

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, ISTO, 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	13
1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants	15
1.2.1 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières	15
1.2.2 Les facteurs majeurs contrôlant les flux	18
1.2.3 Bilans de carbone	22
2 Sites d'études et méthodologies employées	25
2.1 Présentation de la tourbière de La Guette	26
2.2 Autres sites du service national d'observation	31
2.3 Mesures de flux	32
2.3.1 Présentation des méthodologies possibles	32
2.3.2 Les mesures de CO ₂	33
2.3.3 Les mesures de CH ₄	35
2.3.4 Le calcul des flux	36
2.4 Facteurs contrôlants	37
2.4.1 acquisitions automatisées	37
3 Bilan de C de la tourbière de La Guette	39
3.1 Introduction	40
3.2 Procédure expérimentale et analytique	40
3.2.1 Méthodes de mesure	40
3.2.2 Modélisation du bilan de C	42
3.3 Résultats	46
3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la tourbière de La Guette	46
3.3.2 Sélection des modèles	52
3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle de l'écosystème	59

3.3.4	Variabilité spatiale du bilan	66
3.4	Discussion	68
3.4.1	Estimations des flux	68
3.4.2	Estimations des bilans	71
3.4.3	Sensibilité et limitations du bilan	71
3.4.4	Représentativité locale du modèle	72
3.4.5	Variation du bilan avec la végétation	72
3.4.6	perspectives	73
4	Effets de l'hydrologie sur les flux de GES	75
4.1	Introduction	76
4.2	Procédure expérimentale	77
4.2.1	Expérimentation A	78
4.2.2	Expérimentation B	78
4.2.3	traitement	79
4.3	Résultats	80
4.3.1	Expérimentation A	80
4.3.2	Expérimentation B	83
4.3.3	tendances générales	86
4.4	Discussion	86
4.4.1	Comparaison aux mesures <i>in-situ</i>	86
4.4.2	Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de gaz	88
4.4.3	Effet cycles multiples	89
5	Variation journalière de la respiration de l'écosystème (article)	91
5.1	Introduction	93
5.2	Procédure expérimentale et analytique	93
5.2.1	Synchronisation des données	93
5.2.2	Différence entre mesures de jour et mesures de nuit	93
5.2.3	Caractérisation physico-chimique	93
5.3	Résultats	93
5.3.1	Température de l'air et variabilité de RE	93
5.3.2	Synchronisation RE et température du sol	93
5.3.3	Équations utilisées	93
5.3.4	Relation entre RE et la température	93
5.3.5	Évolution du Q10	93
5.3.6	Différence entre mesures de jour et de nuit	93
5.3.7	Caractérisation de la tourbe	93
5.4	Discussion	93
5.4.1	Différence de RE entre les différents sites	93
5.4.2	Temps de latence entre température et RE	93
5.4.3	La synchronisation entre RE et la température améliore la représentation de la sensibilité de RE à la température	93
5.4.4	Différence entre mesure de RE faite le jour et la nuit	93
5.4.5	La sensibilité du Q10 à la profondeur de la température et à la synchronisation	93

Conclusions et perspectives	95
5.5 Bilan du bilan (de C) ?	96
5.6 Résilience de la tourbe par rapport aux 2 années sèches qui précèdent le BdC	96
5.7 Ouverture vers d'autre méthodes de mesures	96
Références bibliographiques	102
Index	103
Annexes	105
A Photos supplémentaires	106
B protocole végétation	106
C CARBIODIV	109
D package m70r	109

Liste des figures

1.1	Global distribution of peatlands	11
1.2	Changement de température et de précipitation moyenne à l'horizon 2100 pour 2 scénarios du GIEC (RCP2.6 et RCP 8.5)	16
2.1	Site d'études SNO	26
2.2	Carte de la tourbière de La Guette	27
2.3	Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure.	29
2.4	Évolution du niveau de la pluviométrie, en mm, des années 2011 à 2014	30
2.5	Évolution du niveau de la nappe, en cm par rapport à la surface, des années 2011 à 2014	30
2.6	Évolution de la température de l'air (en °C) des années 2011 à 2014 . .	31
2.7	Mesures de CO ₂	34
2.8	SPIRIT	35
3.1	Répartition des 20 placettes de mesures suivant un échantillonnage aléatoire stratifié.	41
3.2	Partitionnement des placettes en fonction de leur similarité en termes de composition végétale (pourcentage des strates muscinales, herbacées et arbustives)	45
3.3	Évolution du niveau de la nappe moyen des 20 embases mesuré pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	46
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	47
3.5	Évolution de la conductivité pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	47
3.6	Évolution du pH pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	48
3.7	Évolution de la concentration en carbone organique dissous dans l'eau du sol pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	48
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.	49
3.9	Évolution des flux de méthane moyen (N ?) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	51
3.10	Relations entre les flux de gaz et une sélection de facteurs contrôlant .	51
3.11	PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.1	53
3.12	PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.3	55
3.13	RE modèles avec Tair	57
3.14	RE modèles avec Tair	58
3.15	CH4 modèle H	59
3.16	Flux de CO ₂ interpolé à partir de PPB-1 et PPB-2	61
3.17	Flux de CO ₂ interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3	62

3.18 Flux de CO ₂ interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3	62
3.19 Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres des modèles RE-1 et RE-3	65
3.20 Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2	66
3.21 Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2	67
 4.1 Prélèvement des mésocosmes	79
4.2 Schéma d'un mésocosme	80
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.	81
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.	84
4.5 Relations entre les flux de GES et le niveau de la nappe	87
 1 Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure.	106
2 Calibration de la biomasse en fonction de la hauteur	107
3 Scanne des feuilles	107
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	108

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).	14
1.3	Vitesse apparente d'accumulation du carbon à long terme en $\text{gC m}^{-2} \text{s}^{-1}$	23
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.	60
3.2	Bilan des flux en gCm2an1	63
3.3	Bilan des flux en gCm2an1	63
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.	64
3.5	Bilan des flux de CO ₂ en gCm2an1, en utilisant PPB-2 et RE-3	67
4.1	Récapitulatif des mesures pour les deux expérimentations	79

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	13
⁹¹	1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants	15
⁹²	1.2.1 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières	15
⁹³	1.2.2 Les facteurs majeurs contrôlant les flux	18
⁹⁴	1.2.3 Bilans de carbone	22
⁹⁵		
⁹⁶		
⁹⁷		

1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

98 Dans ce chapitre, nous commenceront par donner une vue de ce que sont les tour-
99 bières : Que sont-elles ? Depuis quand sont-elles étudiées ? Pourquoi les a-t-on étudiés ?
100 Nous continuerons en entrant plus en détails sur leur fonctionnement vis à vis des flux
101 de carbone. Enfin nous verrons quels sont les facteurs contrôlant majeurs de ces flux.

1.1 Les tourbières et le cycle du carbone

1.1.1 Zones humides et tourbières : définitions et terminologies

Définitions

105 Les tourbières font partie d'un ensemble d'écosystèmes plus large que l'on appelle
106 les zones humides. Ces zones humides ne sont ni des écosystèmes terrestres au sens
107 strict, ni des écosystèmes aquatiques. Elles sont à la frontière entre les deux et sont
108 caractérisées par un niveau de nappe élevé, proche de la surface du sol, voire au dessus.
109 L'omniprésence de l'eau joue fortement sur l'aération du milieu et constraint, de façon
110 plus ou moins importante, l'accès à l'oxygène. Elles ont été définie en 1971, lors de la
111 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 éten-
dues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six
mètres.»

(Ramsar, 1987)

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

¹¹⁵ niveau de nappe élevé et zone anaérobie importante, entraînent le développement d'une
¹¹⁶ végétation spécifique, qui s'est adaptée aux milieux fortement humides ou inondés.

¹¹⁷ Les tourbières représentent 50 à 70 % des zones humides [Joosten et Clarke \(2002\)](#).

¹¹⁸ Leur définition est variable selon les régions ((**Réf needed**), exple). Deux définitions
¹¹⁹ sont régulièrement utilisées :

TOURBIÈRE :

¹²⁰ Écosystèmes, avec ou sans végétation, possédant au moins 30 cm de tourbe
naturellement accumulée.

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

¹²¹ Cette première définition correspond au *peatland* anglo-saxon. L'épaisseur de tourbe
¹²² accolée à cette définition peut varier selon le pays, elle est par exemple établie à 40 cm
¹²³ au Canada ([National Wetlands Working Group, 1997](#))

TOURBIÈRE ACTIVE :

¹²⁴ Écosystèmes dans lesquels un processus de tourbification est actif.

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

¹²⁵ Cette seconde définition correspond au *mire* anglo-saxon et peut être traduite en fran-
¹²⁶çais par le terme de tourbière active. Les concepts derrières ces deux définitions se
¹²⁷ chevauchent mais ne sont pas complètement similaires : une tourbière drainée peut
¹²⁸ avoir plus de 30 cm de tourbe et ne plus former de tourbe, ne plus être active. À l'in-
¹²⁹verse il peut exister des zones où l'épaisseur de tourbe est inférieure à 30 cm malgré
¹³⁰ un processus de tourbification actif. Un même écosystème tourbeux pouvant d'ailleurs
¹³¹ avoir à la fois des zones correspondant à la première définition et d'autres à la seconde.
¹³² Les tourbières sont donc, selon la définition utilisée, des écosystèmes contenant ou des
¹³³ écosystèmes formant de la tourbe. Mais qu'est ce que la tourbe ?

TOURBE :

¹³⁴ «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

135 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.
136 D'autres définitions existent, faisant la distinction entre sols organiques et tourbes avec
137 un seuil à 75 % ([Andrejko *et al.*, 1983](#)) ou 80 % ([Landva *et al.*, 1983](#)). Il est également
138 nécessaire de préciser que, au delà de la classification utilisée, ce que les écologues
139 considèrent comme de la tourbe contient généralement 80 % de matières organiques au
140 minimum ([Rydin et Jeglum, 2013a](#)). Ce processus de formation est appelé la tourbifica-
141 tion ou turfogénèse et les matières organiques accumulées proviennent majoritairement
142 de la végétation. On définit les matières organiques de la façon suivante :
143

MATIÈRES ORGANIQUES :

Matières composées des éléments C, H, O, N, S et présentant des 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'autres.

