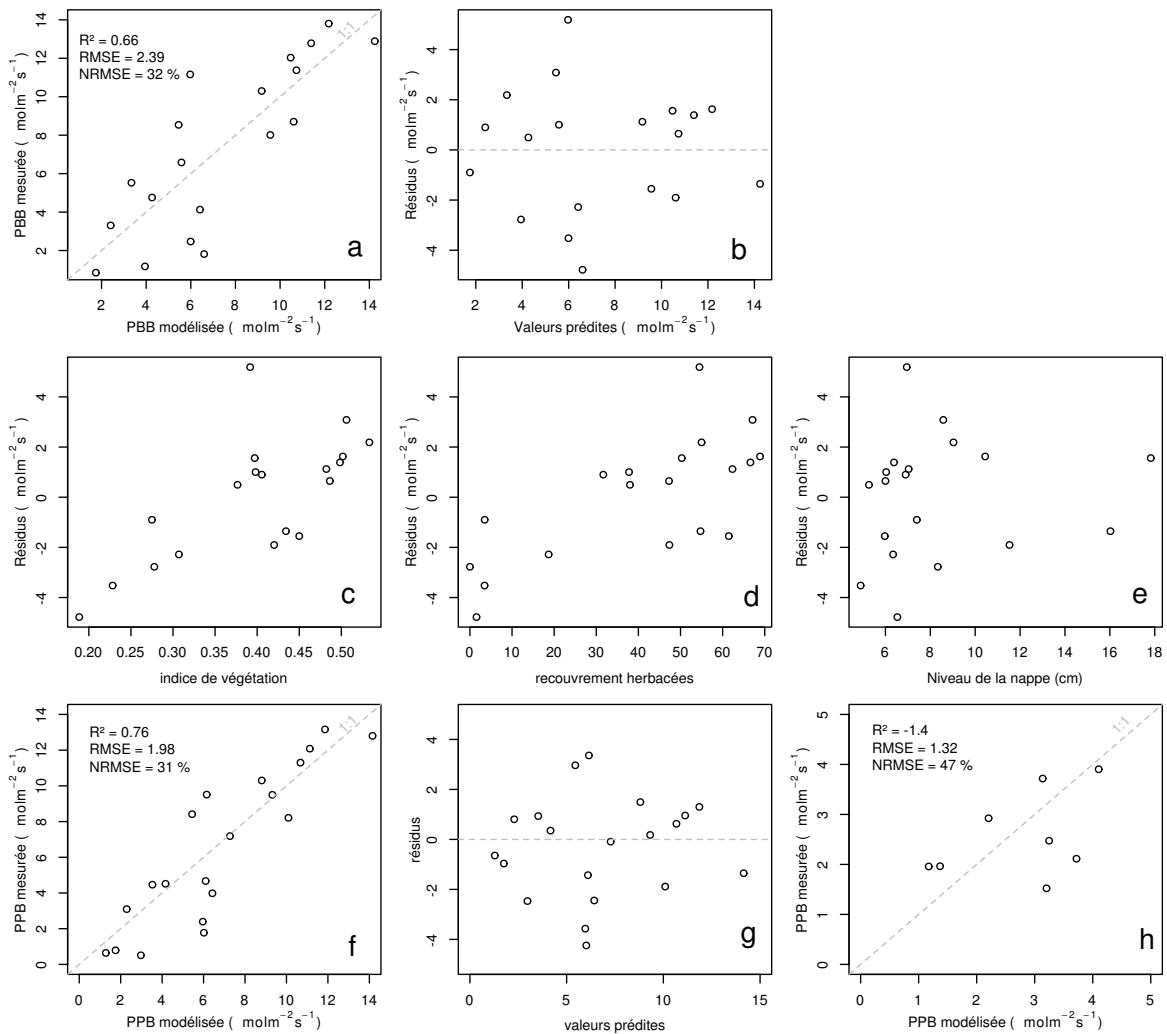


FIGURE 3.11 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.1

3.3. Résultats

946 L'utilisation de l'équation de June seule, avec la température de l'air comme variable
947 explicative de la PPBsat, permet d'expliquer 66 % des variations observées avec une
948 erreur standard de l'estimation de 32 % (Figure 3.11-a). Les résidus de ce modèle se ré-
949 partissent de façon relativement homogène et non biaisée (Figure 3.11-b). Corrélés avec
950 l'indice de végétation IV, ils présentent une tendance linéaire croissante (Figure 3.11-
951 c). On observe la même tendance avec le recouvrement de la strate herbacée avec une
952 dispersion des points plus importante (Figure 3.11-d). Par contre aucune tendance par-
953 ticulière n'est visible vis-à-vis du niveau de la nappe (Figure 3.11-e) Le recouvrement
954 des sphaignes (non présenté) ne montre également, aucune tendance avec les résidus
955 de cette équation. La PPB calculée à partir de l'équation 3.1 montre une erreur stan-
956 dard de 31 %, du même ordre de grandeur que celle de PPBsat (Figure 3.11-f) et les
957 résidus se répartissent de façon relativement homogène et non biaisée (Figure 3.11-g).
958 Cependant l'évaluation du modèle sur les données de tests montre une erreur stan-
959 dard de l'estimation plus forte qui atteint 47 % (Figure 3.11-h). Par ailleurs une forte
960 incertitude est présente concernant l'estimation des paramètres qui ont tous une erreur
961 standard importante, parfois plus importante que la valeur du paramètre, et une faible
962 significativité (Tableau 3.1). Afin de prendre en compte la tendance linéaire entre les
963 résidus et l'indice de végétation (IV) le modèle est adapté pour y intégré une fonction
964 linéaire de la végétation :

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

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

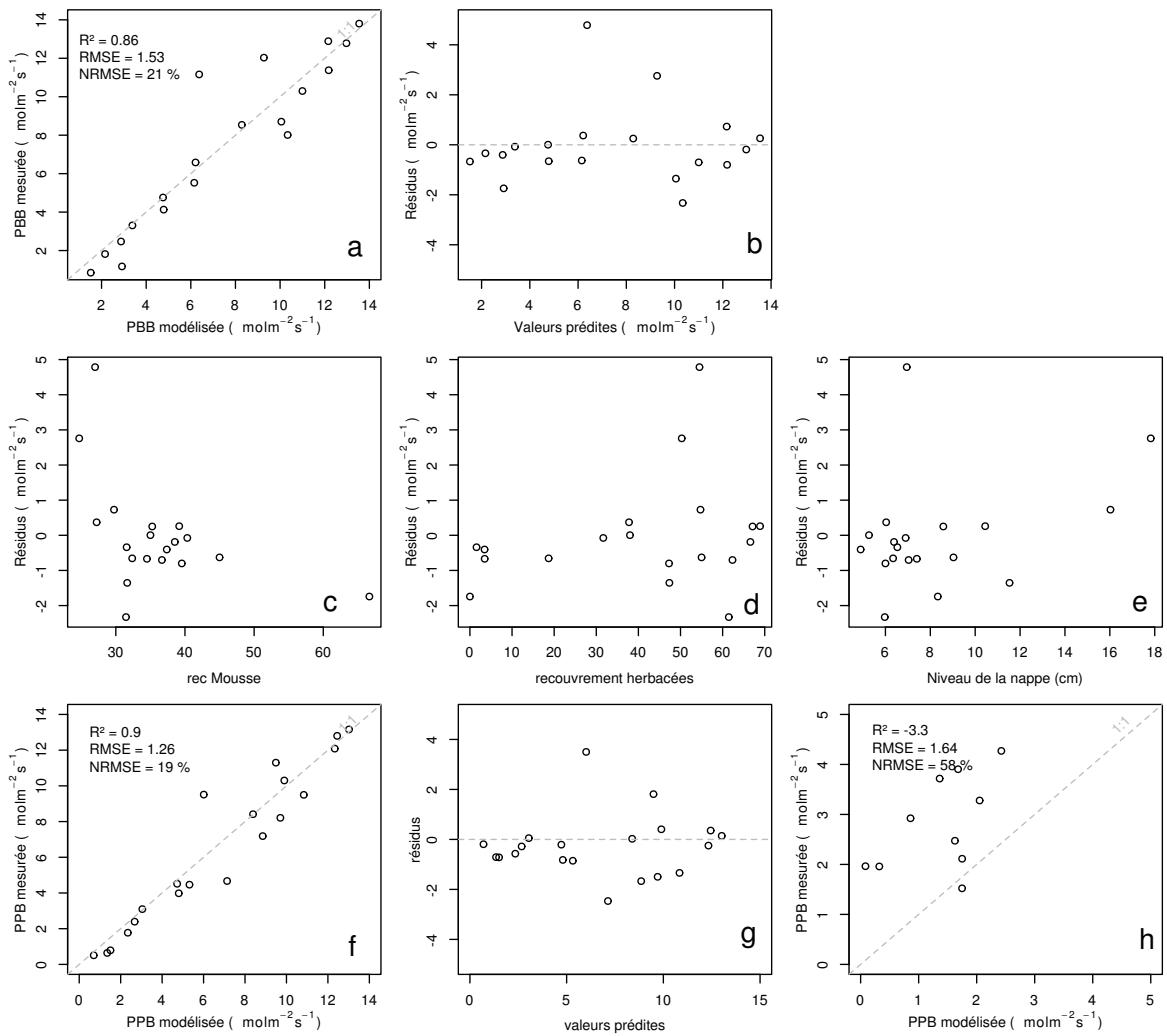


FIGURE 3.12 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.3

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.

984 La Respiration de l'Écosystème

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

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

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

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

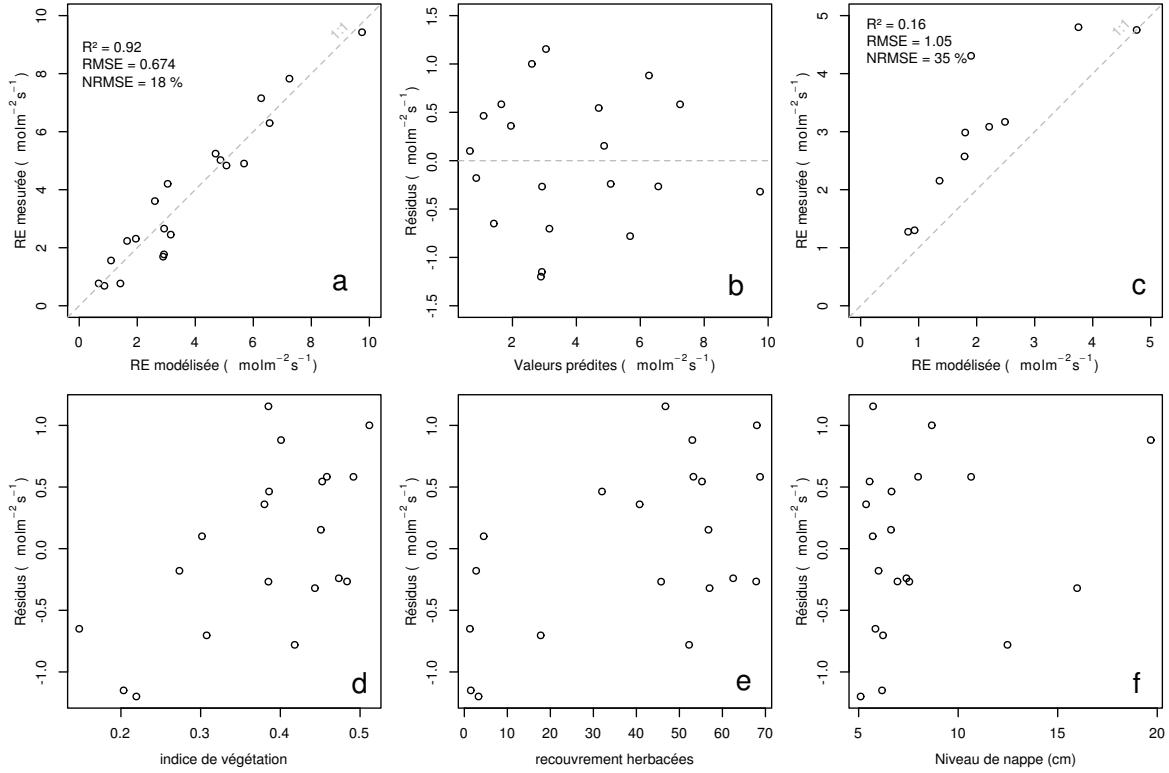


FIGURE 3.13 – RE modèles avec Tair

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

996 Les calibrations de ces nouvelles équations sont présentées dans la figure 3.13-a,b et
 997 3.13-d,e respectivement. Dans les deux cas, l'erreur diminue pour avoisiner 13 %, avec
 998 des résidus qui se répartissent de façon non-biaisée. L'évaluation de ces deux équations
 999 montre cependant des différences : D'un côté l'équation 3.5 ne permet pas de diminuer
 1000 l'erreur standard qui vaut 34 %, et est donc très proche des 35 % calculé pour l'évalua-
 1001 tion du modèle n'intégrant pas la végétation. De l'autre l'évaluation de l'équation 3.6
 1002 montre une erreur standard plus faible s'établissant à 23 %. Les paramètres des diffé-
 1003 rentes équations sont présentés dans le tableau 3.1, les modèles RE-1, RE-2, et RE-3
 1004 correspondent respectivement aux équations 3.4, 3.5 et 3.6. À l'inverse de la PPB les
 1005 paramètres des modèles de la RE ont, à l'exception du paramètre c du modèle RE-2,
 1006 une significativité importante et une erreur standard faible.