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

154 La formation des tourbières

155 L'atterrissement et la paludification sont les deux processus principaux permettant
156 la formation des tourbières. Il s'agit pour le premier du comblement progressif d'une
157 zone d'eau stagnante. La paludification est la formation de tourbe directement sur un
158 sol minéral, grâce à des conditions d'humidité importante. Ces modes de formation ne

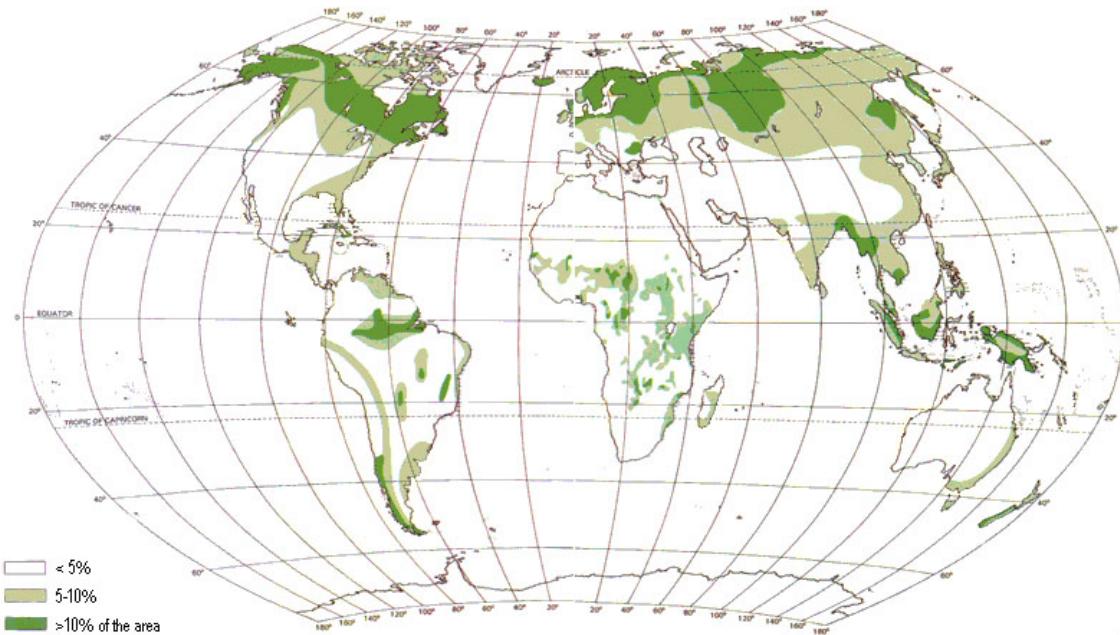


FIGURE 1.1 – Global distribution of peatlands

¹⁵⁹ sont pas exclusif, une tourbière pouvant se développer, selon les endroits considérés ou
¹⁶⁰ le temps, via des processus différents.

¹⁶¹ Classifications

¹⁶² Différentes classifications sont utilisées pour différencier ces écosystèmes. La plus
¹⁶³ générale et la plus utilisée dans la littérature distingue les tourbières dite haute, ou de
¹⁶⁴ haut marais, correspondant au *bog* anglais, et les tourbières basse, ou de bas marais,
¹⁶⁵ correspondant au *fen* anglais.

¹⁶⁶ Les tourbières de haut-marais ont généralement une épaisseur de tourbe supérieure
¹⁶⁷ à 30 cm et sont alimenté principalement alimentée par les précipitations : elles sont
¹⁶⁸ dites ombrotrophes. Leur surface parfois bombée (tourbières élevées ou bombées) peut
¹⁶⁹ également être plate ou en pente. Cette géométrie situe une partie au moins de l'éco-
¹⁷⁰ système au dessus du niveau de la nappe. Elles ont une concentration en nutriments
¹⁷¹ relativement faible : elles sont oligotrophes et sont fortement acide avec des eaux de
¹⁷² surface dont le pH est autour de 4 voire moins.

¹⁷³ Les tourbière de bas-marais ont une épaisseur généralement supérieure à 30 cm avec
¹⁷⁴ un niveau de nappe très proche de la surface du sol. De forme concave ou en pente elles

1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

175 sont généralement alimentée en eaux par des sources ou par ruissellement et sont donc
176 dites minerotrophes. Le pH de leur eaux de surface varient de 4 à 8. Les végétations
177 dominantes de ces écosystèmes peuvent être des bryophytes, des graminées ou des
178 arbustes bas.

179 1.1.2 Tourbières et fonctions environnementales

180 Biodiversité dans les tourbières

181 Les tourbières sont le siège d'une biodiversité importante et spécifique. Ainsi les
182 Sphaignes, qui sont des bryophytes, (des mousses) sont caractéristiques des écosystèmes
183 tourbeux. Ce sont des espèces dites ingénieries, capable de modifier l'environnement
184 dans lequel elles vivent afin de l'adapter à leurs besoins. Les sphaignes sont ainsi capable
185 d'abaisser le pH, de capter des nutriments et de les séquestrer et ce même quand
186 elles n'en ont pas besoin afin d'empêcher d'autres espèces notamment vasculaire d'en
187 profiter. Plus précisément, le fait que les sphaignes captent les nutriments via leur
188 capitulum leur permet de les intercepter avant qu'ils ne soient captés par d'éventuelles
189 racines positionnées plus bas. Les sphaignes, comme de nombreuse mousses ont des
190 litières relativement récalcitrantes³.

191 Qualité des eaux

192 Puits de carbone

193 Par définition les tourbières stockent ou ont stocké du carbone. C'est cette fonction
194 de puits de carbone qui rend l'importance de ces écosystèmes non négligeable malgré
195 la faible surface qu'ils représentent. Les estimations du stock de carbone présent dans
196 les tourbières tempérées/boréales sont comprises entre 270 et 455 Gt C ([Gorham, 1991](#);
197 [Turunen *et al.*, 2002](#)). Les différences entre les estimations sont liées aux incertitudes
198 de cartographie citées précédemment auxquelles s'ajoutent des incertitudes concernant
199 l'épaisseur et la densité moyenne de la tourbe. Le carbone stocké dans les tourbières

3. 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	

200 représente 10 à 25 % du carbone présent dans les sols et entre 30 et 60 % du stock de
 201 carbone atmosphérique.

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

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

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

217 1.1.3 Les tourbières et les changements globaux

218 On définit les changements globaux comme l'ensemble des modifications environne-
 219 mentales plus ou moins rapides, ayant lieu à l'échelle mondiale, quelle que soit leur ori-
 220 gine. Les deux contraintes développées dans cette partie sont la pressions de l'homme :

1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

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

²²¹ contrainte anthropique, et celle du climat : contrainte climatique.

²²² Contrainte anthropique

²²³ L'interaction entre les Hommes et les zones humides au sens large et les tourbières

²²⁴ en particulier remonte probablement à l'aube de l'humanité. De grandes découvertes

²²⁵ archéologiques ont été faites dans ces écosystèmes témoins d'époques révolues. Des

²²⁶ chemins de rondins néolithique aux crannogs de l'époque romaine ([Buckland, 1993](#)).

²²⁷ L'utilisation de la tourbe et des tourbières a du commencer relativement tôt, mais c'est

²²⁸ à partir du 17^e siècle que le drainage de ces écosystèmes, pour les convertir en terres

²²⁹ agricoles, s'est intensifié. Au 19^e siècle, l'apparition de machines permettant une ré-

²³⁰ colte industrialisée de la tourbe, a développé son utilisation comme combustible. Enfin

²³¹ depuis le milieu du 20^e une part importante de ces écosystèmes ont été drainé pour

²³² développer la sylviculture. Aujourd'hui l'exploitation principale de la tourbe est liée à

²³³ son utilisation comme substrat horticole ([Lappalainen, 1996; Chapman et al., 2003](#)).

²³⁴ Suite à ces perturbations, la surface de tourbières altérée est estimée à 500 000 km² en-

²³⁵ viron, principalement du fait de leur reconversion pour l'agriculture et la sylviculture

²³⁶ ([Tableau 1.2](#)). En France, suite à leur utilisation, principalement agricole, la surface

²³⁷ des tourbières a été par deux entre 1945 et 1998, passant de 1200 km² à 600 km² ([Lap-](#)

²³⁸ [palainen, 1996; Manneville, 1999](#)).

²³⁹ Ces écosystèmes ont donc été et sont encore perturbés par différentes activités

²⁴⁰ humaines.

241 Contrainte climatique

242 L'impact anthropique direct n'est pas la seule perturbation auxquelles sont soumises
243 les tourbières. D'après les modèles de prédictions du GIEC, les tourbières, comme de
244 nombreux autres écosystèmes, vont subir un changement climatique important dans les
245 années à venir. Toujours d'après le GIEC, les changements les plus rapides que ce soit
246 en terme de précipitations ou de température sont à attendre dans les zones boréales
247 là où se situent la majorité des tourbières. De ce constat découle un certain nombre
248 de questions concernant ces écosystèmes. D'abord quel effet auront les changements
249 climatiques et avec quelle variabilité régionale ? Cette question n'est pas évidente (pa-
250 radoxe du sol plus froid ? augmentation photosynthèse) Quelle sera la sensibilité des
251 tourbières ? Là encore leur diversité, leur répartition géographique rend difficile la ré-
252 ponse à cette question. Enfin découlant des précédentes, qu'elle est le devenir de la
253 fonction puits de carbone.

254 Toutes ces perturbations posent notamment la question de la pérennité de la fonc-
255 tion puit de carbone de ces écosystèmes.

256 1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs
257 contrôlants

258 1.2.1 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières

259 Les flux gazeux entrants

260 Le carbone est principalement présent dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de
261 carbone (CO_2) et de méthane (CH_4). Comparé au CO_2 , le CH_4 est un GES qui est bien
262 moins présent dans l'atmosphère (CHIFFRES!). Cependant son "pouvoir de réchauf-
263 fement" est bien plus important (effet radiatif $\text{CO}_2 \times 100$) (CHIFFRES!) (D'abord la
264 vapeur d'eau, ensuite le CO_2 et enfin le CH_4) Il est usuellement convenu (???? ref)

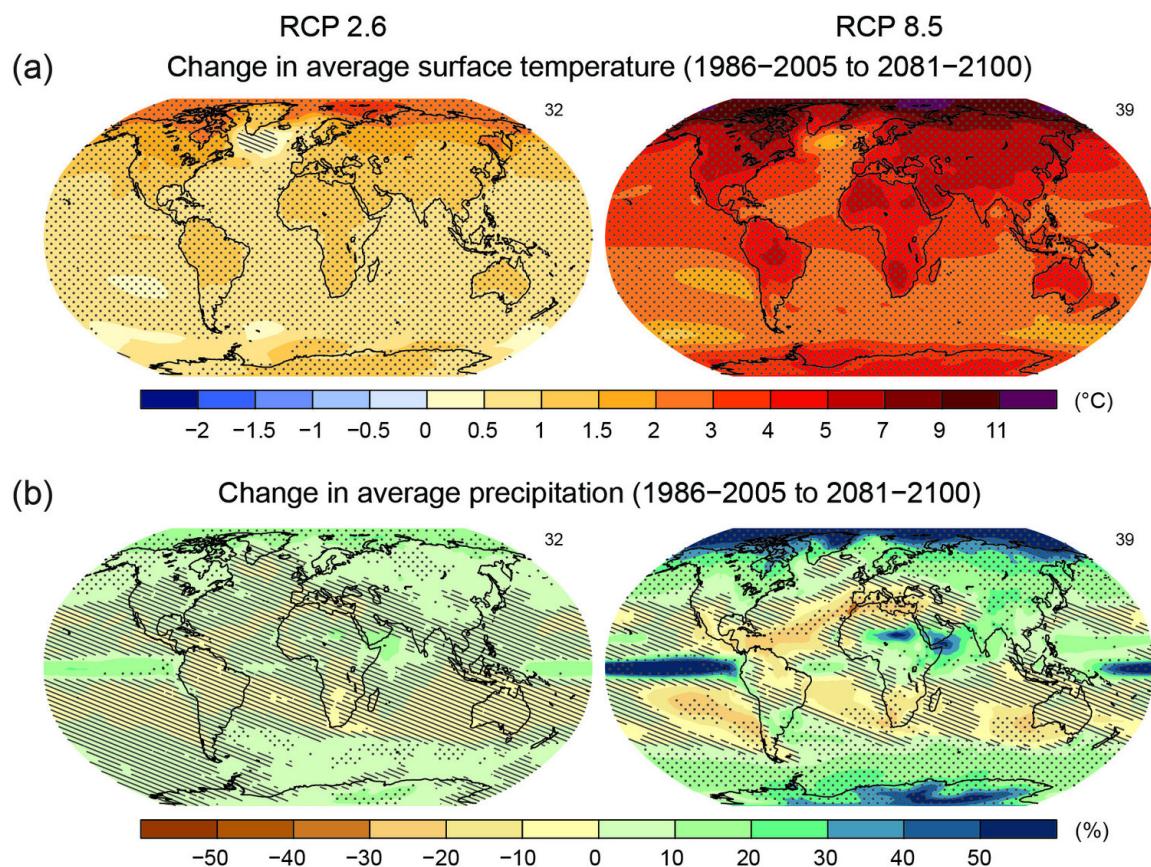


FIGURE 1.2 – Changement de température et de précipitation moyenne à l'horizon 2100 pour 2 scénarios du GIEC (RCP2.6 et RCP 8.5)

que dans une tourbière le méthane représente environ 5 % du bilan de C. **Devenir du méthane atm** Le transfert du CO₂ atmosphérique vers la biosphère (de l'atmosphère à la tourbe) est principalement (**Réf needed**) liée à la photosynthèse. La photosynthèse est la réaction photochimique permettant l'assimilation du CO₂ par les végétaux chlorophylliens. **dans le but de ?.**

270 Détails ?

Si la photosynthèse est un processus majeur d'assimilation du CO₂, il existe d'autres voies métaboliques permettant la capture du CO₂ de l'atmosphère. Ainsi les micro-organismes chemolithotrophes (**expliquer**) sont capables d'assimiler le CO₂ en utilisant l'énergie issue de l'oxydation de composés inorganiques.

Les voies métaboliques permettant l'assimilation du CO₂ sont plutôt bien connues (farquhar) et le fait que les substrats de départ de varient pas (sur ?) a permis une compréhension relativement fine du processus. Cependant une fois assimilé par la végétation le devenir du carbone est moins direct.

279 Les flux gazeux sortants

Dans les tourbières le CO₂ est produit par des sources multiples. Ces sources sont la respiration des de la flore qu'elle soit aérienne ou souterraine et la respiration microbienne. Une autre source de CO₂ est l'oxydation du CH₄ lors de sa migration des zones anoxiques aux zones oxiques de la colonne de tourbe. Enfin dans les zones anaérobies, le CO₂ peut être produit par fermentation (respiration anaérobie). La production de CO₂ est donc un signal intégré sur l'ensemble de la colonne de tourbe. C'est cette multitude de processus qui rend l'estimation de ce flux difficile, en effet chacune des respirations n'aura pas la même sensibilité vis à vis de facteurs contrôlant. La respiration de l'écosystème (RE) est définie comme l'ensemble des respirations de la colonne de tourbe, en incluant à la fois sa partie aérienne et sa partie souterraine. La respiration du sol (SR) est elle définie comme l'ensemble des respirations de la colonne de tourbe, en excluant la partie aérienne. La respiration du sol comprend donc principalement les respirations issues de la rhizosphère et des communautés de micro-organisme.

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

293 Les tourbières sont des écosystèmes dont la production primaire est estimée à en-
294 viron 500 gC m^{-2} Francez (2000).

295 La strate muscinale pouvant jouer/participer/produire jusqu'à 80 % de la produc-
296 tion primaire Francez (2000). Cette production primaire n'est pas particulière élevée
297 (**Réf needed**) et c'est en fait la faible décomposition des matières organiques qui per-
298 met aux tourbières de stocker du carbone. L'accumulation moyenne estimée dans les
299 tourbières boréales est de 30 gC m^{-2} . Le taux d'accumulation varie en fonction des
300 espèces végétales présentes ((**Réf needed**)), le niveau d'eau ((**Réf needed**)), ... (??)

301 storage ?

302 Le carbone assimilé par photosynthèse, utilisé par la plante puis évacué que se soit
303 sous forme d'exudats racinaire ou de matériels morts, de litière, va en partie se dégrader.
304 Continum de dégradation avec des matières organiques de plus en plus récalcitrantes
305 avec la profondeur.

306 La vitesse de stockage au cours du temps ?

307 L'accumulation de matières organiques et donc de carbone dans les tourbières est
308 donc fonction de la prépondérance relative de ces flux entre l'écosystème et l'atmo-
309 sphère.

310 1.2.2 Les facteurs majeurs contrôlant les flux

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

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

319 Deuxième facteur contrôlant majeur : l'hydrologie. L'eau joue un rôle indispensable

320 à la formation et au maintient de ces écosystèmes. Le niveau de la nappe, que le
 321 défini ici comme la distance entre la surface topographique de l'écosystème et le toit
 322 de l'aquifère/l'eau libre/la zone saturée. Ce niveau sépare la colonne de tourbe en une
 323 zone oxique, où il y a présence d'oxygène, et une zone anoxique dans laquelle l'oxygène
 324 est absent. Cette différence va influer sur la production du CO₂ et du CH₄. La zone
 325 anoxique permet aux organismes anaérobies de se développer, notamment les Archaea⁴
 326 méthanogènes. L'activité de ces organismes est la plus importante juste sous la surface
 327 de l'eau, là où ils trouvent, en plus de l'anoxie, des matières organiques de qualité
 328 (faiblement décomposées). La zone aérobie permet la respiration aérobie (**aérobie vs**
 329 **oxique**) des micro-organismes, des racines et de la faune. C'est donc dans cette zone
 330 qu'est produit la majorité du CO₂. Lors de son transport de la zone anoxique vers la
 331 surface, le CH₄ passe par la zone oxique et y est en partie oxydé en CO₂. (organismes
 332 méthanotrophes) Le niveau de la nappe constraint également le teneur en eau du sol et
 333 la hauteur de la frange capillaire (Laiho2006). Ce point a son importance notamment
 334 pour la végétation.

335 La végétation est également un facteur important concernant les flux de gaz liés aux
 336 tourbières. D'abord car elle exerce une influence directe sur les flux, avec d'un côté la
 337 photosynthèse et la respiration. La photosynthèse est le seul processus⁵ permettant le
 338 piégeage du carbone présent dans l'atmosphère. Le potentiel de végétation pouvant être
 339 différent selon la plante considérée (Moore2002), la composition des communautés végé-
 340 tales influe donc la quantité de carbone potentiellement assimilable par l'écosystème.
 341 La respiration des plantes que ce soit via leurs parties aériennes ou souterraines (les ra-
 342 cines) va permettre de libérer du CO₂. (**Estimation chiffres ?**) La végétation fournit
 343 également via ses litières, des matières organiques fraîches pour les micro-organismes.
 344 Mais la végétation peut également stimuler la respiration des micro-organismes pré-
 345 sent dans la rhizosphère⁶ via la libération d'exsudats racinaires (Moore2002). Enfin un
 346 effet indirect lié à l'adaptation de certaines plantes vasculaire aux conditions saturée

4. micro-organismes unicellulaires procaryotes

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

6. zone du sol impacté par les racines

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

347 en eau et anoxique. En effet certaines plantes présentes dans ces milieux humides ont
348 développées un Aerenchyme, un espace intercellulaire agrandi permettant le transport
349 d'oxygène des parties aériennes de la plantes aux parties submergées. Le transport peut
350 également se faire dans l'autre sens et permettant par exemple le transport du CO₂ ou
351 du CH₄ dans l'atmosphère. Ce passage au travers de la plante permet également au
352 CH₄ d'éviter d'être oxydé avant d'atteindre l'atmosphère.