3.3. Résultats

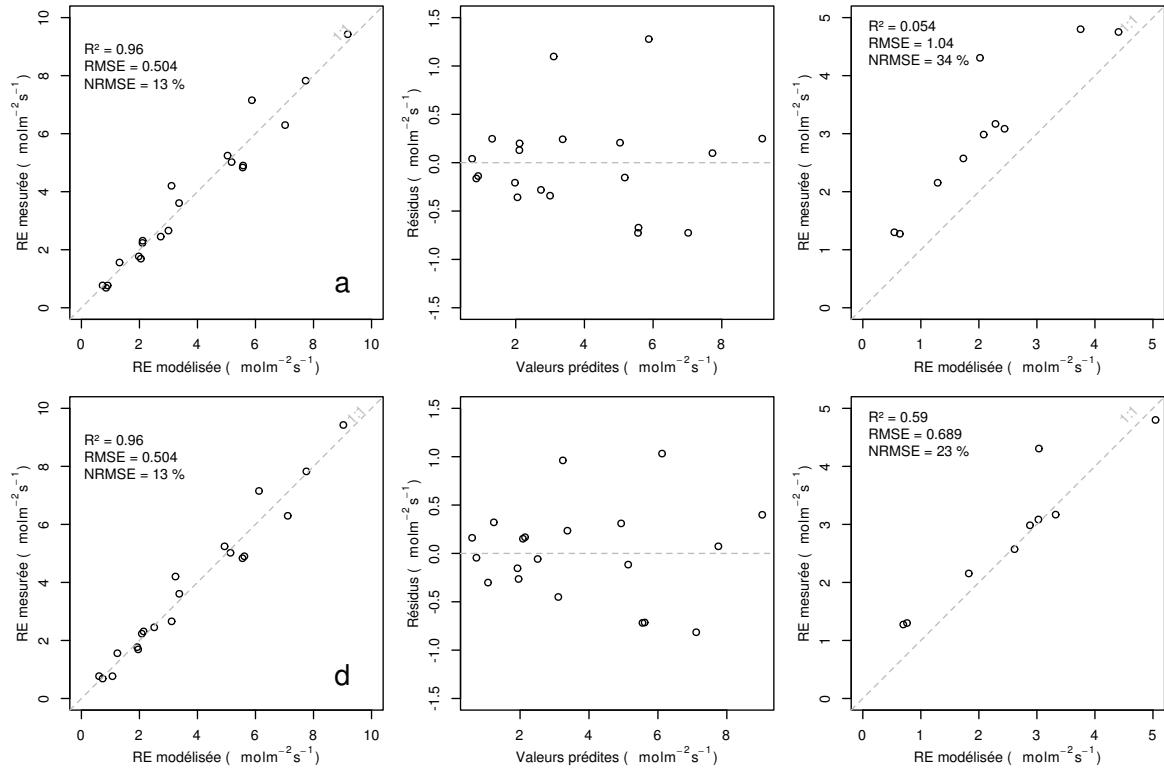


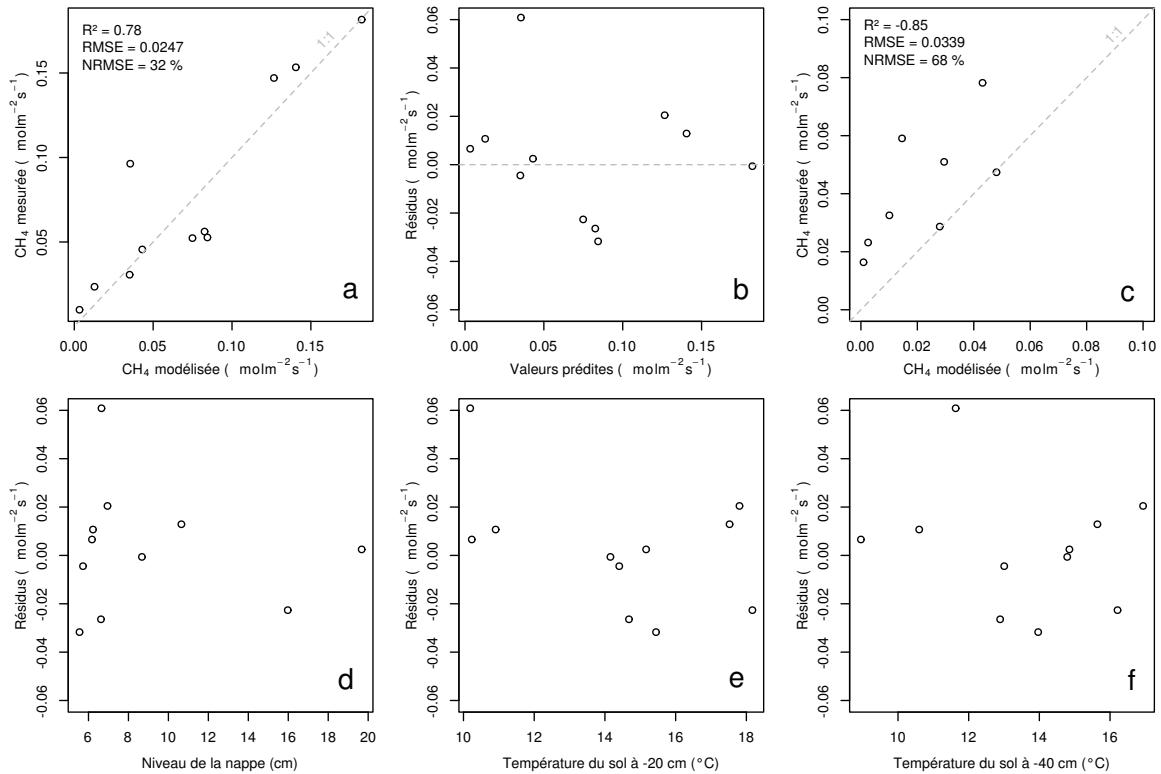
FIGURE 3.14 – RE modèles avec Tair

1007 Le flux de CH₄

1008 Les relations entre les facteurs contrôlant mesurés et le CH₄ sont moins claires
 1009 que celles concernant le CO₂. La corrélation la plus importante semble être liée à
 1010 la végétation (Figure 3.10). le méthane est également corrélé avec les températures,
 1011 faiblement avec les températures de surface puis plus fortement avec les températures
 1012 du sol à plus forte profondeur. Enfin il est anti-corrélé ($R=-0.51$) avec le niveau de la
 1013 nappe. Les relations CH₄ et végétation ont donc pu être modélisées avec

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

1014 Avec les données acquises, l'indice de végétation est le meilleur prédicteur (Fi-
 1015 gure 3.15), il explique 78 % de la variabilité du CH₄ avec une erreur standard de 32 %.
 1016 Aucune tendance ne semble se dégager entre les résidus de cette équation et les facteurs
 1017 contrôlant mesurés. L'évaluation de cette équation montre une tendance à sous-estimer
 1018 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.

Le COD

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

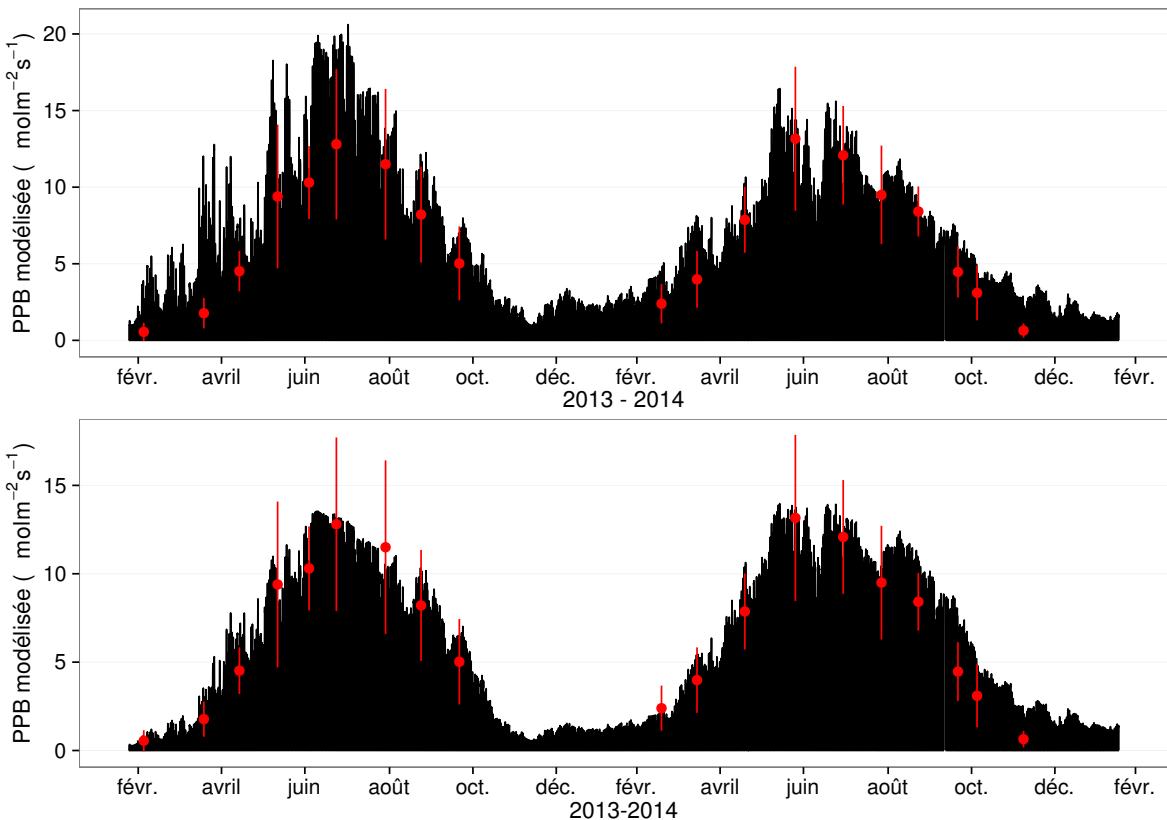
L'interpolation des flux de PPB montrent une variabilité saisonnière proche de celle mesurée sur le terrain (Figure 3.16). Les valeurs les plus fortes mesurées ne semblent pas atteinte par le modèle PPB-2 à l'inverse du modèle PPB-1. Dans les deux cas les modèles semblent sur-estimer la valeur de PPB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

Pour la RE, l'interpolation suit également les variations saisonnières mesurées mensuellement (Figure 3.17). Les gammes de valeurs mesurées sont très proche des gammes interpolées. L'interpolation des flux de la RE est très proche quel que soit le modèle 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 CO₂ interpolé à partir de PPB-1 et PPB-2

1032 RE-2 et RE-3 diminue la RE maximum modélisée en 2013 par rapport au modèle RE-1.

1033 Les flux de CH₄ interpolés (Figure 3.18), suivent également une cyclicité saisonnière.

1034 L'estimation du CH₄ semble rendre compte dans les grandes lignes de la différence de

1035 flux mesurée entre 2013 et 2014.

1036 Les flux interpolés à l'heure puis sommés par années sont présentés dans le ta-

1037 bleau 3.2 pour les différents modèles. Sur les deux années, selon le modèle utilisé, la

1038 PPB stocke du carbone pour 1070 à 1290 gC m⁻² an⁻¹ pour PPB-2 et PPB-1 respecti-

1039 vement. Dans le détail on observe une différence entre les deux modèles : Celui utilisant

1040 uniquement la température de l'air (PPB-1) présente un stockage plus important en

1041 2013 qu'en 2014. Tandis que le modèle prenant en compte la végétation (PPB-2) stocke

1042 moins de carbone en 2013 par rapport à 2014. L'intégration de la végétation minimise

1043 également l'erreur standard de l'estimation, la divisant approximativement par deux.

1044 La différence de comportement, entre les années de mesures, liée à l'intégration de

1045 la végétation est également visible sur l'estimation de la RE. La prise en compte de la

3.3. Résultats

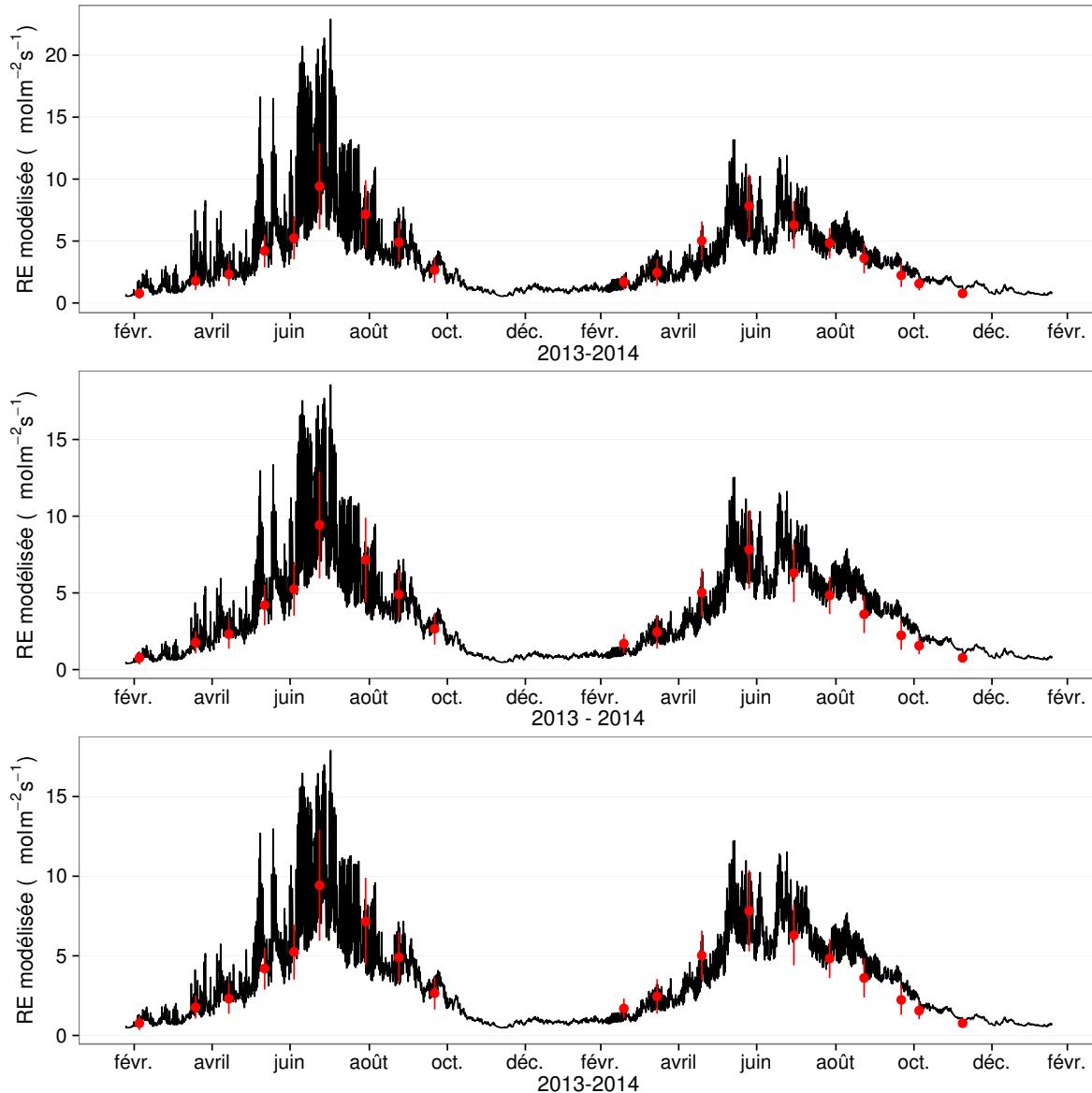


FIGURE 3.17 – Flux de CO₂ interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3

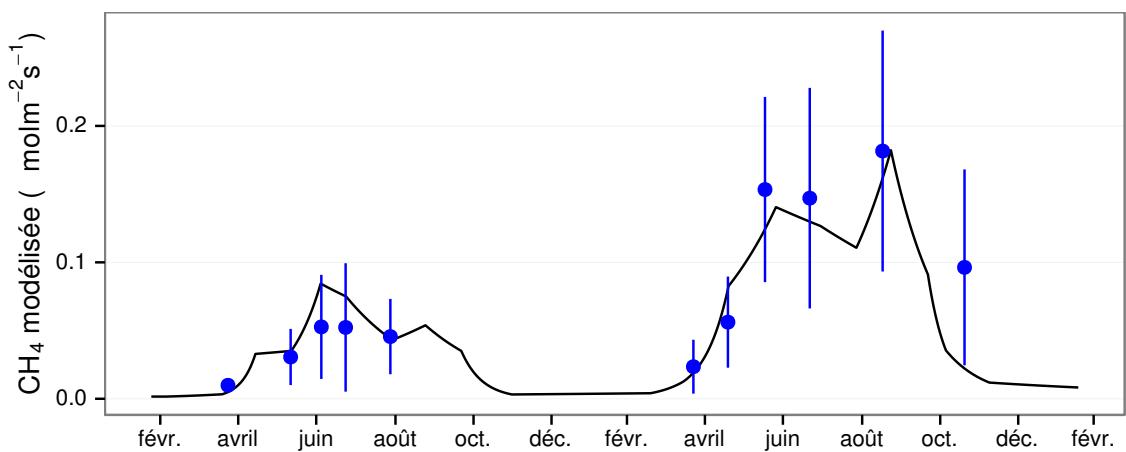


FIGURE 3.18 – Flux de CO₂ interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3

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

1046 végétation (modèles RE-2 et RE-3) conduit à une respiration plus forte en 2014 qu'en
 1047 2013 à l'inverse de RE-1. La différence entre l'estimation de la RE en 2013 et en 2014
 1048 diminue avec l'intégration de la végétation. Elle passe de 102 pour RE-1 à 78 puis
 1049 41 pour RE-2 et RE-3. Malgré ces différences, on observe une grande proximité dans
 1050 les valeurs des flux interpolés sur les 2 années, quel que soit le modèle, avec un écart
 1051 maximum de 25 gC m⁻² an⁻¹.

1052 Les flux de CH₄ entachés d'une erreur importante, sont cependant beaucoup plus
 1053 faible en valeur absolue que ceux de la PPB ou de la RE. On y observe malgré tout un
 1054 flux qui fait plus que doubler en 2014 par rapport à 2013.

1055 Les bilans issus des différentes combinaisons (à l'exception de RE-3, très proche de
 1056 RE-2) de modèles sont présentés dans le tableau 3.3 et varient de -233 gC m⁻² an⁻¹
 1057 à +12 gC m⁻² an⁻¹ stocké dans la tourbière. L'intégration de la végétation dans la
 1058 modélisation de PPB fait baisser les bilans de carbone dans le négatif au-delà de
 1059 -200 gC m⁻² an⁻¹, avec une différence entre les bilans de 220 gC m⁻² an⁻¹ environ.
 1060 Cette différence sur les bilans est bien moindre, environ 26 gC m⁻² an⁻¹ entre les mo-
 1061 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					

1062 Évaluation du bilan

1063 L'analyse de sensibilité, consistant à faire varier chaque paramètre des modèles
 1064 de $\pm 10\%$, les combinaisons de modèles PPB-1, PPB-2, RE-1 et RE-3 ont été testé
 1065 (Tableau 3.4). Le modèle RE-2, très proche du modèle RE-3 n'a pas été testé. **Attente**
 1066 **du COD, les valeurs du tableau sont fausse pour le moment**

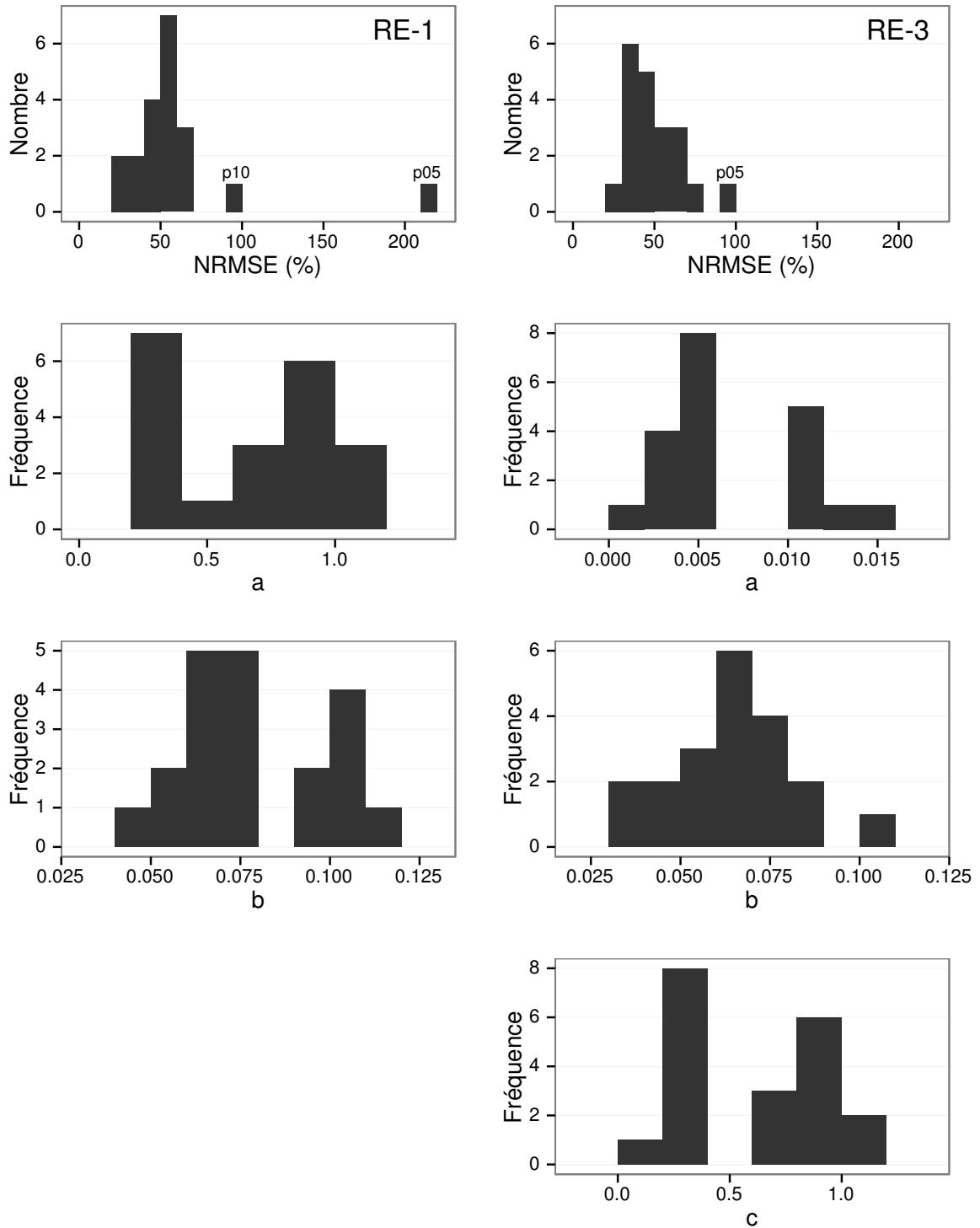


FIGURE 3.19 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres des modèles RE-1 et RE-3

3.3. Résultats

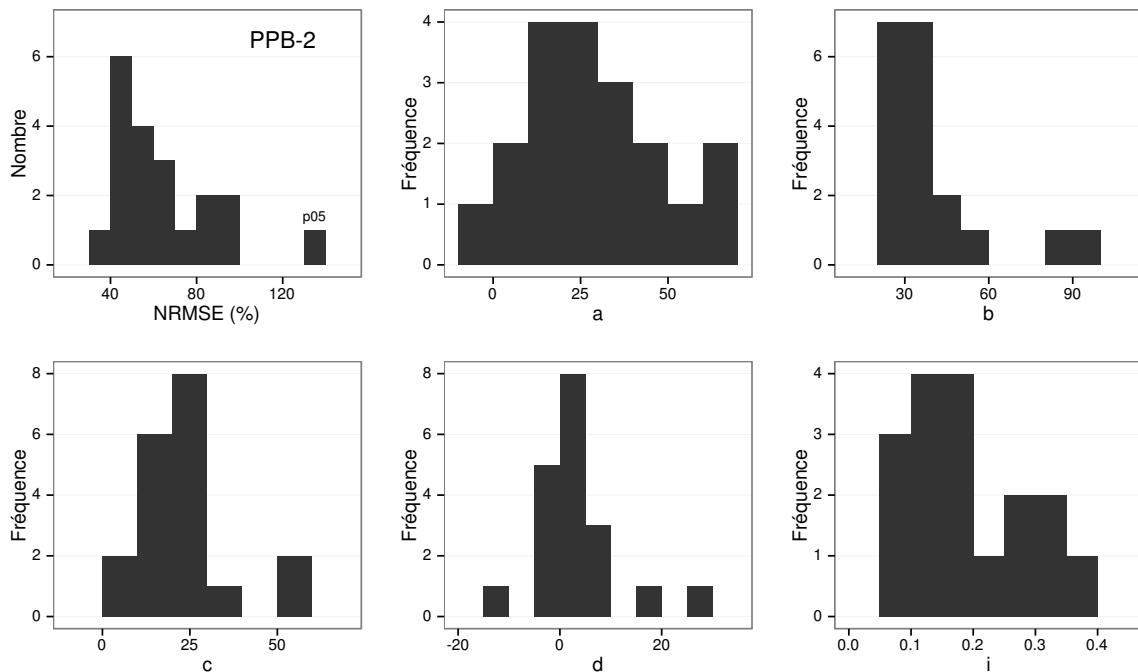


FIGURE 3.20 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2

3.3.4 Variabilité spatiale du bilan

Représentativité locale

La classification hiérarchique a permis de distinguer 4 groupes de végétation (Figure 3.21). Dans le premier groupe, la strate muscinale est majoritaire avec un recouvrement moyen de 91 %, moins de 35 et 15 % de recouvrement pour les herbacées et les arbustes respectivement. Le deuxième groupe est le plus homogène avec un recouvrement moyen des strates muscinale et arbustive de 63 58 % chacune. C'est également le groupe où il y a de moins d'herbacées avec un recouvrement de 24 %. La strate herbacée est majoritaire dans le troisième groupe avec un recouvrement moyen de 63 %, la strate arbustive y est peu présente (19 % en moyenne) et la strate muscinale y est pour ainsi dire absente (1 %). La strate muscinale est également absente, ou presque, dans le groupe quatre (1 %). Groupe dans lequel la strate arbustive est majoritaire avec de 65 % de recouvrement moyen, et la strate herbacée avec 33 %.

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

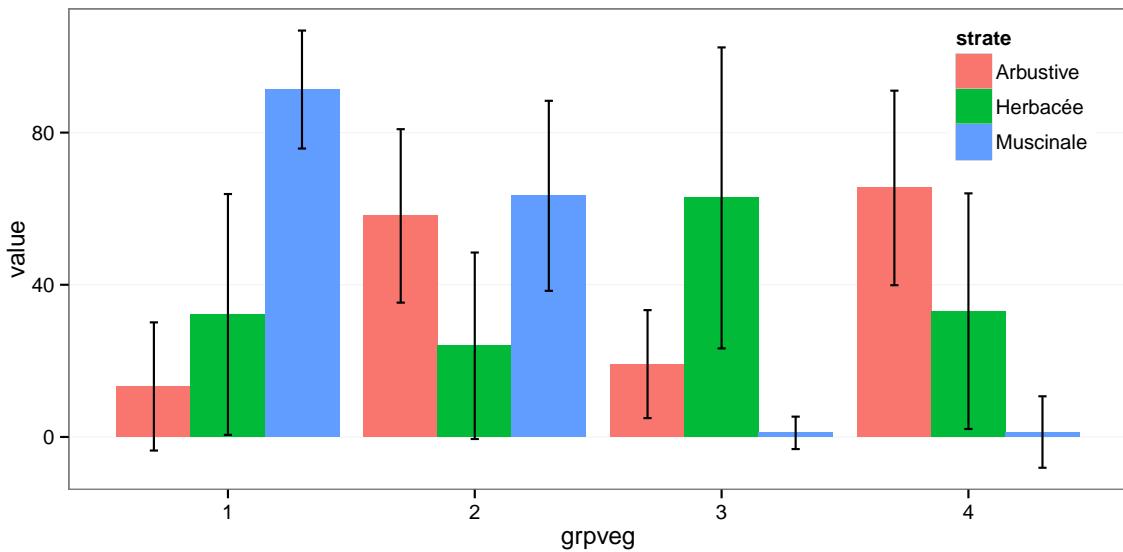


FIGURE 3.21 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2

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

1090 Modélisation par placette

1091 Corrélation avec facteurs contrôlant

1092 3.4 Discussion

1093 3.4.1 Estimations des flux

1094 PPB

1095 L'estimation des flux de PPB, est comprise entre 957 et 1322 gC m⁻² an⁻¹ selon
1096 l'année et le modèle utilisé. Ces valeurs sont très élevées comparées à des tourbières
1097 boréales comme celles étudiées par ([Trudeau et al., 2014](#)) ou encore ([Peichl et al., 2014](#))
1098 dont les valeurs de PPB sont respectivement comprise entre 123 et 131 gC m⁻² an⁻¹
1099 et entre 203 et 503 gC m⁻² an⁻¹. Une première hypothèse permettant d'expliquer une
1100 telle différence, est la différence entre les températures moyennes sur les sites. -4,3 °C
1101 et 1,2 °C respectivement pour [Trudeau et al. \(2014\)](#) et [Peichl et al. \(2014\)](#). Ces tempé-
1102 ratures sont bien plus faible pour les sites des études pré-citées que sur la tourbière de
1103 La Guette. Une seconde hypothèse, qui n'exclue pas la première, serait la composition
1104 végétale de ces sites. La tourbière de La Guette envahie par une végétation vasculaire,
1105 notamment herbacée, est peut-être plus proche d'une prairie tourbeuse. En effet lorsque
1106 la compare à ce type d'écosystèmes les valeurs observées sont plutôt proche. ([Jacobs](#)
1107 *et al., 2007*) estime des valeurs de PPB comprises entre 400 et 2000 gC m⁻² an⁻¹ avec
1108 une moyenne de 1300 gC m⁻² an⁻¹ dans des prairies tourbeuses hollandaises. Sur des
1109 écosystèmes similaires, au Danemark, ([Görres et al., 2014](#)) trouve des valeurs de PPB
1110 plus importantes encore, entre 1555 et 2590 gC m⁻² an⁻¹. Il apparaît cohérent que la
1111 tourbière de La Guette, par sa position géographique, et donc le climat qu'elle subit,
1112 mais également par sa problématique d'envahissement important par une végétation
1113 vasculaire notamment herbacée, s'approche en termes de flux de site tourbeux utilisés
1114 comme prairie.

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

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

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

RE

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

3.4. Discussion

1143 2014; Trudeau *et al.*, 2014) (pour reprendre les études citées précédemment) qui s'éta-
1144 blissent respectivement entre 137 et 443 gC m⁻² an⁻¹ et 206 et 234 gC m⁻² an⁻¹. Elles
1145 sont en revanche plus faible que celle mesurées par (Jacobs *et al.*, 2007), entre 500 et
1146 2000 gC m⁻² an⁻¹, ou par (Görres *et al.*, 2014) : entre 2070 et 3500 gC m⁻² an⁻¹.

1147 À l'inverse de la PPB, l'intégration de la végétation pour modéliser la RE n'amé-
1148 liore que peu l'estimation de la RE lors de la phase de calibration : la différence entre
1149 les valeurs d'erreur standard est de 5 %. En revanche lors de la phase d'évaluation,
1150 l'utilisation du recouvrement des herbacées semble améliorer l'estimation de façon plus
1151 importante avec une différence de 11 % entre les valeurs d'erreur standard. Contraî-
1152 rement à la PPB la différence apportée par l'intégration de la végétation (RE-2 ou
1153 RE-3) est du même ordre de grandeur en 2013 et en 2014. Sur les 2 années, l'effet
1154 de l'intégration de la végétation est limité avec une différence de 25 gC m⁻² an⁻¹ au
1155 maximum (entre ER-1 et ER-3), soit moins de 2 % du flux. Encore une fois l'intérêt
1156 de l'évaluation est mis en avant puisqu'il permet de distinguer des modèles très proche
1157 lors de la calibration.