353 D'autres facteurs à évoquer ?

354 Facteurs contrôlant la respiration de l'écosystème

355 Updegraf2001

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

358 Cai2010

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

363 Stratck2006

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

366 Ballantyne2014

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

372 Facteurs contrôlant la production primaire brute

373 Si la diversité des réactions est moindre pour la photosynthèse, sa réponse aux va-
374 riabiles environnementales à l'échelle de l'écosystème n'en est pas moins difficile à prédire.
375 Comme pour la respiration, l'augmentation de la température augmente la vitesse de
376 réaction (Cai2010). (**Réf needed**) L'effet d'une variation du niveau de la nappe est
377 cependant moins évidente. La baisse du niveau de la nappe peut à la fois induire une
378 augmentation de la PBB, notamment quand elle favorise la végétation vasculaire (Bal-
379 lantyne2014). Mais elle peut également la diminuer, lorsqu'elle induit un stress hydrique
380 important (Strack & Zuback 2013, Peichl 2014, Alm1999, Griffis2000, Weltzin2000)

381 Facteurs contrôlant l'ENE

382 On défini l'Échange Net de l'Écosystème (ENE) comme la différence entre la Pho-
383 tosynthèse Primaire Brute (PPB) et la Respiration de l'écosystème (RE). Les facteurs
384 contrôlants l'ENE sont donc les mêmes que ceux qui contrôlent ces 2 flux. Cependant
385 l'effet d'un même facteur de contrôle peut être différent vis à vis de PPB et de RE
386 selon le contexte environnemental, que ce soit par rapport à la nature de l'effet ou son
387 importance. Ainsi une variation de l'ENE peut parfois est contrôlé majoritairement
388 soit par la PPB soit par la RE soit par les deux. Par exemple, une baisse du niveau
389 de la nappe est souvent liée dans la littérature à une baisse de l'ENE. Cependant
390 certains attribuent cette baisse à une augmentation de la Respiration (Aurela2013,
391 Ballantyne2014, Alm1999, Ise2008, Oechel1993) quand d'autres l'attribue à une dimi-
392 nution de la photosynthèse Sonnentag2010, Peicl2014. Enfin certain voient un effet à
393 la fois de l'augmentation de la respiration et de la diminution de la photosynthèse
394 (StrackZuback2013)

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

399 Également un article de Ballantyne2014 qui lui ne note pas d'effet d'une baisse du

400 niveau de la nappe sur l'ENE car l'augmentation de la respiration est compensée par
401 une augmentation de la photosynthèse.

402 Facteurs contrôlant les flux de méthane

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

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

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

413 1.2.3 Bilans de carbone

414 Le calcul d'un bilan de carbone à l'échelle d'un écosystème permet de détermi-
415 ner si l'équilibre (où le déséquilibre) des flux tend à stocker du carbone, le système
416 fonctionnant alors comme un puits, ou à libérer du carbone, le système fonctionnant
417 alors comme une source. Il existe différentes façons de réaliser le bilan de carbone d'une
418 tourbière que l'on peut séparer en deux approches principales. La première approche
419 consiste à utiliser l'archive tourbeuse pour estimer des vitesses d'accumulation de la
420 tourbe. Cette méthode permet d'étudier la fonction puits sur des temps longs (derniers
421 millénaires) et de lier d'éventuels changements dans les vitesses d'accumulation à des
422 facteurs environnementaux. La seconde approche se base davantage sur des mesures
423 actuelles des différents flux afin d'étudier, sur des temps forcément plus courts, l'évolu-
424 tion de la prépondérance puits/source d'un écosystème. Les deux approches sont donc
425 complémentaires.

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

⁴²⁶ **passé**

⁴²⁷ long-term apparent rate of carbon accumulation (LORCA) datations + dry bulk
⁴²⁸ density + carbon content (Tableau 1.3)

⁴²⁹ **tableau LORCA ajouter colonne contexte (exple : 7 tourbières ombro-**
⁴³⁰ **trophes)**

⁴³¹ **présent**

⁴³² Dans cette approche on estime les flux actuels de carbone entrant et sortant de
⁴³³ l’écosystème afin de déterminer un bilan. Un certain nombre de flux de carbone sont
⁴³⁴ présent au sein des écosystèmes terrestre (équation (1.1))

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

- ⁴³⁵ — ENE : Échange Net de l’Écosystème
- ⁴³⁶ — PPB : Production Primaire Brute
- ⁴³⁷ — Re : Respiration de l’Écosystème
- ⁴³⁸ — F_{COP} : Flux de Carbone Organique Dissous
- ⁴³⁹ — F_{COP} : Flux de Carbone Organique Particulaire
- ⁴⁴⁰ — F_{CH₄} : Flux de Méthane

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

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

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

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

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

445 zeuse, dissoute...

446 Dans les tourbières, les flux de CO_2 sont généralement les plus importants (**Réf**

447 **needed**), puis les flux de CH_4 et/ou de COD et enfin les flux de COP.

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

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

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

451 C :N (Kirk2015)

⁴⁵² 2 Sites d'études et méthodologies employées

⁴⁵³

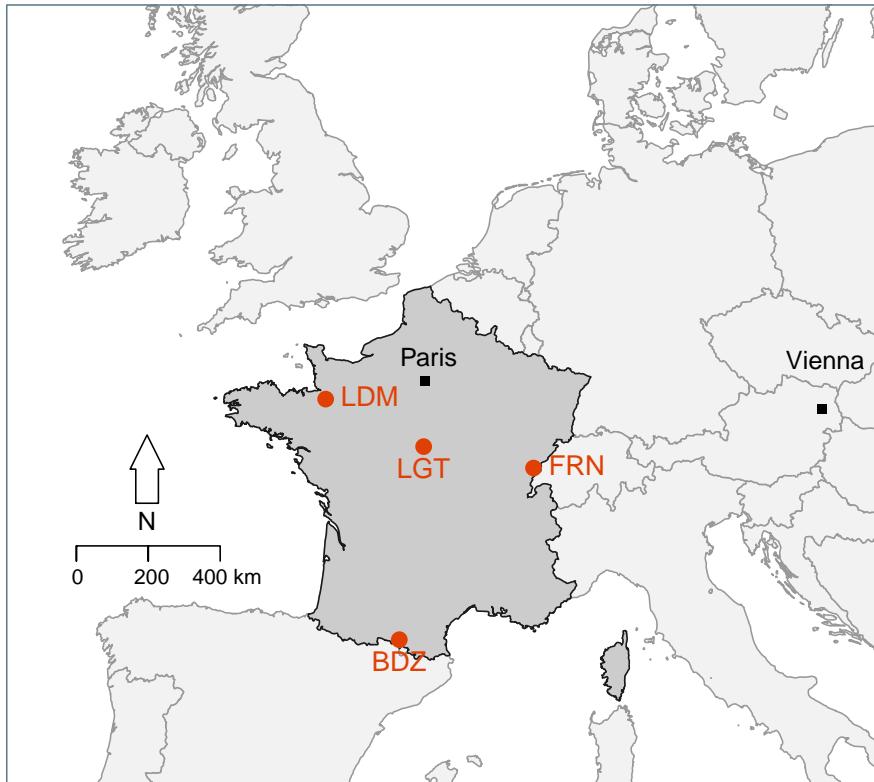
⁴⁵⁴	2.1 Présentation de la tourbière de La Guette	26
⁴⁵⁵		
⁴⁵⁶	2.2 Autres sites du service national d'observation	31
⁴⁵⁷		
⁴⁵⁸	2.3 Mesures de flux	32
	2.3.1 Présentation des méthodologies possibles	32
⁴⁵⁹	2.3.2 Les mesures de CO ₂	33
⁴⁶⁰	2.3.3 Les mesures de CH ₄	35
⁴⁶¹	2.3.4 Le calcul des flux	36
⁴⁶²	2.4 Facteurs contrôlants	37
⁴⁶³	2.4.1 acquisitions automatisées	37
⁴⁶⁵		

2.1 Présentation de la tourbière de La Guette

Le site d'étude, la tourbière de La Guette, est l'un des quatre sites du service

national d'observation des tourbières (SNOT) qui vise à étudier la fonction puits de

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

La tourbière de La Guette est située à Neuvy-sur-Barangeon, en Sologne, ($N\ 47^{\circ}19'44''$,

E $2^{\circ}17'04''$) dans le département du Cher (Figure 2.1). Le site s'étend sur une surface

d'une vingtaine d'hectare avec une géométrie relativement allongée 2.2. Cette surface

la classe parmi les plus grandes de Sologne. L'épaisseur moyenne de la tourbe est de

80 cm avec des maximums locaux atteignant 180 cm. La tourbière de La Guette est pro-

bablement topogène (**Réf needed**), formée par l'accumulation d'eau de pluie dans une

cuvette imperméabilisée par une couche d'argile issue d'alluvions de la rivière du même

nom (La Guette). Les précipitations annuelles moyennes sur le site sont de 880 mm et