1158 Les incertitudes sur l'estimation des paramètres RE sont beaucoup moins impor-
1159 tante que celle de la PPB. L'estimation des paramètres des modèles, à l'exception du
1160 paramètre c du modèles RE-2, ont une p-value inférieure à 0.05. L'erreur calculée lors
1161 de l'évaluation de ces modèles, si elle augmente par rapport à la calibration, reste faible
1162 particulièrement pour le modèle RE-3 où elle vaut moins de 25 %. La RE semble donc
1163 relativement contrainte, avec une estimation des paramètres fiable et une différence
1164 entre les estimations issues des modèles relativement limitée.

1165 CH₄

1166 Les flux de CH₄ sont faibles comparés aux flux de CO₂. Les valeurs mesurées sont
1167 plus forte que celles mesurés entre 0 et 0,03 μmol m⁻² s⁻¹ par Bortoluzzi *et al.* (2006).
1168 Pour 2013 les valeurs mesurées sont proches de celle mesurée par Long *et al.* (2010).
1169 L'absence d'étiage en 2014 explique peut-être le doublement des flux... (**Réf needed**)

1170 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)

COD

3.4.2 Estimations des bilans

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

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

3.4.3 Sensibilité et limitations du bilan

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

3.4. Discussion

1197 tivement bien contrainte, sur les 2 années la différence entre les différentes équations
1198 utilisées ne dépassent pas $25 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

1199 sensibilité du bilan au variation des paramètres

1200 **limitations** Outre ces aspects ce bilan de carbone est aussi limité par sa repré-
1201 sentativité. Ainsi la strate arborée fortement présente dans certaines zones n'est pas
1202 directement prise en compte. De la même manière une partie restreinte de la tourbière
1203 mais néanmoins présente est constitué de touradons dont l'effet n'a pas été pris en
1204 compte. (**Réf needed**) (**biblio effet microtype**).

- 1205 — pas de cartographie (pas grave si p7 maj bien représentée par mdl ecos)
1206 — extrapolation sur d'autres site difficile (cf validation)

1207 3.4.4 Représentativité locale du modèle

1208 Distribution des paramètres

1209 Pourquoi certaines placette mieux que d'autres

1210 Concernant la respiration la représentativité locale des modèles calibrés à l'échelle
1211 de l'écosystème semble plus homogène pour le modèle RE-3 que pour le modèle RE-1.

1212 Une telle comparaison entre PPB-1 et PPB-2 n'a pas été possible car vu le faible
1213 nombre de données et la qualité relative des modèles PPB par rapport aux modèles
1214 RE, peu de modèles sont parvenus à converger pour PPB-1 (11 sur 20 placettes) et
1215 pour PPB-2 (17 sur 20 placettes).

1216 3.4.5 Variation du bilan avec la végétation

1217 Le calcul des bilans avec les groupes de végétation permet de mettre en évidence
1218 des comportements différents des flux selon la végétation majoritaire. Ainsi le groupe 3
1219 dans lequel la strate herbacée est la plus importante est celui où la PPB est la plus forte.
1220 Ce point semble en cohérence avec la croissance annuelle importante des herbacées. À
1221 l'inverse le groupe 1 dans lequel la strate muscinale est la plus importante est également
1222 le groupe pour lequel la PPB est la plus faible. (**Réf needed**)

1223 Pour la RE, ce sont les groupes 3 et 4 qui ont les flux estimés les plus importants
1224 avec une différence d'environ $200 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ avec les deux autres groupes. Malgré
1225 leurs différences, le groupe 2 possède une strate muscinale importante alors qu'elle est
1226 absente dans le groupe 3, ils ont en commun d'avoir une strate arbustive importante.

1227 **3.4.6 perspectives**

1228 cartographie ?

1229 4 Effets de l'hydrologie sur les flux de GES

1230

<small>1231</small>	4.1 Introduction	80
<small>1232</small>	4.2 Procédure expérimentale	81
<small>1233</small>	4.2.1 Expérimentation A	82
<small>1234</small>	4.2.2 Expérimentation B	82
<small>1235</small>	4.2.3 traitement	83
<small>1236</small>	4.3 Résultats	84
<small>1237</small>	4.3.1 Expérimentation A	84
<small>1238</small>	4.3.2 Expérimentation B	87
<small>1239</small>	4.3.3 tendances générales	90
<small>1240</small>	4.4 Discussion	90
<small>1241</small>	4.4.1 Comparaison aux mesures <i>in-situ</i>	90
<small>1242</small>	4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de gaz	92
<small>1243</small>	4.4.3 Effet cycles multiples	93
<small>1244</small>		
<small>1245</small>		
<small>1246</small>		

¹²⁴⁷ 4.1 Introduction

¹²⁴⁸ Au cours des deux années qu'ont duré les suivis des émissions de flux de CO₂ et
¹²⁴⁹ de CH₄ sur la tourbière de La Guette, le niveau de la nappe n'a que très faiblement
¹²⁵⁰ varié comparé aux années précédentes bien plus sèches. En conséquence de cette faible
¹²⁵¹ variation peu de variations des flux ont pu y être relié. Malgré tout il est connu que
¹²⁵² l'hydrologie est un facteur contrôlant important des flux.

¹²⁵³ Ainsi de nombreuses études on reliées les émissions de CO₂ au niveau de la nappe
¹²⁵⁴ avec, cependant, des résultats et des conclusions variables. La majorité des études
¹²⁵⁵ montrent qu'une tourbière dont le niveau de la nappe est abaissé, soit par un drainage,
¹²⁵⁶ soit par une sécheresse, aura tendance à avoir un ENE plus faible : Ainsi [Strack et](#)
¹²⁵⁷ [Zuback \(2013\)](#) expliquent des valeurs d'ENE plus faibles qu'escompté, par des mesures
¹²⁵⁸ faites pendant une période relativement sèche. Une observation similaire est faite par
¹²⁵⁹ [Aurela et al. \(2007\)](#) qui mesure un ENE plus faible lors d'une année sèche, sur une
¹²⁶⁰ tourbière à Carex du sud de la Finlande. Ils attribuent la variation de l'ENE à une
¹²⁶¹ augmentation de la RE et à une baisse de la PPB, dans des conditions plus chaudes
¹²⁶² et plus sèches. [Peichl et al. \(2014\)](#) observent également une baisse de l'ENE lors d'une
¹²⁶³ année où le niveau de la nappe baisse de façon importante, au delà de -30 cm. Ils
¹²⁶⁴ expliquent cette baisse par une baisse de la PPB. Cette observation va dans le même
¹²⁶⁵ sens que [Lund et al. \(2012\)](#) qui, lors de l'étude d'une tourbière située au sud de la suède,
¹²⁶⁶ observent en 2008 une baisse de l'ENE. Les mesures de RE faites cette année là étant
¹²⁶⁷ similaires à celles effectuées les autres années, ils lient cette baisse à une diminution
¹²⁶⁸ de la PPB. En 2006, sur la même tourbière, [Lund et al. \(2012\)](#) observent une autre
¹²⁶⁹ baisse de l'ENE. Mais cette fois, les mesures de PPB à leur tour similaires à celle
¹²⁷⁰ des autres années n'expliquent pas cette baisse. À l'inverse de 2008, cette baisse est
¹²⁷¹ expliqué par une augmentation de la RE Ce paradoxe apparent est interprété grâce
¹²⁷² au type de sécheresse : courte et intense pendant la saison de végétation de 2006 et
¹²⁷³ d'intensité plus faible mais d'une durée plus longue en 2008. Enfin et à l'inverse des

1274 résultats précédemment cités, [Ballantyne et al. \(2014\)](#) dans une étude des effets à long
 1275 terme d'une baisse du niveau de la nappe, n'observe que peu d'effet sur l'ENE tandis
 1276 que les flux de RE et de PPB augmentent tous deux. Toutes ces études montrent que
 1277 si le niveau de la nappe est incontestablement reconnu comme un facteur de contrôle
 1278 des flux de CO₂, il est difficile d'en dégager, avec certitude, un comportement valable
 1279 de façon générale.

1280 Concernant le méthane, une baisse du niveau de la nappe est généralement liée à
 1281 une baisse des émissions de CH₄, et inversement ([Strack et al., 2006; Pelletier et al.,](#)
 1282 [2007; Turetsky et al., 2008](#)). Cependant d'autres études, principalement dans des sites
 1283 où le niveau de la nappe est proche de la surface du sol, montrent une absence de
 1284 relation entre le niveau de la nappe et les émissions de méthane, voire une relation
 1285 inverse, avec des flux plus faibles liés à des niveaux de nappe plus élevés ([Kettunen](#)
 1286 [et al., 1996; Bellisario et al., 1999; Treat et al., 2007](#)). Là encore selon les conditions
 1287 environnementales, la relation entre les flux de CH₄ et le niveau de la nappe n'est pas
 1288 aisément généralisable.

1289 L'objectif de ce chapitre est donc d'explorer plus en avant l'effet du niveau de la
 1290 nappe sur les émissions de GES, effet peu ou pas visible *in-situ*. Plus précisément il
 1291 s'agit de déterminer l'effet de cycles de dessication/ré-humectation sur les émissions de
 1292 CO₂ et de CH₄.

1293 4.2 Procédure expérimentale

1294 L'étude des cycles de dessication/ré-humectation s'est effectué sur des mésocosmes,
 1295 prélevés sur la tourbière de La Guette. L'expérimentation a été testé durant l'été 2013
 1296 avec un seul cycle relativement long, on s'y référera par la suite comme l'expérimenta-
 1297 tion A. Cette expérimentation a été renouvelée l'été 2014 afin d'augmenter à trois le
 1298 nombre de cycles, ceux-ci étant plus court. On appellera cette seconde expérimentation,
 1299 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

¹³²⁷ Le deuxième cycle dura du 17 au 28 juillet et du 29 juillet au 3 aout, Enfin le dernier
¹³²⁸ cycle fut mesuré du 4 au 11 aout pour la dessication et du 12 au 14 aout pour la
¹³²⁹ réhumectation.

¹³³⁰ 4.2.3 traitement

¹³³¹ Les flux sont moyennés par jour de mesure.

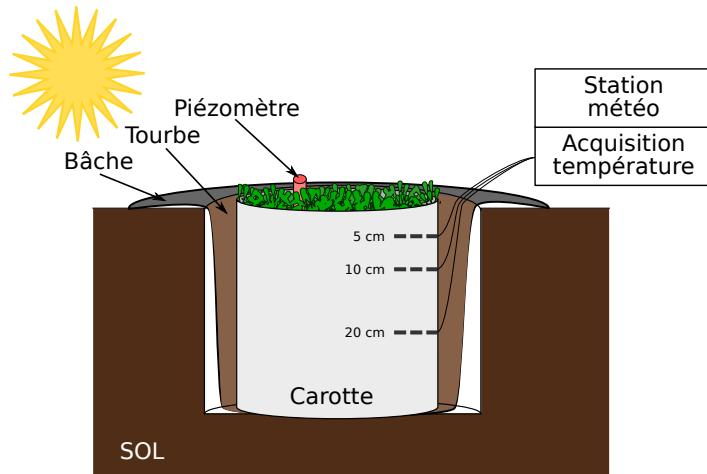


FIGURE 4.2 – Schéma d'un mésocosme

¹³³² 4.3 Résultats

¹³³³ 4.3.1 Expérimentation A

¹³³⁴ Pendant la phase de dessication de l'expérimentation A, on observe une baisse du
¹³³⁵ niveau de la nappe pour les placettes contrôles comme pour les placettes traitements
¹³³⁶ (Figure 4.3–A). Malgré tout leur comportement est différent : les placettes contrôles ont
¹³³⁷ un niveau de nappe relativement élevé jusqu'au 24 juin puis ce niveau baisse fortement
¹³³⁸ alors que les placettes du groupe traité ont un niveau de nappe qui diminue de façon
¹³³⁹ plus continue sur l'ensemble de la phase. La remontée du niveau de la nappe s'effectue
¹³⁴⁰ de façon similaire pour les deux groupes. Enfin après la phase de ré-humectation, le
¹³⁴¹ niveau de la nappe baisse à nouveau, plus rapidement pour le groupe traitement que
¹³⁴² pour le groupe contrôle.

¹³⁴³ Les émissions de CH_4 , s'étendant de 0 et $0,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sont relativement si-
¹³⁴⁴ milaires entre les deux groupes jusqu'au 24 juin 2013, date à partir de laquelle ils
¹³⁴⁵ commencent à diverger (Figure 4.3–B). À cette date les émissions du groupe contrôle
¹³⁴⁶ augmentent rapidement pour atteindre $0,55 \pm 0,31 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ tandis que celles du
¹³⁴⁷ groupe traité restent stable. Finalement mi-juillet, à la fin de la phase de dessicca-
¹³⁴⁸ tion les deux groupes retrouvent des niveaux d'émission similaires compris entre 0,1 et

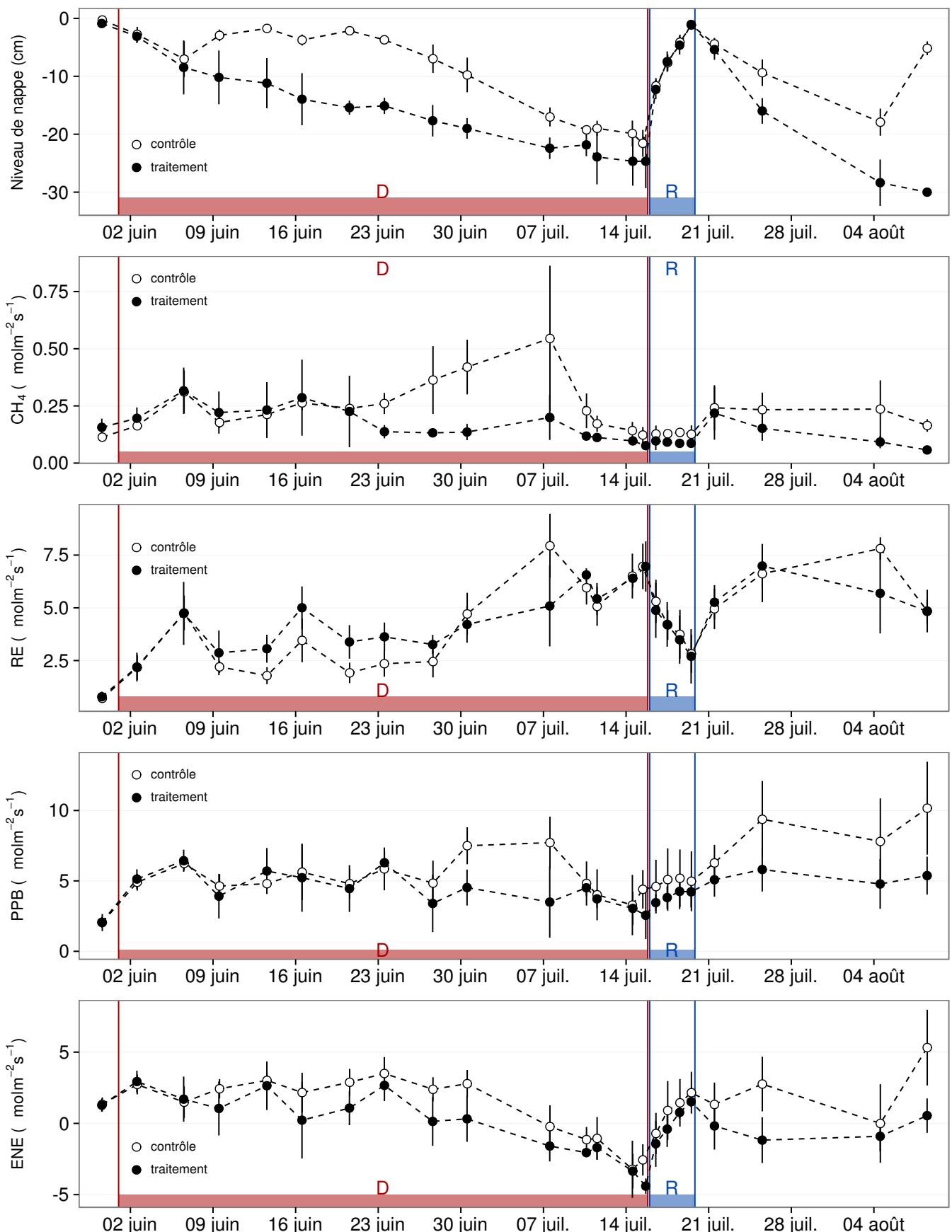


FIGURE 4.3 – Expérimentation A : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH_4 , RE, PPB, ENE en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent à la phase de dessiccation (D) en rouge et à la phase de réhuméction (R) en bleu.