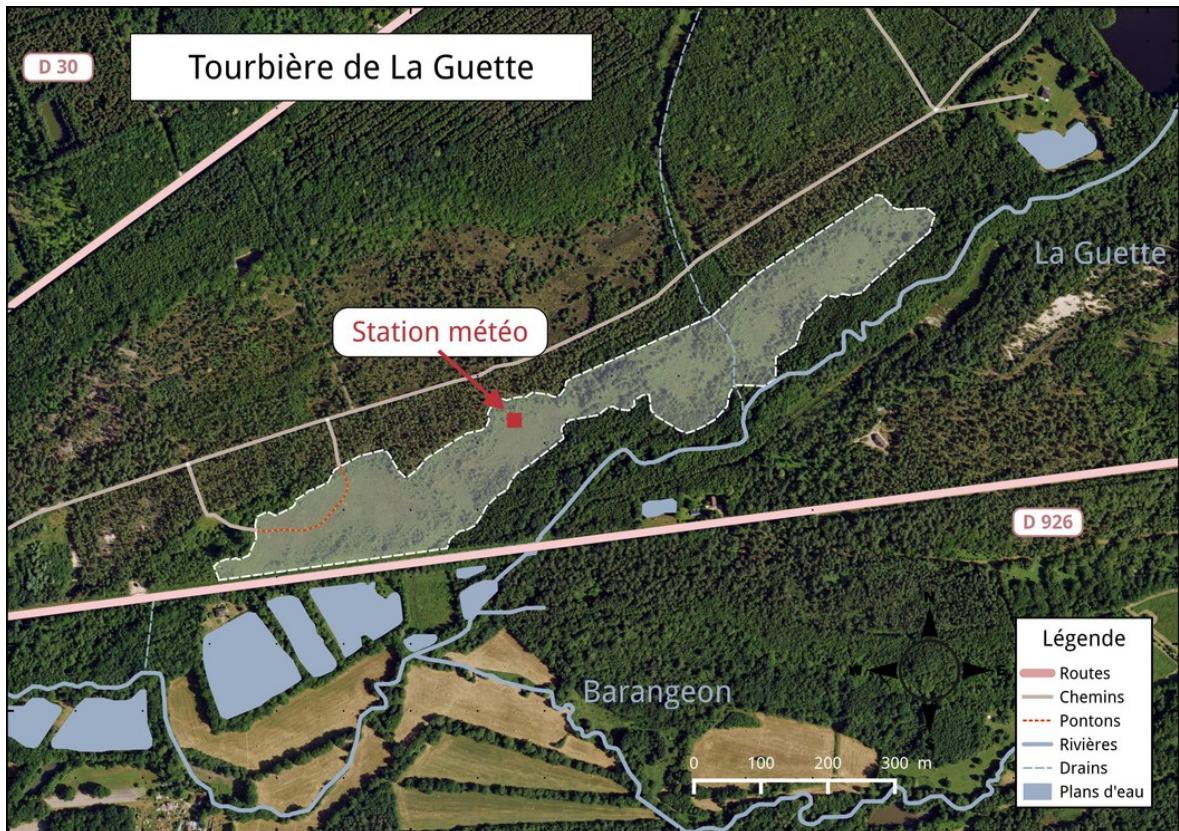


FIGURE 2.2 – Carte de la tourbière de La Guette

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

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

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

2.1. Présentation de la tourbière de La Guette

492 (2015) a pu calculé, grâce à l'étude de photos aérienne, la vitesse de fermeture du site,
493 entre 1945 et 2010, estimée à $2020 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$ avant l'incendie de 1976 et à $3469 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$
494 après. La tourbière est également envahie de façon importante par la molinie bleue
495 (*Molinia caerulea*) de la famille des *Poaceae* (Figure 2.3c). Leur présence favorisant la
496 dégradation des matières organiques (Gogo *et al.*, 2011). Sont également présentes sur
497 le site un certain nombre d'espèces caractéristiques des tourbières comme les sphaignes,
498 principalement *Sphagnum cuspidatum* et *Sphagnum rubellum*, qui forment des tapis.
499 Un tapis de sphaignes en cours de formation est visible sur la photo 2.3a. Sur cette
500 même photo sont également visible des Linaigrettes à feuilles étroites (*Eriophorum*
501 *angustifolium*), une plante de la famille des *Cyperaceae* caractéristique des marais et
502 des landes tourbeuses (Rameau *et al.*, 2008). Des bruyères sont également présentes de
503 façon importante sur le site avec notamment *Erica tetralix*, parfois appelée la Bruyère
504 des marais, de la famille des *Ericaceae* (Figure 2.3b). De la même famille est présente
505 sur le site, mais de façon moins omniprésente, la Callune (*Calluna vulgaris*). L'ensemble
506 de ces espèces tendent à préférer les milieux riches en matières organiques et pauvres
507 en nutriment (tela-botanica). D'autres espèces sont présentes sur ce site notamment,
508 *Rhynchospora alba* de la famille des *Cyperaceae*, *Juncus bulbosus*(image annexe ?),
509 de la famille de *Juncaceae*, et des Droséras, une plante insectivore, de la famille des
510 *Droseraceae* (Annexe A, Figure 1a) .

511 Au cours des dernières années, les précipitations sont relativement différentes avec
512 deux années plus sèche que la moyenne avant 2013 et deux années plus humide en 2013
513 et 2014 (Figure 2.4). On observe également cette dualité au niveau du niveau de la
514 nappe. Avant 2013 les étés sont marqués par des étiages important avec des baisses du
515 niveau de nappe allant jusqu'à -60 cm en 2012 (Figure 2.5). Après 2013, les étiages
516 sont beaucoup moins importants sur le site (Figure 2.6). Les variations inter-annuelles
517 de la température moyenne de l'air semblent moins marquées. L'année 2011 est très
518 proche de 2014 avec une température moyenne supérieure à 11 °C. De la même façon
519 les années 2012 et 2013 sont très proche avec des température moyenne inférieure à
520 10 °C.



(a) *Sphagnum – Eriophorum angustifolium*



(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

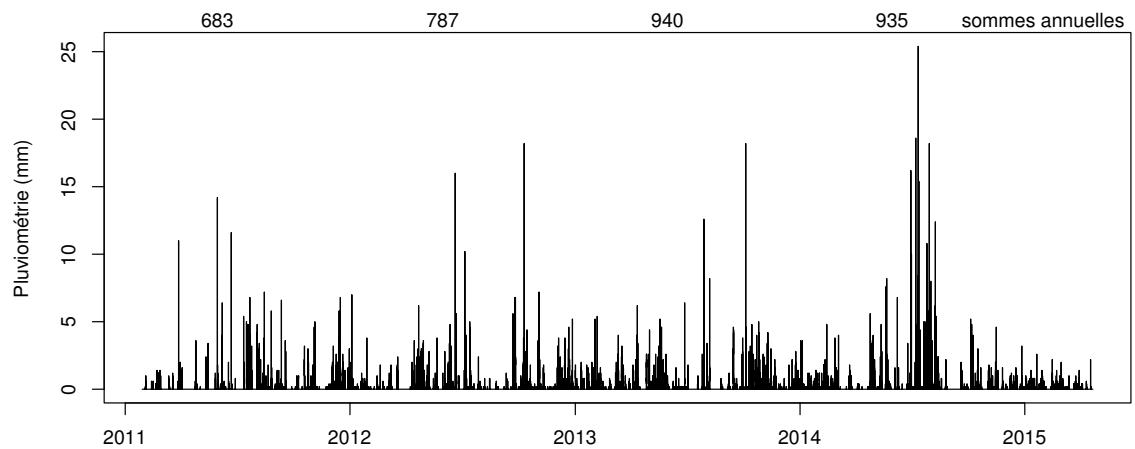


FIGURE 2.4 – Évolution du niveau de la pluviométrie, en mm, des années 2011 à 2014

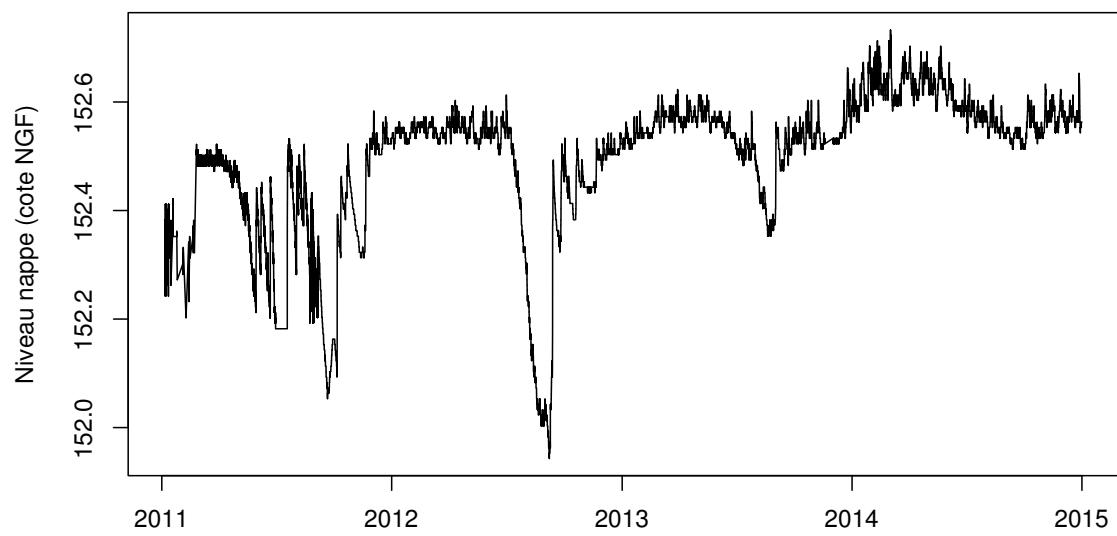


FIGURE 2.5 – Évolution du niveau de la nappe, en cm par rapport à la surface, des années 2011 à 2014

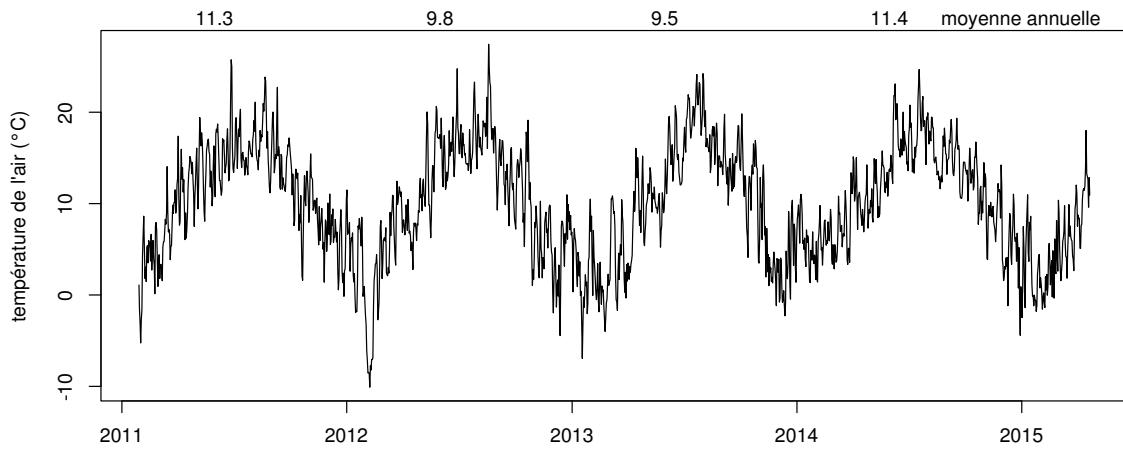


FIGURE 2.6 – Évolution de la température de l'air (en °C) des années 2011 à 2014

⁵²¹ 2.2 Autres sites du service national d'obser- ⁵²² vation

⁵²³ Bien que moins étudiés, les autres sites du SNOT, Bernadouze, Frasne et Landemara-
⁵²⁴ rais ont également fait l'objet d'un suivi ponctuel en 2013. La tourbière de Bernadouze
⁵²⁵ est situé à 1400 m dans les Pyrénées, en Ariège (N 42°48'09'', E 1°25'24''). Elle est
⁵²⁶ relativement petite avec 3,75 ha seulement. La tourbière de Frasne est situé à 840 m
⁵²⁷ dans le Doubs et s'étend sur une surface de 98 ha. Enfin la tourbière de Landemarais
⁵²⁸ est située en Ille-et-villaine, à 154 m et s'étend sur 23 ha. les températures annuelles
⁵²⁹ moyennes sur ces trois sites sont respectivement de 6, 7,5 et 11 °C. les précipitations
⁵³⁰ annuelles étant de 1700, 1400, 870 mm.