4.3. Résultats

1349 0,2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ces niveaux restent constant pendant toute la phase de réhumecta-
1350 tion, avant d'augmenter légèrement par la suite ; ils ne dépassent pas 0,25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
1351 mais franchissent la barre des 0,2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

1352 Pendant la phase de dessication, les valeurs de la RE tendent à augmenter quel
1353 que soit le groupe de placettes considéré (Figure 4.3–C). Ces valeurs inférieures à
1354 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
1355 mi-juillet, avant la réhumectation. Dans le détail cependant les deux groupes ne se
1356 comportent pas de la même façon : la RE du groupe traité augmente régulièrement
1357 pendant l'ensemble de cette phase, tandis que les valeurs du groupe de contrôle res-
1358 tent, dans un premier temps, stable jusque fin juin. La RE de ce groupe vaut alors
1359 $2,45 \pm 0,75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ contre $3,26 \pm 0,46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le groupe traité. Cet
1360 écart, pouvant varier dans le temps, étant installé depuis le 9 juin. À partir de dé-
1361 but juillet, les valeurs de RE du groupe de contrôle augmentent fortement dépas-
1362 sant les valeurs du groupe traité. La RE de ce groupe atteint alors un maximum à
1363 $7,93 \pm 1,52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ le 8 juillet avant de retrouver des valeurs proche de celles ob-
1364 servées dans le groupe traité. Cette augmentation brusque correspond temporellement
1365 à celle observé, pour le même groupe, dans les flux de CH₄. Lors de la phase de réhu-
1366 mectation, les flux de RE diminuent de façon très similaire pour les deux groupes ou
1367 ils atteignent un minimum proche de 2,75 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ce minimum reste cependant
1368 plus élevé que les valeurs mesurées initialement. Après la phase de réhumectation, les
1369 flux des deux groupe restent relativement proches pendant le reste des mesures, où ils
1370 remontent à mesure que le niveau de la nappe diminue à nouveau.

1371 Pour les deux groupes, les flux de PPB restent relativement stables pendant la
1372 phase de dessiccation (Figure 4.3–D). Jusqu'au 24 juin, les flux des deux groupes sont
1373 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
1374 moyenne pour les deux groupes). Après cette date, et comme pour le CH₄ et la RE,
1375 les valeurs de la PPB du groupe de contrôle augmentent et s'écartent de celles me-
1376 surées dans le groupe traité, en attendant de les rejoindre avant la fin de cette phase
1377 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

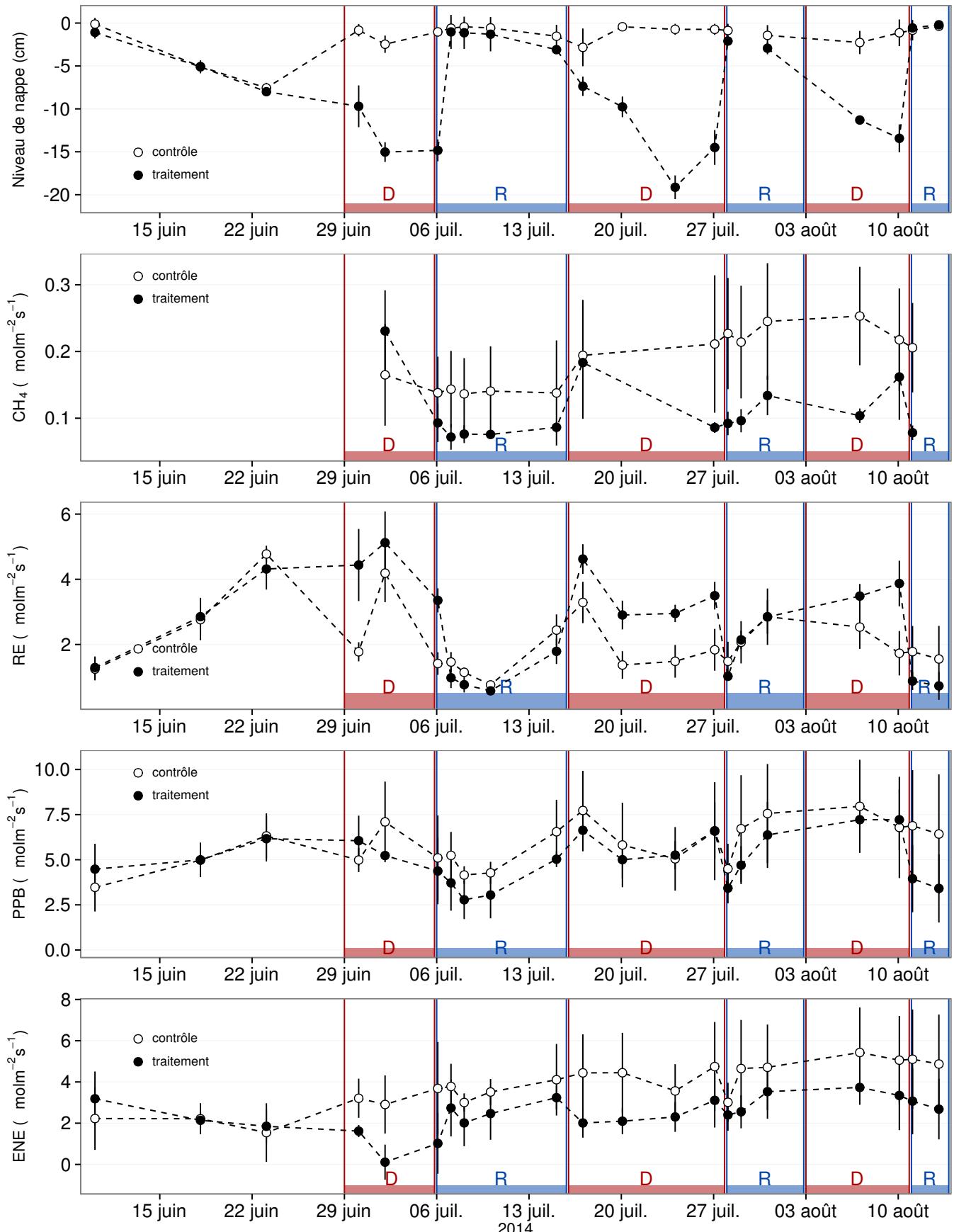


FIGURE 4.4 – Expérimentation B : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH_4 , RE, PPB, ENE en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent aux phases de dessiccation (D) en rouge et aux phases de réhumectation (R) en bleu.

1406 d'une quinzaine de centimètres en moyenne pour chaque cycle (Figure 4.4–A).

1407 Les flux de CH₄ moyen s'étendent de 0,07 à 0,34 µmol m⁻² s⁻¹. Les flux du groupe
1408 de contrôle, à l'exception de la première mesure, sont supérieurs aux flux du groupe
1409 traité, leurs moyennes respectives sur l'ensemble des mesures étant de 0,20 ± 0,06 et
1410 0,11 ± 0,05 µmol m⁻² s⁻¹ respectivement. Les émissions du groupe de contrôle tendent
1411 à augmenter sur la période de mesure. Une tendance similaire, quoique moins mar-
1412 quée, est également visible pour le groupe traité. Concernant les cycles de dessicca-
1413 tion/réhumectation, il est difficile de dégager des comportements communs, même s'il
1414 semble que l'assèchement conduit à une baisse des émissions (Figure 4.4–B) Cette re-
1415 lation, mise en exergue pas un nombre de points très faible, n'apparaît cependant pas
1416 sur l'ensemble des données (Figure 4.5–B) Un pic d'émission de CH₄ est également à
1417 noter pour chaque cycle pendant la phase de dessiccation.

1418 La RE varie pour les deux groupes entre 0,42 et 5,12 µmol m⁻² s⁻¹ (Figure 4.4–C)).
1419 Avant le démarrage des manipulations du niveau de la nappe, les valeurs des deux
1420 groupes sont très proches et augmentent tandis que le niveau de nappe diminue. Pen-
1421 dant les phases de dessiccation, les valeurs du groupe traité sont systématiquement supé-
1422 rieures, de 1,5 à 1,8 µmol m⁻² s⁻¹ en moyenne par phase, par rapport à celle du groupe
1423 de contrôle. À l'inverse pendant les phases de réhumectation les flux entre les deux
1424 groupes sont beaucoup plus proches avec une tendance de la RE du groupe de contrôle
1425 à être au dessus de celle du groupe traité. La RE du groupe traité est systématiquement
1426 plus faible pendant les phases de réhumectations que pendant les phases de dessicca-
1427 tions. En moyenne la RE vaut respectivement 2,28 ± 1,00 et 3,86 ± 0,80 µmol m⁻² s⁻¹
1428 pour les groupes de contrôle et traité pendant les phases de dessiccation et 1,70 ± 0,62
1429 et 1,51 ± 0,98 µmol m⁻² s⁻¹ pendant les phases de réhumectation.

1430 Sur l'ensemble de la période de mesure la PPB est comprise entre 2,78 et 7,96 µmol m⁻² s⁻¹.

1431 Avant le début des traitements les flux des deux groupes sont similaires (Figure 4.4–D).
1432 La première phase de dessiccation fait passer la PPB du groupe de contrôle au dessus
1433 du groupe traité. Pour les deux groupes, la PPB est plus importante lors des phases
1434 de dessiccation comparée aux phase de réhumectation, avec des moyennes respectives

4.4. Discussion

¹⁴³⁵ 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
¹⁴³⁶ $4,05 \pm 1,60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le groupe traité.

¹⁴³⁷ Les valeurs d'ENE mesurées sont comprises entre $0,11$ et $5,42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, elles
¹⁴³⁸ ont tendance à augmenter au cours du temps. Passé la période pré-traitements pendant
¹⁴³⁹ laquelle les flux de l'ENE sont similaires pour les deux groupes l'ENE du groupe de
¹⁴⁴⁰ contrôle est systématiquement supérieure à celle du groupe de traitement (Figure 4.4–
¹⁴⁴¹ E). L'évolution des deux groupes reste cependant relativement conjointe pendant la
¹⁴⁴² période de mesure avec pour le groupe traité une diminution récurrente de l'ENE au
¹⁴⁴³ début de chaque phase de dessiccation.

4.3.3 tendances générales

¹⁴⁴⁵ Pour les deux expérimentations une relation nette est visible entre le niveau de la
¹⁴⁴⁶ nappe et l'ENE qui diminue lorsque le niveau de nappe augmente (Figure 4.5–G,H).
¹⁴⁴⁷ La relation inverse est visible, pour les deux expérimentations, entre la RE et le niveau
¹⁴⁴⁸ de la nappe (Figure 4.5–C,D). La PPB par contre ne montre aucune tendance claire
¹⁴⁴⁹ quelle que soit l'expérimentation. On peut malgré tout noter que les valeurs de PPB les
¹⁴⁵⁰ plus faibles correspondent aux niveaux de nappe les plus élevés(Figure 4.5–E,F). Pour
¹⁴⁵¹ le méthane, que ce soit pour l'expérimentation A ou B, aucune tendance ne semble se
¹⁴⁵² 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*

¹⁴⁵⁵ Les flux moyen de CH_4 mesurés dans les mésocosmes des deux expérimentations
¹⁴⁵⁶ font partie des valeurs hautes mesurées sur le terrain. Certaines campagnes dépassent
¹⁴⁵⁷ nettement, en faisant plus que doubler, le maximum de $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mesuré en
¹⁴⁵⁸ 2014 sur la tourbière de La Guette.

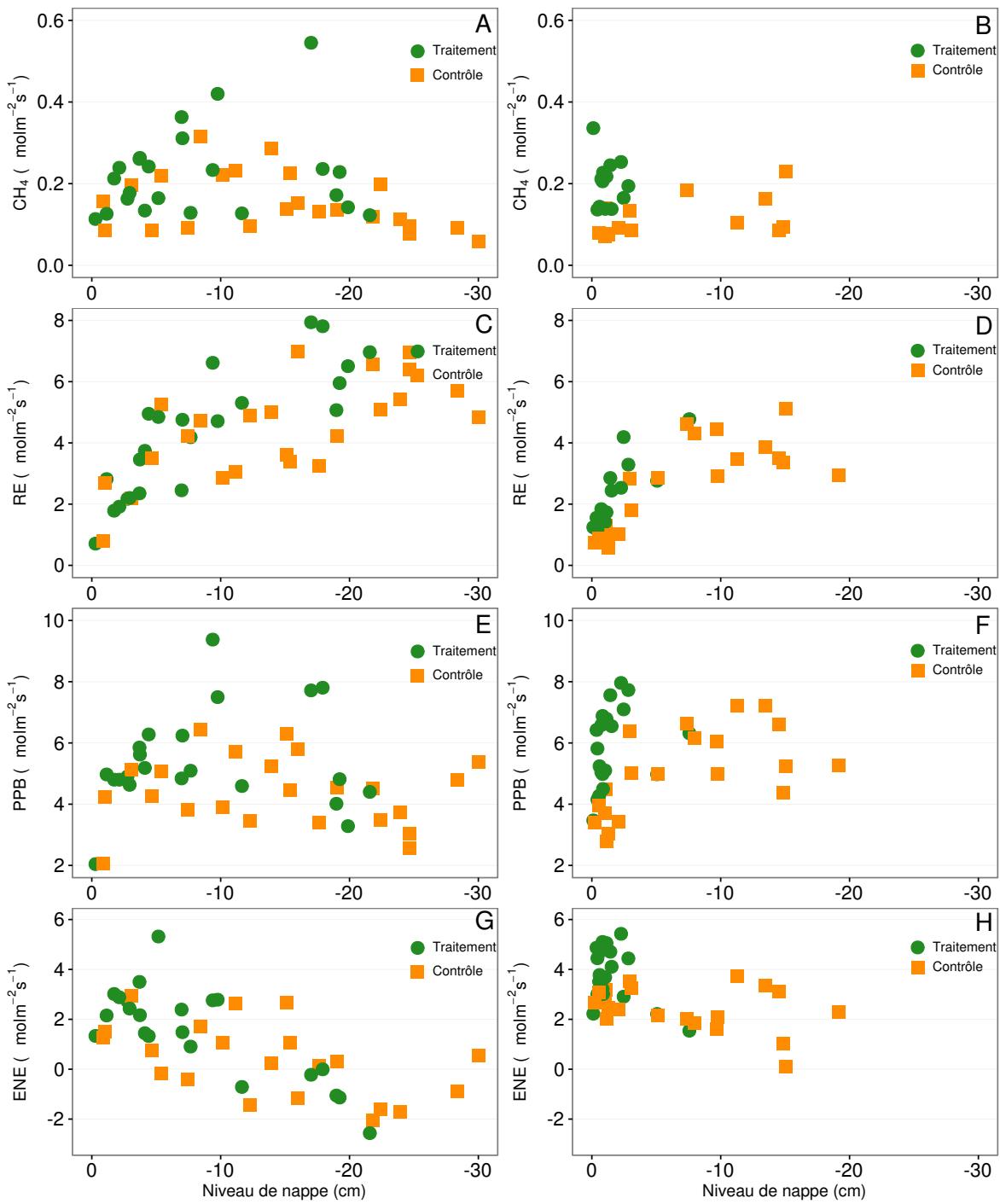


FIGURE 4.5 – Relations entre les flux de GES et le niveau de la nappe

4.4. Discussion

1459 Pour le CO₂ les flux sont généralement dans la gamme des valeurs mesurée sur la
1460 tourbière de La Guette. Pour l'expérimentation A, l'ENE moyen est plus faible que
1461 celui mesuré sur le terrain la même année : 0,81 contre 2,85 µmol m⁻² s⁻¹. Pour l'expé-
1462 rimentation B en revanche l'ENE moyen vaut 0,71 µmol m⁻² s⁻¹ ce qui est relativement
1463 proche de celui mesuré sur le terrain : 2,93 µmol m⁻² s⁻¹. Les flux de RE et de PPB
1464 sont moins fort que les flux mesurés sur le terrain mais restent dans leur gamme de
1465 valeurs. Ces comparaisons sont par ailleurs à relativiser puisque les mesures de flux
1466 n'ont pas nécessairement lieu aux mêmes moment de la journée.

1467 Comme pour la RE, les flux de PPB sont du même ordre de grandeur que ceux me-
1468 surés sur le terrain, mais légèrement plus faible : les maxima moyens mesurés dans les
1469 mésocosmes sont d'environ 7,5 pour des valeurs de 13 µmol m⁻² s⁻¹ mesuré directement
1470 sur la tourbière.

1471 4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de 1472 gaz

1473 Les résultats de ces deux expérimentations montrent clairement une augmentation
1474 de la RE quand le niveau de la nappe diminue. Ceci est en accord avec les résultats
1475 d'autres études que ce soit in-situ (Ballantyne *et al.*, 2014) ou en mésocosmes (Blodau
1476 *et al.*, 2004; Dinsmore *et al.*, 2009). Dans ces deux dernières publications, la baisse
1477 du niveau de la nappe diminue la PPB. Pas de variations claires de la PPB n'est vi-
1478 sible dans les données présentées, même si une légère tendance semble émergée aux
1479 plus fortes profondeur de nappe pour l'expérimentation A, ces observations restent à
1480 confirmer. Cette absence d'effet du niveau de la nappe sur la PPB peut, peut être,
1481 être liée à la profondeur des mésocosmes (30 cm). En effet dans Blodau *et al.* (2004)
1482 et Dinsmore *et al.* (2009), les mésocosmes utilisés sont plus grands, 75 et 41 cm res-
1483 pectivement, ont permis d'abaisser le niveau de l'eau au delà de -30 cm. Cette limite
1484 a été rapportée plusieurs fois comme étant un seuil au delà duquel son observés des
1485 changements importants (Blodau *et al.*, 2004; Peichl *et al.*, 2014). Ce seuil est expliqué
1486 comme étant la limite au delà de laquelle les forces de capillarités ne permettent plus

1487 d'alimenter en eau les sphaignes (Rydin et Jeglum, 2013a; Ketcheson et Price, 2014).
1488 Il résulte des constats précédents qu'une baisse du niveau de nappe, faisant augmenter
1489 la RE et ne changeant pas ou peu la PPB, conduit à une baisse de l'ENE. Cette di-
1490 minution de l'ENE est cohérente avec la littérature, que ce soit des expérimentations
1491 en mésocosmes (Aerts et Ludwig, 1997; Blodau *et al.*, 2004), ou in-situ (Bubier *et al.*,
1492 2003; Sonnentag *et al.*, 2010). Malgré tout l'extrapolation de ses résultats à d'autres
1493 situations n'est pas évidente car fortement fonction du contexte. D'autre études n'ont,
1494 par exemple, pas observé d'influence du niveau de la nappe sur la RE (Updegraff *et al.*,
1495 2001). Par ailleurs Laiho (2006) a montré l'importance du contexte et notamment celui
1496 de l'échelle de temps considéré qui peut impliquer des phénomènes différents et donc
1497 avoir des conséquences différentes.

1498 La dépendance entre les flux de CH₄ et le niveau de la nappe, devant conduire à une
1499 baisse des émissions quand le niveau de la nappe diminue, comme décrite dans Aerts et
1500 Ludwig (1997), Pelletier *et al.* (2007) ou Turetsky *et al.* (2008), n'a pas été clairement
1501 observée. Ce constat rejoins d'autres études dans lesquelles une relation inverse ou un
1502 absence de relation a été trouvé entre le CH₄ et le niveau de la nappe Kettunen *et al.*
1503 (1996); Bellisario *et al.* (1999); Treat *et al.* (2007). L'observation d'un pic de méthane
1504 suivant de quelques jours une phase de hausse du niveau de la nappe, est également
1505 rapportée par Kettunen *et al.* (1996). (**And so what ?**)

1506 4.4.3 Effet cycles multiples

1507 5 Variation journalière de la respiration de l'écosystème (article)

5.4. Discussion

₁₅₃₄ 5.1 Introduction

₁₅₃₅ 5.2 Procédure expérimentale et analytique

₁₅₃₆ 5.2.1 Synchronisation des données

₁₅₃₇ 5.2.2 Différence entre mesures de jour et mesures de nuit

₁₅₃₈ 5.2.3 Caractérisation physico-chimique

₁₅₃₉ 5.3 Résultats

₁₅₄₀ 5.3.1 Température de l'air et variabilité de RE

₁₅₄₁ 5.3.2 Synchronisation RE et température du sol

₁₅₄₂ 5.3.3 Équations utilisées

₁₅₄₃ 5.3.4 Relation entre RE et la température

₁₅₄₄ 5.3.5 Évolution du Q10

₁₅₄₅ 5.3.6 Différence entre mesures de jour et de nuit

₁₅₄₆ 5.3.7 Caractérisation de la tourbe

₁₅₄₇ 5.4 Discussion

₁₅₄₈ 5.4.1 Différence de RE entre les différents sites

₁₅₄₉ 5.4.2 Temps de latence entre température et RE

₁₅₅₀ 5.4.3 La synchronisation entre RE et la température améliore

¹⁵⁵⁵ Conclusions et perspectives

₁₅₅₆ 5.5 Bilan du bilan (de C) ?

- ₁₅₅₇ Flux fort
- ₁₅₅₈ sensibilité param forte
- ₁₅₅₉ Modèles multi annuel et prise en compte de la végétation
- ₁₅₆₀ Quid des variations journalières dans un bilan annuel ?
- ₁₅₆₁ Les prendre en compte améliorerait-il les modèles
- ₁₅₆₂ modèles globaux ? **limitations des équations** : Plus généralement, la majorité des
- ₁₅₆₃ tourbières sont sous la neige une partie de l'année, ce qui n'arrive que rarement sur
- ₁₅₆₄ la tourbière de La Guette et une partie possède également des zones d'eau libre, qui
- ₁₅₆₅ n'existent pas sur ce site.
- ₁₅₆₆ modèles globaux et profondeur de tourbe

₁₅₆₇ 5.6 Résilience de la tourbe par rapport aux

- ₁₅₆₈ 2 années sèches qui précèdent le BdC

₁₅₆₉ (lien chap 3 et 4)

₁₅₇₀ 5.7 Ouverture vers d'autre méthodes de me-

₁₅₇₁ sures

- ₁₅₇₂ — chambre automatique (lien chap 5, et chap 3?)
- ₁₅₇₃ — tour eddy covariance (lien chap 5 et chap 3?)

₁₅₇₄ Bibliographie

- ₁₅₇₅ AERTS, R. et LUDWIG, F. (1997). Water-table changes and nutritional status affect
₁₅₇₆ trace gas emissions from laboratory columns of peatland soils. *Soil Biology and*
₁₅₇₇ *Biochemistry*, 29(11–12):1691–1698.
- ₁₅₇₈ ALM, J., SAARNIO, S., NYKÄNEN, H., SILVOLA, J. et MARTIKAINEN, P. (1999). Winter
₁₅₇₉ CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeo-*
₁₅₈₀ *chemistry*, 44(2):163–186.
- ₁₅₈₁ ALM, J., TALANOV, A., SAARNIO, S., SILVOLA, J., IKKONEN, E., AALTONEN, H.,
₁₅₈₂ NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1997). Reconstruction of the carbon balance
₁₅₈₃ for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland. *Oecologia*, 110:423–431.
- ₁₅₈₄ ANDREJKO, M. J., FIENE, F. et COHEN, A. D. (1983). Comparison of ashing techniques
₁₅₈₅ for determination of the inorganic content of peats. In *Testing of Peats and Organic*
₁₅₈₆ *Soils : A Symposium*, volume 820, pages 5–10. ASTM International.
- ₁₅₈₇ ARCHER, D., EBY, M., BROVKIN, V., RIDGWELL, A., CAO, L., MIKOŁAJEWICZ, U.,
₁₅₈₈ CALDEIRA, K., MATSUMOTO, K., MUNHOVEN, G., MONTENEGRO, A. et OTHERS
₁₅₈₉ (2009). Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide. *Annu. Rev. Earth Planet.*
₁₅₉₀ *Sci.*, 37(1):117.
- ₁₅₉₁ AURELA, M., RIUTTA, T., LAURILA, T., TUOVINEN, J.-P., VESALA, T., TUITTILA,
₁₅₉₂ E.-S., RINNE, J., HAAPANALA, S. et LAINE, J. (2007). CO₂ exchange of a sedge fen
₁₅₉₃ in southern Finland—the impact of a drought period. *Tellus B*, 59(5):826–837.
- ₁₅₉₄ BALLANTYNE, D. M., HRIBLJAN, J. A., PYPKER, T. G. et CHIMNER, R. A. (2014).
₁₅₉₅ Long-term water table manipulations alter peatland gaseous carbon fluxes in nor-
₁₅₉₆ thern Michigan. *Wetlands Ecol. Manage.*, 22(1):35–47.
- ₁₅₉₇ BEER, C., REICHSTEIN, M., TOMEILLERI, E., CIAIS, P., JUNG, M., CARVALHAIS, N.,
₁₅₉₈ RÖDENBECK, C., ARAIN, M. A., BALDOCCHI, D., BONAN, G. B., BONDEAU, A.,
₁₅₉₉ CESCATTI, A., LASSLOP, G., LINDROTH, A., LOMAS, M., LUSSAERT, S., MARGO-
₁₆₀₀ LIS, H., OLESON, K. W., ROUPSARD, O., VEENENDAAL, E., VIOVY, N., WILLIAMS,
₁₆₀₁ C., WOODWARD, F. I. et PAPALE, D. (2010). Terrestrial Gross Carbon Dioxide Up-
₁₆₀₂ take : Global Distribution and Covariation with Climate. *Science*, 329(5993):834–838.
- ₁₆₀₃ BELLISARIO, L. M., BUBIER, J. L., MOORE, T. R. et CHANTON, J. P. (1999). Controls
₁₆₀₄ on CH₄ emissions from a northern peatland. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(1):81–
₁₆₀₅ 91.
- ₁₆₀₆ BLODAU, C. (2002). Carbon cycling in peatlands. A review of processes and controls.
₁₆₀₇ *Environmental Reviews*, 10(2):111–134.
- ₁₆₀₈ BLODAU, C., BASILIKO, N. et MOORE, T. R. (2004). Carbon turnover in peatland
₁₆₀₉ mesocosms exposed to different water table levels. *Biogeochemistry*, 67(3):331–351.

- 1610 BOND-LAMBERTY, B. et THOMSON, A. (2010). Temperature-associated increases in
1611 the global soil respiration record. *Nature*, 464(7288):579–582.
- 1612 BORTOLUZZI, E., EPRON, D., SIEGENTHALER, A., GILBERT, D. et BUTTLER, A.
1613 (2006). Carbon balance of a European mountain bog at contrasting stages of re-
1614 generation. *New Phytol.*, 172(4):708–718.
- 1615 BUBIER, J., COSTELLO, A., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et SAVAGE, K. (1993).
1616 Microtopography and methane flux in boreal peatlands, northern Ontario, Canada.
1617 *Canadian Journal of Botany*, 71(8):1056–1063.
- 1618 BUBIER, J. L., BHATIA, G., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et LAFLEUR, P. M. (2003).
1619 Spatial and Temporal Variability in Growing-Season Net Ecosystem Carbon Dioxide
1620 Exchange at a Large Peatland in Ontario, Canada. *Ecosystems*, 6:353–367.
- 1621 BUBIER, J. L., CRILL, P. M., MOORE, T. R., SAVAGE, K. et VARNER, R. K. (1998).
1622 Seasonal patterns and controls on net ecosystem CO₂ exchange in a boreal peatland
1623 complex. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(4):703–714.
- 1624 BUBIER, J. L., MOORE, T. R., BELLISARIO, L., COMER, N. T. et CRILL, P. M. (1995).
1625 Ecological controls on methane emissions from a Northern Peatland Complex in the
1626 zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada. *Global Biogeochemical Cycles*,
1627 9(4):455–470.
- 1628 BUCKLAND, P. C. (1993). Peatland archaeology : a conservation resource on the edge
1629 of extinction. *Biodivers. Conserv.*, 2(5):513–527.
- 1630 CAI, T., FLANAGAN, L. B. et SYED, K. H. (2010). Warmer and drier conditions
1631 stimulate respiration more than photosynthesis in a boreal peatland ecosystem :
1632 Analysis of automatic chambers and eddy covariance measurements. *Plant Cell
Environ.*, 33(3):394–407.
- 1634 CHAPMAN, S., BUTTLER, A., FRANCEZ, A.-J., LAGGOUN-DÉFARGE, F., VASANDER,
1635 H., SCHLOTER, M., COMBE, J., GROSVERNIER, P., HARMS, H., EPRON, D. et
1636 OTHERS (2003). Exploitation of northern peatlands and biodiversity maintenance :
1637 a conflict between economy and ecology. *Front. Ecol. Environ.*, 1(10):525–532.
- 1638 CHRISTENSEN, J. H., HEWITSON, B., BUSUIOC, A., CHEN, A., GAO, X., HELD, R.,
1639 JONES, R., KOLLI, R. K., KWON, W. K., LAPRISE, R. et OTHERS (2007). Regional
1640 climate projections. *Clim. Change 2007 Phys. Sci. Basis Contrib. Work. Group
Fourth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Change Univ. Press Camb. Chapter 11*,
1642 pages 847–940.
- 1643 CHRISTENSEN, J. H., KANIKICHLARLA, K. K., MARSHALL, G. et TURNER, J. (2013).
1644 Climate phenomena and their relevance for future regional climate change.
- 1645 CIAIS, P., SABINE, C., BALA, G., BOPP, L., BROVKIN, V., CANADELL, J., CHHABRA,
1646 A., DEFRIES, R., GALLOWAY, J., HEIMANN, M. et OTHERS (2014). Carbon and
1647 other biogeochemical cycles. In *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis.
Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovern-
1648 mental Panel on Climate Change*, pages 465–570. Cambridge University Press.
1649