⁵³¹ Au sein de ses sites de nombreuses mesures ont été effectuées et notamment des
⁵³² mesures de flux de GES notamment le CO₂ et le CH₄. La méthodologie utilisée pour
⁵³³ les mesurer étant transverse aux différentes expérimentations elle sera détaillée dans
⁵³⁴ ce chapitre.

₅₃₅ 2.3 Mesures de flux

₅₃₆ 2.3.1 Présentation des méthodologies possibles

₅₃₇ De nombreuses techniques permettent de mesurer des flux de gaz, avec en premier
₅₃₈ lieu les méthodes de chambres.

₅₃₉ Les chambres peuvent être ouvertes, c'est à dire que la mesure se fait lorsque le
₅₄₀ gaz à l'intérieur de la chambre à l'équilibre avec celui à l'extérieur, ou fermées, dans
₅₄₁ ce cas le gaz à l'intérieur de la chambre n'est pas à l'équilibre avec celui à l'extérieur.
₅₄₂ Elles peuvent également être dynamique, lorsqu'un système de pompe, permettant
₅₄₃ notamment de transporter le gaz jusqu'à l'analyseur, est présent. Ou statique si le
₅₄₄ système est sans flux artificiel.

₅₄₅ Trois grandes techniques de chambre existent. D'abord les chambres **dynamiques**
₅₄₆ **ouvertes** qui se basent sur un état d'équilibre et mesurent une différence de concen-
₅₄₇ tration d'un gaz dont une partie passe par la chambre et l'autre non. Cette méthode
₅₄₈ 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
₅₅₀ chambre à l'aide d'un système de pompe permettant l'envoi du gaz dans un analyseur
₅₅₁ externe. Enfin les chambres **statiques fermées** qui mesurent également l'évolution de
₅₅₂ la concentration du gaz au sein de la chambre sans qu'un système de pompe ne soit
₅₅₃ présent. Dans ce cas soit l'analyseur est présent dans la chambre, soit des prélèvements
₅₅₄ sont fait à intervalles réguliers puis analysés par la suite en chromatographie gazeuse.

₅₅₅ Il faut noter que les dénominations anglaises de ces méthodes doit faire l'objet d'une
₅₅₆ attention particulière. *Closed chamber* par exemple est parfois utilisé pour se référer
₅₅₇ à l'état ou non d'équilibre, comme défini dans ce document, mais parfois également
₅₅₈ pour désigner les méthodes de chambre sans système de flux ce qui peut prêter à
₅₅₉ confusion [Pumpenan et al. \(2004\)](#). Souvent utilisées les dénominations *open/closed* et
₅₆₀ *dynamic/static* sont décrites dans [Luo et Zhou \(2006\)](#), une autre convention peut être
₅₆₁ rencontrée : *flow-through/non-flow-through* et *steady state/non-steady state* [Livingston](#)

562 et Hutchinson (1995)

563 Ces différentes méthodes ont divers avantages et inconvénients.

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

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

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

569 2.3.2 Les mesures de CO₂

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

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

581 Pour les raisons détaillée précédemment, la méthode mise en œuvre est celle de
582 la chambre statique fermée, aucun système de pompe n'est donc utilisé. la chambre
583 est posée sur l'embase, elle contient l'analyseur de CO₂ qui mesure la variation de
584 la concentration en gaz au cours du temps. Un ventilateur de faible puissance est
585 également présent à l'intérieur de la chambre afin d'homogénéiser l'air. 1 à 3 min de
586 stabilisation sont nécessaires après la pose de la chambre afin d'éviter les effets pouvant
587 y être liés. Ensuite l'enregistrement est lancé, avec l'acquisition toutes les 5 s pendant
588 5 min de la concentration en CO₂, de la température et de l'humidité. La mesure se
589 déroule donc sur une période de temps relativement courte afin de minimiser le dés-

2.3. Mesures de flux

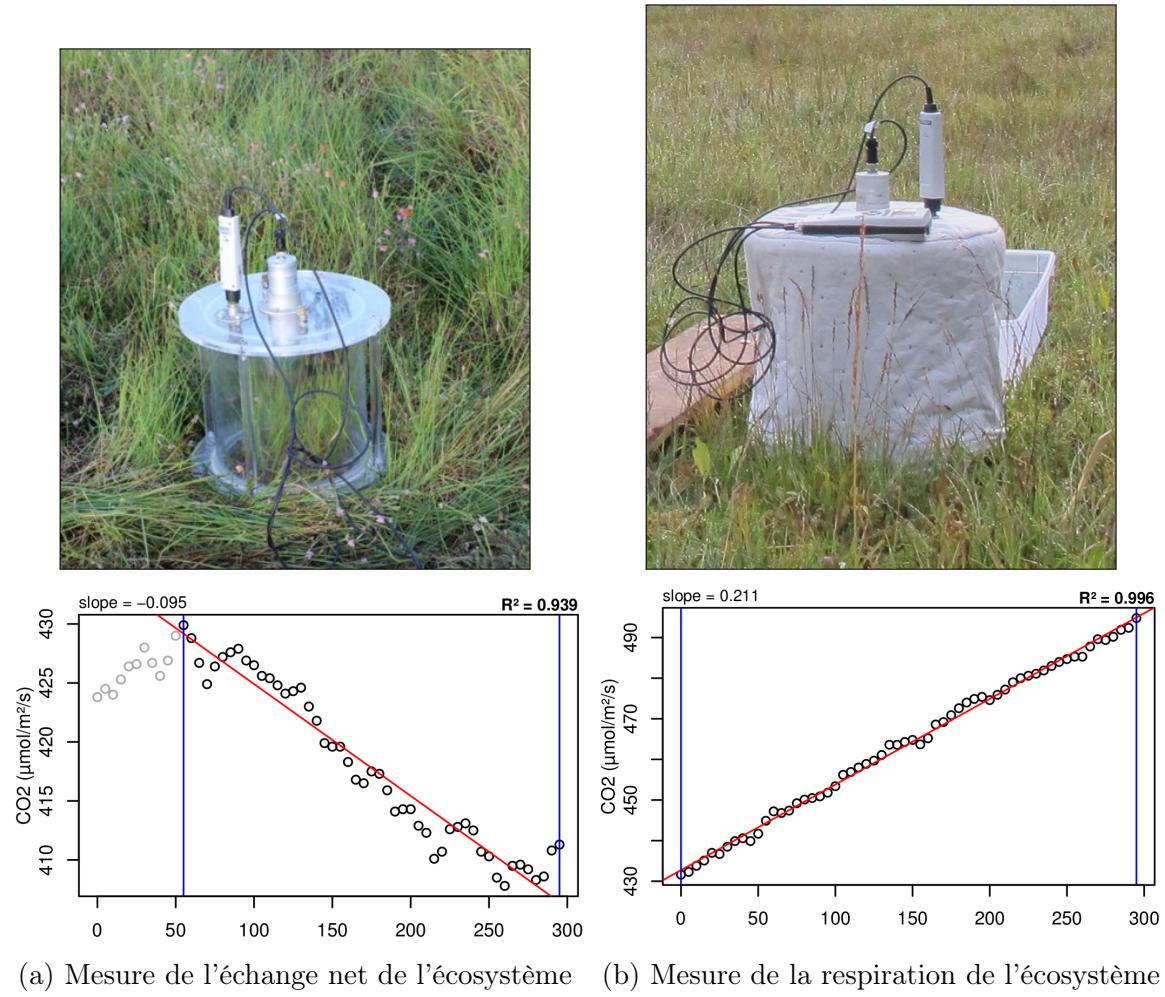


FIGURE 2.7 – Mesures de CO₂

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

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

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

613 2.3.3 Les mesures de CH₄

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

2.3. Mesures de flux

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

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

641 2.3.4 Le calcul des flux

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

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

644 Avec :

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

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

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

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

649 T : la température dans la chambre en K

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

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

652 2.4 Facteurs contrôlants

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

660 2.4.1 acquisitions automatisées

661 Les paramètres météorologiques ont été mesurés, en un point, au centre de la tour-
 662 bière (Figure 2.2)(carte ?) à l'aide d'une station d'acquisition Campbell installée sur le
 663 site en 2008. Les variables ont été acquises à une fréquence horaire jusqu'au 20 février
 664 2014 puis toutes les demi-heures par la suite. Les paramètres enregistrés sont la pres-
 665 sion atmosphérique, l'humidité relative de l'air, la pluviométrie, l'irradiation solaire,
 666 la vitesse et la direction du vent. (détail du matos ?). Cette même station à égale-

2.4. Facteurs contrôlants

667 ment permis l'acquisition de la température de l'air et de la tourbe à -5, -10, -20 et
668 -40 cm. Installées à la même époque, quatre sondes **OTT?** de mesure du niveau de
669 la nappe d'eau permettent le suivi du niveau de la nappe dans la tourbière.