- 1650 CLYMO, R. S., TURUNEN, J. et TOLONEN, K. (1998). Carbon accumulation in peat-
1651 land. *Oikos*, pages 368–388.
- 1652 COLMER, T. D. (2003). Long-distance transport of gases in plants : a perspective on
1653 internal aeration and radial oxygen loss from roots. *Plant Cell Environ.*, 26(1):17–36.
- 1654 CROW, S. E. et WIEDER, R. K. (2005). Sources of CO₂ emission from a northern
1655 peatland : root respiration, exudation, and decomposition. *Ecology*, 86(7):1825–1834.
- 1656 DINSMORE, K. J., SKIBA, U. M., BILLETT, M. F. et REES, R. M. (2009). Effect
1657 of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms. *Plant Soil*,
1658 318(1-2):229–242.
- 1659 ESWARAN, H., VAN DEN BERG, E. et REICH, P. (1993). Organic carbon in soils of
1660 the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57(1):192–194.
- 1661 FARQUHAR, G. D., VON CAEMMERER, S. et BERRY, J. A. (1980). A biochemical model
1662 of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149(1):78–90.
- 1663 FRANCEZ, A.-J. (2000). La dynamique du carbone dans les tourbières à Sphagnum,
1664 de la sphaine à l'effet de serre. *L'Année Biologique*, 39:205–270.
- 1665 FROLKING, S., TALBOT, J., JONES, M. C., TREAT, C. C., KAUFFMAN, J. B., TUIT-
1666 TILA, E.-S. et ROULET, N. (2011). Peatlands in the Earth's 21st century climate
1667 system. *Environ. Rev.*, 19(NA):371–396.
- 1668 GIRARD, M. C., WALTER, C., REMY, J. C., BERTHELIN, J. et MOREL, J. L. (2011).
1669 *Sols et Environnement*, (2e édn), volume 28 de *Sciences Sup*. Editions Dunod : Paris,
1670 Vottem, Belgique, 2nd édition édition.
- 1671 GOGO, S., GUIMBAUD, C., LAGGOUN-DÉFARGE, F., CATOIRE, V. et ROBERT, C.
1672 (2011). In situ quantification of CH₄ bubbling events from a peat soil using a new
1673 infrared laser spectrometer. *Journal of Soils and Sediments*, 11:545–551.
- 1674 GORHAM, E. (1991). Northern Peatlands : Role in the Carbon Cycle and Probable
1675 Responses to Climatic Warming. *Ecol. Appl.*, 1(2):182–195.
- 1676 GÖRRES, C. M., KUTZBACH, L. et ELSGAARD, L. (2014). Comparative modeling of
1677 annual CO₂ flux of temperate peat soils under permanent grassland management.
1678 *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 186:64–76.
- 1679 GUIMBAUD, C., CATOIRE, V., GOGO, S., ROBERT, C., CHARTIER, M., LAGGOUN-
1680 DÉFARGE, F., GROSSEL, A., ALBÉRIC, P., POMATHIOD, L., NICOUILLAUD, B. et
1681 RICHARD, G. (2011). A portable infrared laser spectrometer for flux measurements
1682 of trace gases at the geosphere-atmosphere interface. *Measurement Science & Tech-*
1683 *nology*, 22(7):1–17.
- 1684 GUNNARSSON, U. (2005). Global patterns of Sphagnum productivity. *Journal of*
1685 *Bryology*, 27(3):269–279.
- 1686 HARRIS, D. C. (2010). Charles David Keeling and the Story of Atmospheric CO₂
1687 Measurements†. *Anal. Chem.*, 82(19):7865–7870.

- 1688 ISE, T., DUNN, A. L., WOFSY, S. C. et MOORCROFT, P. R. (2008). High sensitivity of
1689 peat decomposition to climate change through water-table feedback. *Nat. Geosci.*,
1690 1(11):763–766.
- 1691 JACOBS, C. M. J., JACOBS, A. F. G., BOSVELD, F. C., HENDRIKS, D. M. D., HENSEN,
1692 A., KROON, P. S., MOORS, E. J., NOL, L., SCHRIER-UIJL, A. et VEENENDAAL, E. M.
1693 (2007). Variability of annual CO₂ exchange from Dutch grasslands. *Biogeosciences*,
1694 4(5):803–816.
- 1695 JOABSSON, A., CHRISTENSEN, T. R. et WALLÉN, B. (1999). Vascular plant controls
1696 on methane emissions from northern peatforming wetlands. *Trends in Ecology &
1697 Evolution*, 14(10):385–388.
- 1698 JONES, M. C. et YU, Z. (2010). Rapid deglacial and early Holocene expansion of
1699 peatlands in Alaska. *PNAS*, 107(16):7347–7352.
- 1700 JOOS, F., ROTH, R., FUGLESTVEDT, J. S., PETERS, G. P., ENTING, I. G., von BLOH,
1701 BROVKIN, V., BURKE, E. J., EBY, M., EDWARDS, N. R., FRIEDRICH, T., FRÖ-
1702 LICHER, T. L., HALLORAN, P. R., HOLDEN, P. B., JONES, C., KLEINEN, T., MAC-
1703 KENZIE, F. T., MATSUMOTO, K., MEINSHAUSEN, M., PLATTNER, G.-K., REISIN-
1704 GER, A., SEGSCHNEIDER, J., SHAFFER, G., STEINACHER, M., STRASSMANN, K.,
1705 TANAKA, K., TIMMERMANN, A. et WEAVER, A. J. (2013). Carbon dioxide and
1706 climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics :
1707 a multi-model analysis. *Atmos. Chem. Phys.*, 13(5):2793–2825.
- 1708 JOOSTEN, H. et CLARKE, D. (2002). *Wise use of mires and peatlands*. International
1709 mire conservation group.
- 1710 JUNE, T., EVANS, J. R. et FARQUHAR, G. D. (2004). A simple new equation for the
1711 reversible temperature dependence of photosynthetic electron transport : a study on
1712 soybean leaf. *Funct. Plant Biol.*, 31(3):275–283. WOS :000220831200008.
- 1713 KAUFMAN, D. S., AGER, T. A., ANDERSON, N. J., ANDERSON, P. M., ANDREWS,
1714 J. T., BARTLEIN, P. J., BRUBAKER, L. B., COATS, L. L., CWYNAR, L. C., DUVALL,
1715 M. L., DYKE, A. S., EDWARDS, M. E., EISNER, W. R., GAJEWSKI, K., GEIRSDÓTT-
1716 IR, A., HU, F. S., JENNINGS, A. E., KAPLAN, M. R., KERWIN, M. W., LOZHKNIN,
1717 A. V., MACDONALD, G. M., MILLER, G. H., MOCK, C. J., OSWALD, W. W., OTTO-
1718 BLIESNER, B. L., PORINCHU, D. F., RÜHLAND, K., SMOL, J. P., STEIG, E. J. et
1719 WOLFE, B. B. (2004). Holocene thermal maximum in the western Arctic (0–180°W).
1720 *Quaternary Science Reviews*, 23(5–6):529–560.
- 1721 KETCHESON, S. J. et PRICE, J. S. (2014). Characterization of the fluxes and stores of
1722 water within newly formed Sphagnum moss cushions and their environment. *Ecohy-
1723 drology*, 7(2):771–782.
- 1724 KETTUNEN, A., KAITALA, V., ALM, J., SILVOLA, J., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN,
1725 P. J. (1996). Cross-correlation analysis of the dynamics of methane emissions from
1726 a boreal peatland. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 10(3):457–471.
- 1727 KIM, J. et VERMA, S. B. (1992). Soil surface CO₂ flux in a Minnesota peatland.
1728 *Biogeochemistry*, 18(1):37–51.

- 1729 LAI, D. (2009). Methane Dynamics in Northern Peatlands : A Review. *Pedosphere*,
1730 19(4):409–421.
- 1731 LAIHO, R. (2006). Decomposition in peatlands : Reconciling seemingly contrasting
1732 results on the impacts of lowered water levels. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8):
1733 2011–2024.
- 1734 LANDVA, A. O., KORPIJAAKKO, E. O. et PHEENEY, P. E. (1983). Geotechnical clas-
1735 sification of peats and organic soils. In *Testing of peats and organic soils*, volume
1736 820, pages 37–51.
- 1737 LAPPALAINEN, E. (1996). *Global peat resources*, volume 4. International Peat Society
1738 Jyskä.
- 1739 LELIEVELD, J. O. S., CRUTZEN, P. J. et DENTENER, F. J. (1998). Changing concentra-
1740 tion, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus B*, 50(2):128–150.
- 1741 LIVINGSTON, G. P. et HUTCHINSON, G. L. (1995). Enclosure-based measurement of
1742 trace gas exchange : applications and sources of error. *Biog. Trace Gases Meas.*
1743 *Emiss. Soil Water*, pages 14–51.
- 1744 LONG, K. D., FLANAGAN, L. B. et CAI, T. (2010). Diurnal and seasonal variation in
1745 methane emissions in a northern Canadian peatland measured by eddy covariance.
1746 *Global Change Biology*, 16(9):2420–2435.
- 1747 LUND, M., CHRISTENSEN, T. R., LINDROTH, A. et SCHUBERT, P. (2012). Effects
1748 of drought conditions on the carbon dioxide dynamics in a temperate peatland.
1749 *Environ. Res. Lett.*, 7(4):045704.
- 1750 LUO, Y. et ZHOU, X. (2006). Chapter 8 - Methods of measurements and estimations.
1751 In LUO, Y. et ZHOU, X., éditeurs : *Soil Respiration and the Environment*, pages 161
1752 – 185. Academic Press, Burlington.
- 1753 MACDONALD, G. M., BEILMAN, D. W., KREMENETSKI, K. V., SHENG, Y., SMITH,
1754 L. C. et VELICHKO, A. A. (2006). Rapid early development of circumarctic peatlands
1755 and atmospheric CH₄ and CO₂ variations. *Science*, 314(5797):285–288.
- 1756 MANNEVILLE, O. (1999). *Le monde des tourbières et des marais : France, Suisse,*
1757 *Belgique et Luxembourg*. Delachaux & Niestle.
- 1758 MOORE, T. R., BUBIER, J. L., FROLKING, S. E., LAFLEUR, P. M. et ROULET, N. T.
1759 (2002). Plant biomass and production and CO₂ exchange in an ombrotrophic bog.
1760 *Journal of Ecology*, 90(1):25–36.
- 1761 MUNIR, T. M., PERKINS, M., KAING, E. et STRACK, M. (2015). Carbon dioxide
1762 flux and net primary production of a boreal treed bog : Responses to warming and
1763 water-table-lowering simulations of climate change. *Biogeosciences*, 12(4):1091–1111.
- 1764 NATIONAL WETLANDS WORKING GROUP (1997). *The Canadian wetland classifica-*
1765 *tion system*. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 2nd edition édition.
- 1766 ORLOWSKY, B. et SENEVIRATNE, S. I. (2012). Global changes in extreme events :
1767 regional and seasonal dimension. *Clim. Change*, 110(3-4):669–696.

- 1768 PEICHL, M., ÖQUIST, M., LÖFVENIUS, M. O., ILSTEDT, U., SAGERFORS, J., GRELLE,
 1769 A., LINDROTH, A. et NILSSON, M. B. (2014). A 12-year record reveals pre-growing
 1770 season temperature and water table level threshold effects on the net carbon dioxide
 1771 exchange in a boreal fen. *Environ. Res. Lett.*, 9(5):055006.
- 1772 PELLETIER, L., MOORE, T. R., ROULET, N. T., GARNEAU, M. et BEAULIEU-AUDY,
 1773 V. (2007). Methane fluxes from three peatlands in the La Grande Riviere watershed,
 1774 James Bay lowland, Canada. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).
- 1775 POST, W. M., EMANUEL, W. R., ZINKE, P. J. et STANGENBERGER, A. G. (1982). Soil
 1776 carbon pools and world life zones. *Nature*, 298:156–159.
- 1777 PRATHER, M. J., HOLMES, C. D. et HSU, J. (2012). Reactive greenhouse gas scenarios :
 1778 Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry.
 1779 *Geophys. Res. Lett.*, 39(9):L09803.
- 1780 PUMPANEN, J., KOLARI, P., ILVESNIEMI, H., MINKKINEN, K., VESALA, T., NIINISTÖ,
 1781 S., LOHILA, A., LARMOLA, T., MORERO, M., PIHLATIE, M., JANSENS, I., YUSTE,
 1782 J. C., GRÜNZWEIG, J. M., RETH, S., SUBKE, J.-A., SAVAGE, K., KUTSCH, W., ØS-
 1783 TRENG, G., ZIEGLER, W., ANTHONI, P., LINDROTH, A. et HARI, P. (2004). Comparision of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agric. For. Meteorol.*, 123(3–4):159–176.
- 1786 RAMEAU, J.-C., MANSION, D. et DUMÉ, G. (2008). *Flore forestière française : Plaines
 1787 et collines*. Forêt privée française.
- 1788 RAMSAR, C. (1987). *Convention relative aux zones humides d'importance internationale
 1789 particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau, (Ramsar, Iran, 1971) telle
 1790 qu'amendée en 1982 et 1987.*
- 1791 ROBERT, C. (2007). Simple, stable, and compact multiple-reflection optical cell for
 1792 very long optical paths. *Appl. Opt.*, 46(22):5408.
- 1793 ROBERT, M. et SAUGIER, B. (2003). Contribution des écosystèmes continentaux à la
 1794 séquestration du carbone. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(6–7):577–595.
- 1795 RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013a). Peat and organic soil. In *The biology of Peatlands*,
 1796 pages 85–107. Oxford University Press.
- 1797 RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013b). Productivity and peat accumulation. In *The biology
 1798 of Peatlands*, pages 254–273. Oxford University Press.
- 1799 SIEGENTHALER, U. et OESCHGER, H. (1987). Biospheric CO₂ emissions during the
 1800 past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus B*, 39B(1–
 1801 2):140–154.
- 1802 SILVOLA, J., ALM, J., AHLHOLM, U., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1996).
 1803 The contribution of plant roots to CO₂ fluxes from organic soils. *Biol Fertil Soils*,
 1804 23(2):126–131.