3 Bilan de C de la tourbière de La Guette

671

672	3.1 Introduction	40
673	3.2 Procédure expérimentale et analytique	40
674	3.2.1 Méthodes de mesure	40
675	3.2.2 Modélisation du bilan de C	42
676	3.3 Résultats	46
677	3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la tour-	
678	bière de La Guette	46
679	3.3.2 Sélection des modèles	52
680	3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle	
681	de l'écosystème	59
682	3.3.4 Variabilité spatiale du bilan	66
683	3.4 Discussion	68
684	3.4.1 Estimations des flux	68
685	3.4.2 Estimations des bilans	71
686	3.4.3 Sensibilité et limitations du bilan	71
687	3.4.4 Représentativité locale du modèle	72
688	3.4.5 Variation du bilan avec la végétation	72
689	3.4.6 perspectives	73
690		
691		
692		

693 3.1 Introduction

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

706 3.2 Procédure expérimentale et analytique

707 3.2.1 Méthodes de mesure

708 Mesures de flux de gaz

709 Les mesures des flux de CO₂ et de CH₄ ont été effectués en utilisant la méthode
710 décrite dans la partie 2.3. En juin 2011, 20 placettes ont été installées¹ selon un échan-
711 tillonnage aléatoire stratifié : La surface de la tourbière a été divisée selon une grille
712 de 20 mailles et un point choisi aléatoirement dans chaque maille localise chaque pla-
713 cette. Cette méthode permet de conserver un échantillonnage aléatoire tout en étant
714 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.

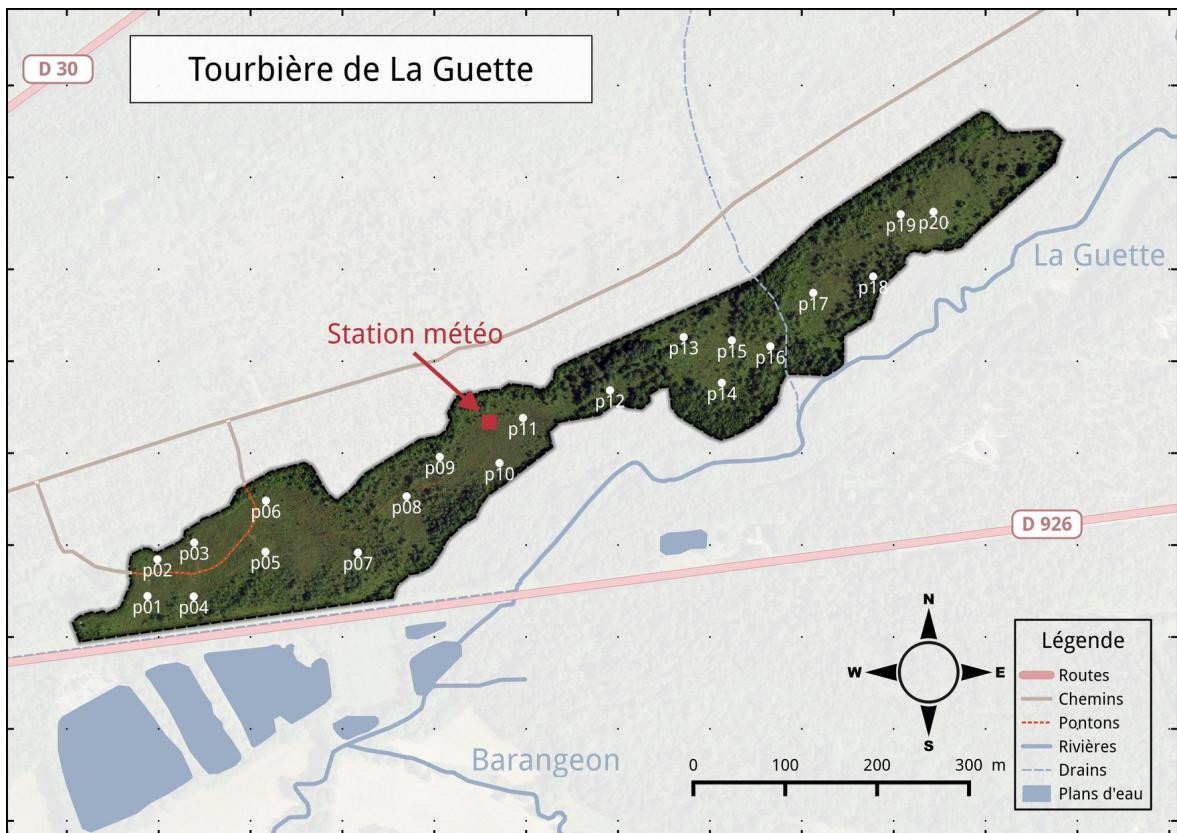


FIGURE 3.1 – Répartition des 20 placettes de mesures suivant un échantillonnage aléatoire stratifié.

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

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

3.2. Procédure expérimentale et analytique

729 (20 campagnes, pour 24 mois de mesure). Quand aux mesures de CH₄ ont été effectuées
730 avec une fréquence moindre (12 campagnes) principalement liée au difficulté de mise
731 en oeuvre de l'instrument SPIRIT (lourd, difficilement transportable dans un milieu
732 tourbeux).

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

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

745 3.2.2 Modélisation du bilan de C

746 Estimation du bilan et variabilité temporelle

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

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

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

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

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

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

2. Valeurs moyennes - Valeurs moyennes estimées

3.2. Procédure expérimentale et analytique

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

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

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

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

803 Étude de la variabilité spatiale

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

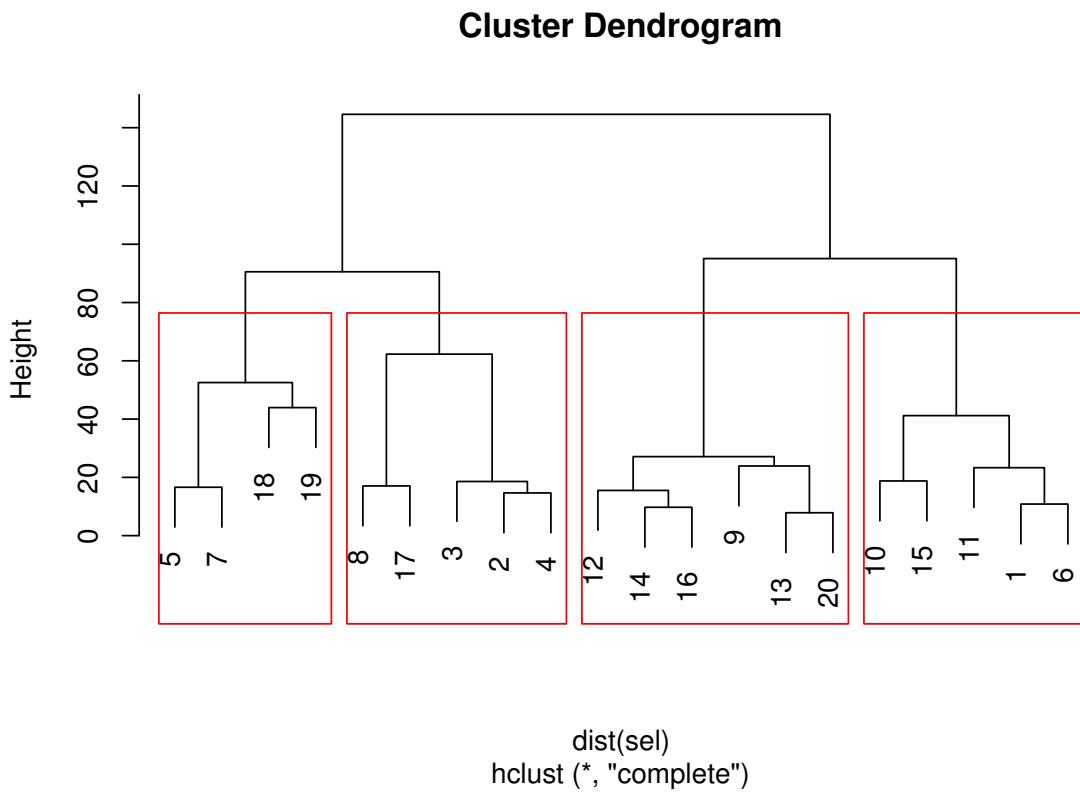


FIGURE 3.2 – Partitionnement des placettes en fonction de leur similarité en termes de composition végétale (pourcentage des strates muscinales, herbacées et arbustives)

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

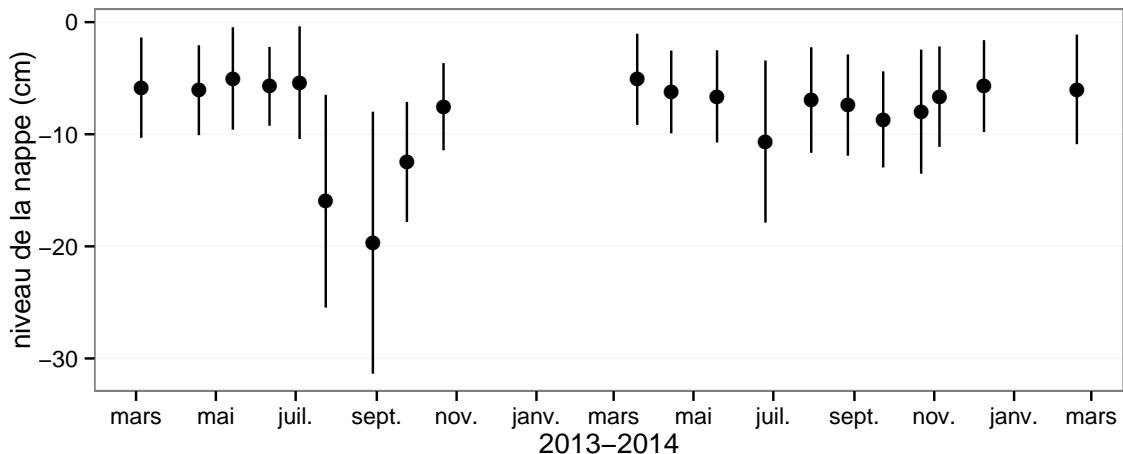


FIGURE 3.3 – Évolution du niveau de la nappe moyen des 20 embases mesuré pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

817 3.3 Résultats

818 3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la 819 tourbière de La Guette

820 Les Facteurs contrôlant

821 L'évolution du niveau de la nappe des 20 placettes, décrite dans la figure 3.3, est
822 marquée par un étiage d'une vingtaine de centimètres en moyenne en 2013 et l'absence
823 d'un étiage net en 2014 avec un niveau de la nappe moyen ne descendant que rarement
824 sous la barre des -10 cm . Ces observations sont cohérentes avec la figure 2.5 représen-
825 tant des données acquises à plus haute fréquence, et confirment la particularité de ces
826 2 années vis-à-vis des précédentes qui présentent des étiages bien plus fort.