- 1805 SMITH, L. C., MACDONALD, G. M., VELICHKO, A. A., BEILMAN, D. W., BORISOVA,
1806 O. K., FREY, K. E., KREMENETSKI, K. V. et SHENG, Y. (2004). Siberian Peatlands
1807 a Net Carbon Sink and Global Methane Source Since the Early Holocene. *Science*,
1808 303(5656):353–356.
- 1809 SONNENTAG, O., VAN DER KAMP, G., BARR, A. G. et CHEN, J. M. (2010). On the
1810 relationship between water table depth and water vapor and carbon dioxide fluxes
1811 in a minerotrophic fen. *Glob. Change Biol.*, 16(6):1762–1776.
- 1812 STRACK, M. (2008). *Peatlands and climate change*. IPS, International Peat Society,
1813 Jyväskylä, Finland.
- 1814 STRACK, M., WALLER, M. F. et WADDINGTON, J. M. (2006). Sedge succession and
1815 peatland methane dynamics : A potential feedback to climate change. *Ecosystems*,
1816 9(2):278–287.
- 1817 STRACK, M. et ZUBACK, Y. C. A. (2013). Annual carbon balance of a peatland 10 yr
1818 following restoration. *Biogeosciences*, 10(5):2885–2896.
- 1819 TREAT, C. C., BUBIER, J. L., VARNER, R. K. et CRILL, P. M. (2007). Timescale
1820 dependence of environmental and plant-mediated controls on CH₄ flux in a temperate
1821 fen. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).
- 1822 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2012). Methane fluxes from a
1823 patterned fen of the northeastern part of the La Grande river watershed, James Bay,
1824 Canada. *Biogeochemistry*, 113(1-3):409–422.
- 1825 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2014). Interannual variability in
1826 the CO₂ balance of a boreal patterned fen, James Bay, Canada. *Biogeochemistry*,
1827 118(1-3):371–387.
- 1828 TURETSKY, M. R., TREAT, C. C., WALDROP, M. P., WADDINGTON, J. M., HAR-
1829 DEN, J. W. et MCGUIRE, A. D. (2008). Short-term response of methane fluxes and
1830 methanogen activity to water table and soil warming manipulations in an Alaskan
1831 peatland. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 113(G3).
- 1832 TURUNEN, J., TOMPOPO, E., TOLONEN, K. et REINIKAINEN, A. (2002). Estimating
1833 carbon accumulation rates of undrained mires in Finland—application to boreal and
1834 subarctic regions. *The Holocene*, 12(1):69–80.
- 1835 UPDEGRAFF, K., BRIDGHAM, S. D., PASTOR, J., WEISHAMPEL, P. et HARTH, C.
1836 (2001). Response of CO₂ and CH₄ emissions from peatlands to warming and water
1837 table manipulation. *Ecol. Appl.*, 11(2):311–326.
- 1838 VIEL, E., BINET, S., GOGO, S. et LAGGOUN-DÉFARGE, F. (2015). Tree invasion
1839 controls the drainage pattern in La Guette peatland (France) : impact on the water
1840 storage capacity of the peat. *Journal of Hydrology (submitted)*.
- 1841 WADDINGTON, J. M. et ROULET, N. T. (2000). Carbon balance of a boreal patterned
1842 peatland. *Global Change Biology*, 6(1):87–97.

- 1843 WELTZIN, J. F., PASTOR, J., HARTH, C., BRIDGHAM, S. D., UPDEGRAFF, K. et CHA-
1844 PIN, C. T. (2000). Response of bog and fen plant communities to warming and
1845 water-table manipulations. *Ecology*, 81(12):3464–3478.
- 1846 WHALEN, S. (2005). Biogeochemistry of Methane Exchange between Natural Wetlands
1847 and the Atmosphere. *Environmental Engineering Science*, 22(1):73–94.
- 1848 WORRALL, F., BURT, T., ROWSON, J., WARBURTON, J. et ADAMSON, J. (2009).
1849 The multi-annual carbon budget of a peat-covered catchment. *Science of The Total
1850 Environment*, 407(13):4084–4094.
- 1851 WUEBBLES, D. J. et HAYHOE, K. (2002). Atmospheric methane and global change.
1852 *Earth-Sci. Rev.*, 57(3):177–210.
- 1853 YU, Z., BEILMAN, D. W. et JONES, M. C. (2009). Sensitivity of northern peatland car-
1854 bon dynamics to Holocene climate change. In *Carbon cycling in northern peatlands*,
1855 volume 184, pages 55–69. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Se-
1856 ries Washington, DC.
- 1857 YU, Z., LOISEL, J., BROSSEAU, D. P., BEILMAN, D. W. et HUNT, S. J. (2010). Global
1858 peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophys. Res. Lett.*, 37(13).
- 1859 ZHU, X., SONG, C., SWARZENSKI, C. M., GUO, Y., ZHANG, X. et WANG, J. (2015).
1860 Ecosystem-atmosphere exchange of CO₂ in a temperate herbaceous peatland in the
1861 Sanjiang plain of northeast China. *Ecol. Eng.*, 75:16–23.

Index

1862	A	
1863	atterrissement	11
1864	C	
1865	carbone	
1866	stock	12
1867	changements globaux	2, 14
1868	E	
1869	échange net de l'écosystème	
1870	contrôle	21
1871	P	
1872	paludification	11
1873	photosynthèse	17
1874	production primaire brute	
1875	contrôle	21
1876	R	
1877	respiration	18
1878	de l'écosystème	18
1879	contrôle	20
1880	du sol	18
1881	S	
1882	services écologiques	3
1883	T	
1884	tourbières	8–16
1885	distribution	11
1886	formation	11
1887	surface	10
1888	utilisation	14
1889	turbification	10
1890	Z	
1891	zone humide	8

1892 Annexes

₁₈₉₃ A Photos supplémentaires



(a) droséra

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

₁₈₉₄ B protocole végétation

₁₈₉₅ Le suivi non-destructif d'une végétation n'est pas triviale et nécessite la mise en
₁₈₉₆ place de protocoles particuliers en fonction du type de végétation. L'objectif est de
₁₈₉₇ pouvoir estimer une biomasse produite en impactant au minimum la végétation en
₁₈₉₈ place. Pour l'ensemble des espèces végétales présentes dans les embases servant à la
₁₈₉₉ mesure des flux un recouvrement à été estimé, à l'œil.

₁₉₀₀ **La strate arbustive**

₁₉₀₁ Pour la strate arbustive des mesures de hauteur moyenne ont été effectuées, en
₁₉₀₂ mesurant depuis le niveau du sol, ou le toit des sphaignes, si elles étaient présentes,
₁₉₀₃ jusqu'au sommet de l'individu.

₁₉₀₄ **La strate herbacée**

₁₉₀₅ Pour la strate herbacée, en 2013, 5 individus des deux espèces majoritaires (*Eriophorum vaginatum* ? *augustifolium* ?, *Molinia Caerulea*) ont été marqués afin de pourvoir
₁₉₀₆ les mesurer plusieurs fois au cours de la saison. Cependant les difficultés à retrouver
₁₉₀₇ les individus marqués couplés à la mort d'un nombre important d'entre eux n'ont pas
₁₉₀₈ permis d'acquérir de résultats significatifs. En conséquence en 2014 ces deux espèces
₁₉₀₉ ont fait l'objet de comptage exhaustif et de mesure de hauteur moyenne.

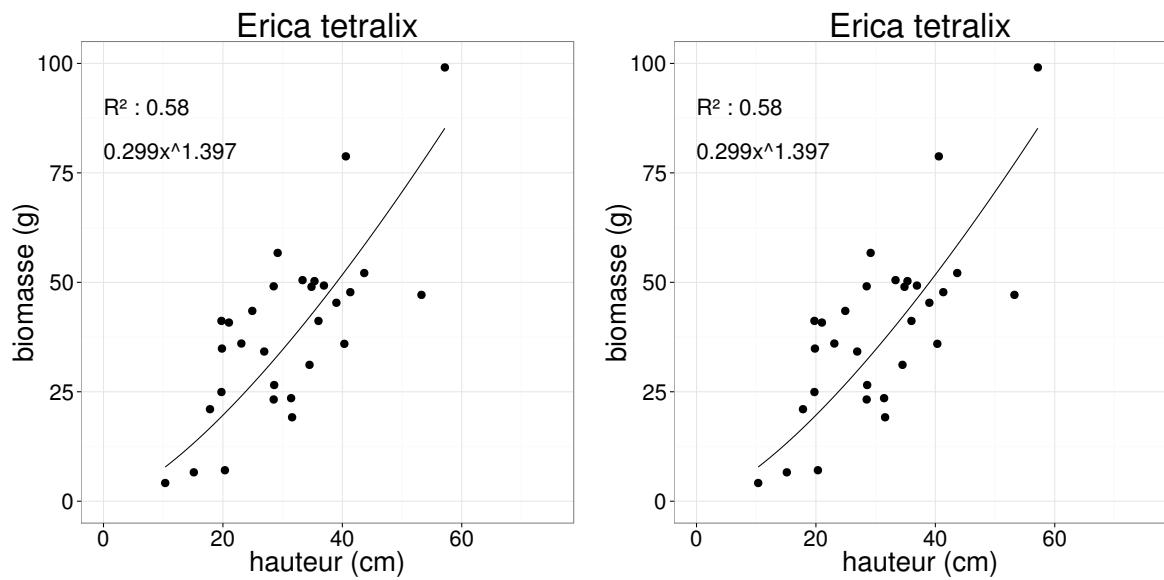
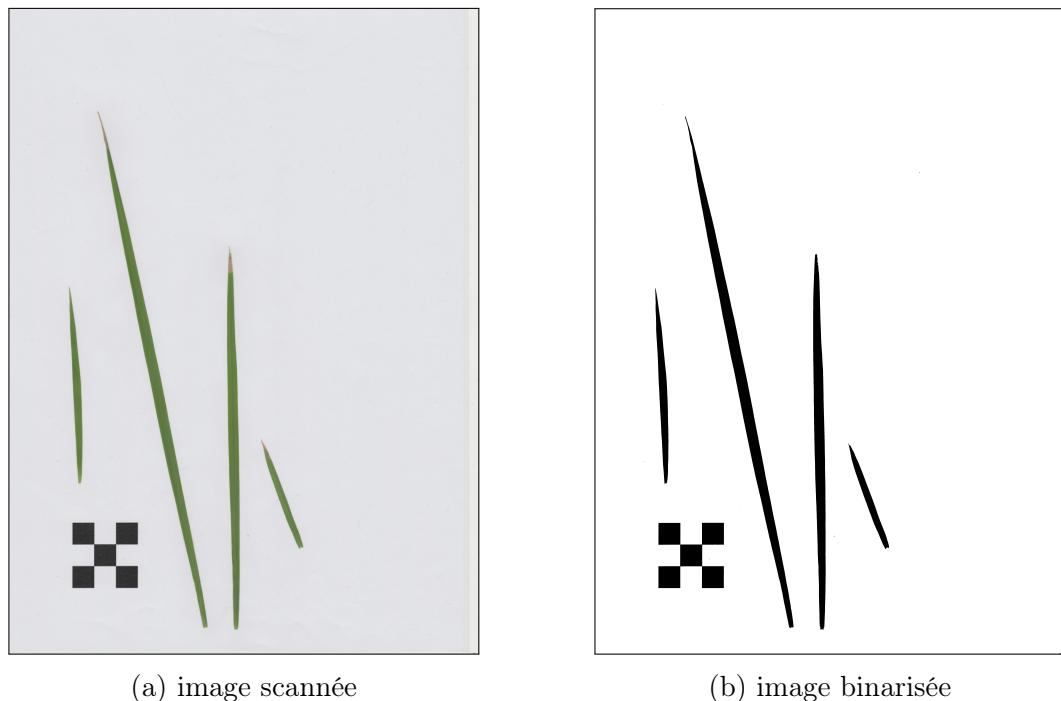


FIGURE 2 – Calibration de la biomasse en fonction de la hauteur



(a) image scannée

(b) image binarisée

FIGURE 3 – Scanne des feuilles

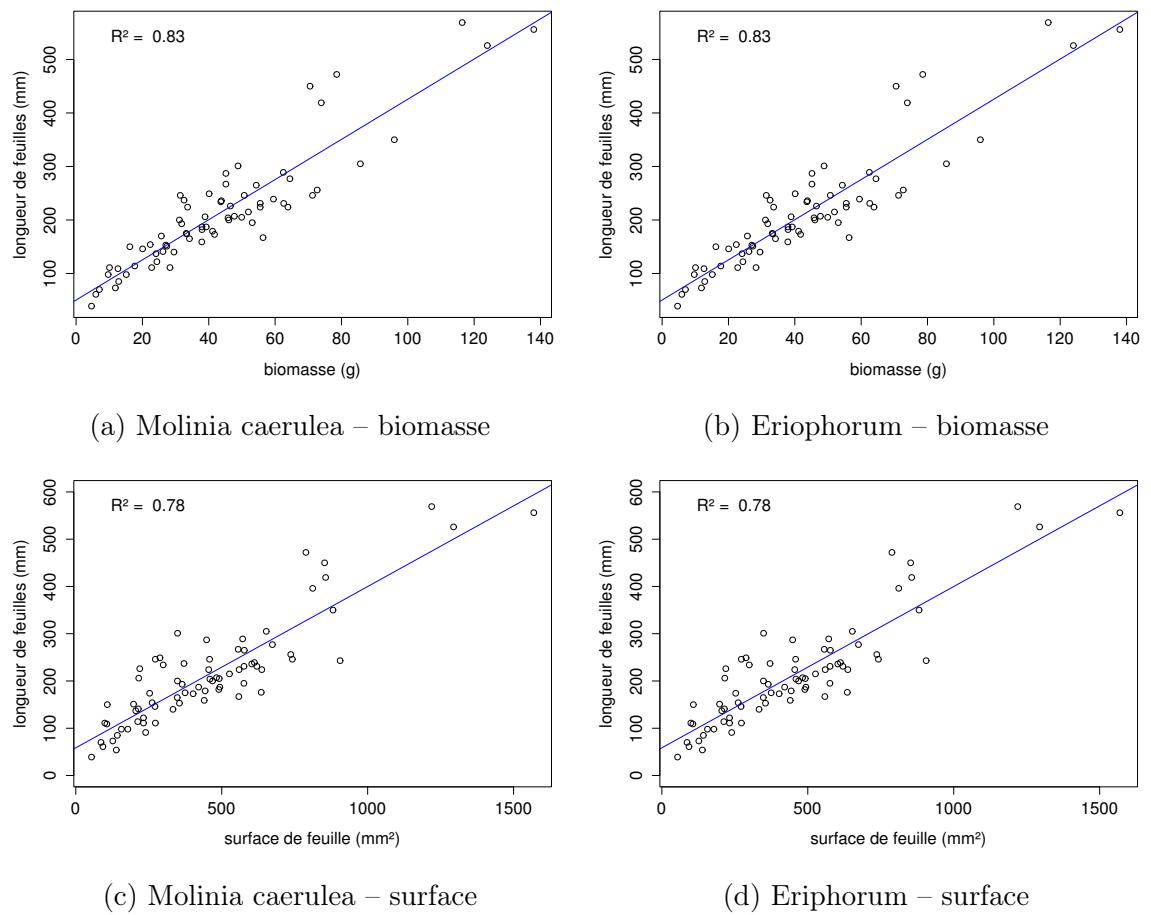


FIGURE 4 – Calibration de la biomasse herbacées pour *Molinia Caerulea* (a), pour *Eriophorum* (b) et de la surface de feuille pour *Molinia Caerulea* (c), pour *Eriophorum* (d) en fonction de la hauteur

₁₉₁₁ C CARBIODIV

₁₉₁₂ 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, ...