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

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

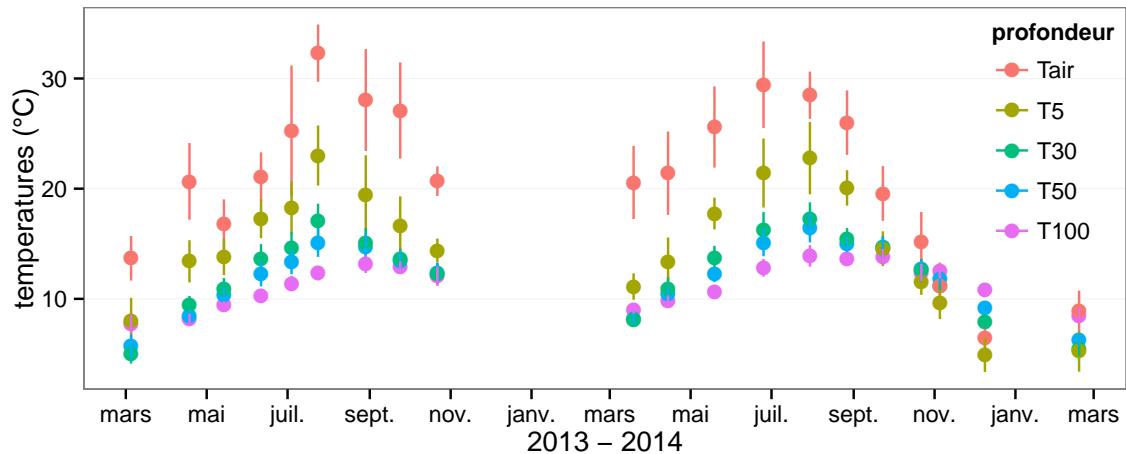


FIGURE 3.4 – Évolution des températures de l'air (Tair) et du sol à -5, -30, -50 et -100 cm (T5, T30, T50 et T100 respectivement) moyenne mesurée lors des campagnes de terrain de mars 2013 à février 2015

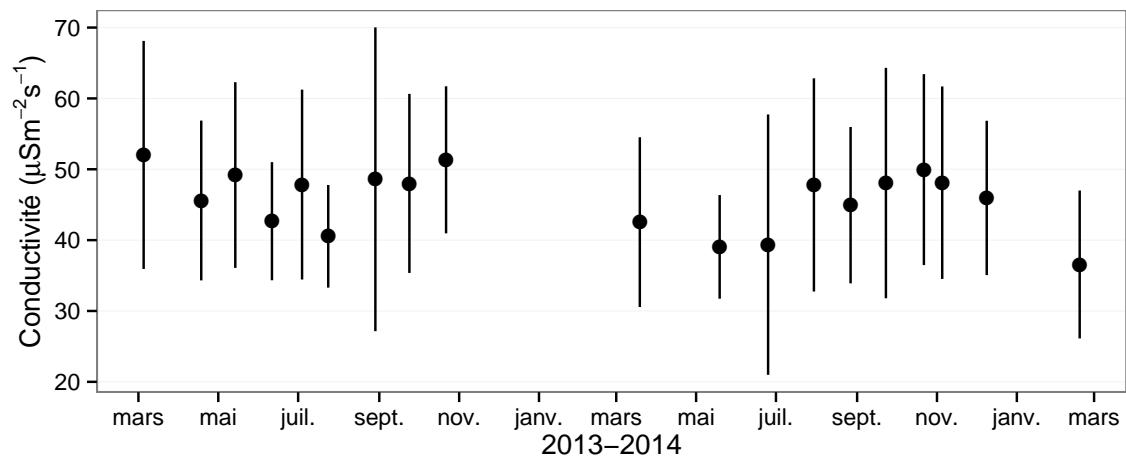


FIGURE 3.5 – Évolution de la conductivité pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

3.3. Résultats

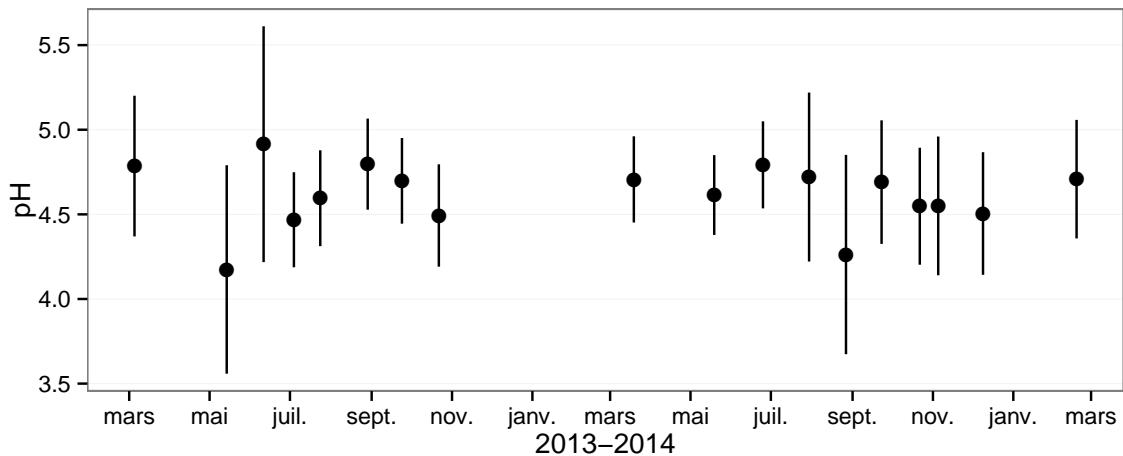


FIGURE 3.6 – Évolution du pH pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

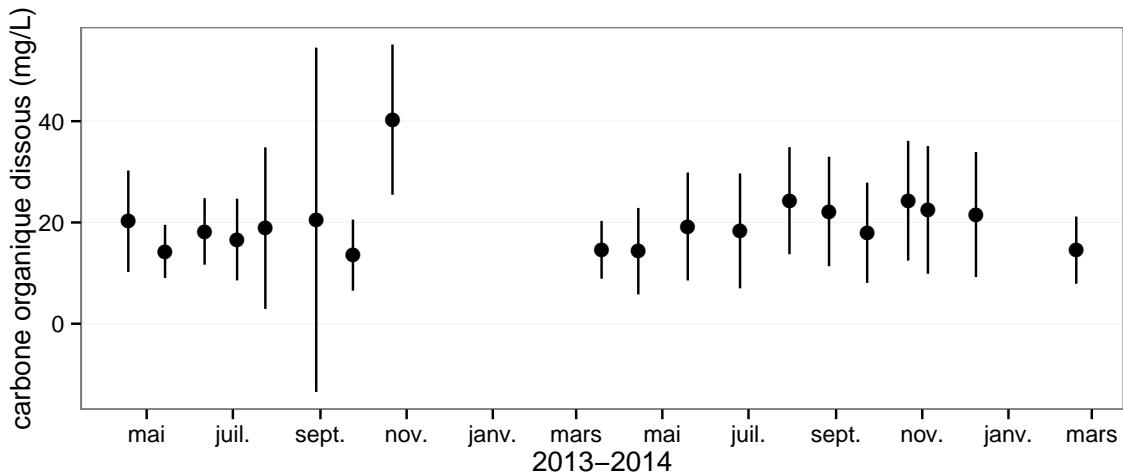


FIGURE 3.7 – Évolution de la concentration en carbone organique dissous dans l'eau du sol pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

833 En moyenne le pH mesuré sur la tourbière de La Guette est compris entre 4 et 5
834 (figure 3.6). Ces valeurs sont cohérentes avec la classification *poor-fen* du site .

835 La concentration en carbone organique dissous présente dans l'eau de la tourbière
836 est compris en moyenne entre 10 et 30 mg L⁻¹ (figure 3.7).

837 Les flux de carbone

838 L'ensemble des mesures de CO₂ s'étendent de mars 2013 à février 2015. Cependant de novembre 2013 à février 2014 les mesures ont été interrompues suite à des pannes/cassages matériels. 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

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

844 En 2013, les valeurs de la PPB augmentent au printemps et une partie de l'été
845 avec un maximum de $12,80 \pm 4,91 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ atteint fin juillet, avant de diminuer
846 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
847 en juin, soit plus tôt que l'année précédente. Puis pendant l'été et l'automne les va-
848 leurs décroissent jusqu'à être proche de 0. En moyenne les valeurs de la PPB sont de
849 $7,12 \pm 5,19 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en 2013 et de $6,56 \pm 4,72 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en 2014 (Figure 3.8a).

850 La RE en 2013 augmente pendant le printemps et une partie de l'été, elle atteint
851 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
852 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
853 de décroître jusqu'en hiver pour approcher des valeurs nulles. La moyenne annuelle de
854 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
855 2014 : $3,63 \pm 2,56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figure 3.8b).

856 Concernant l'ENE, en 2013 elle augmente jusque $5,19 \pm 4,51 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, son
857 maximum en juin, avant de diminuer jusqu'à la fin de l'année. Cependant, cette baisse
858 est moins homogène que celle des deux flux précédents, avec notamment une augmenta-
859 tion de l'ENE entre juillet et août 2013. Ceci étant, il faut également noter les valeurs
860 importantes de la déviation standard particulièrement en juin et en août. En 2014,
861 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
862 décroisse. Cette baisse est cependant plus homogène qu'en 2013. les moyennes de l'ENE
863 en 2013 et 2014 sont très proches et sont respectivement de $2,85 \pm 3,05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
864 et $2,93 \pm 2,77 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figure 3.8c).

865 Le CH₄ comme le CO₂ montre une variabilité saisonnière importante, cependant
866 les flux mesurés sont un ordre de grandeur en dessous de ceux mesurés pour le CO₂
867 (Figure 3.9). À l'inverse de ce dernier, l'importance des flux de CH₄ mesurés en 2013 et
868 2014 est différente. En 2013 les flux sont moins importants qu'en 2014 avec des maximum
869 de $0,078$ et $0,196 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivement.

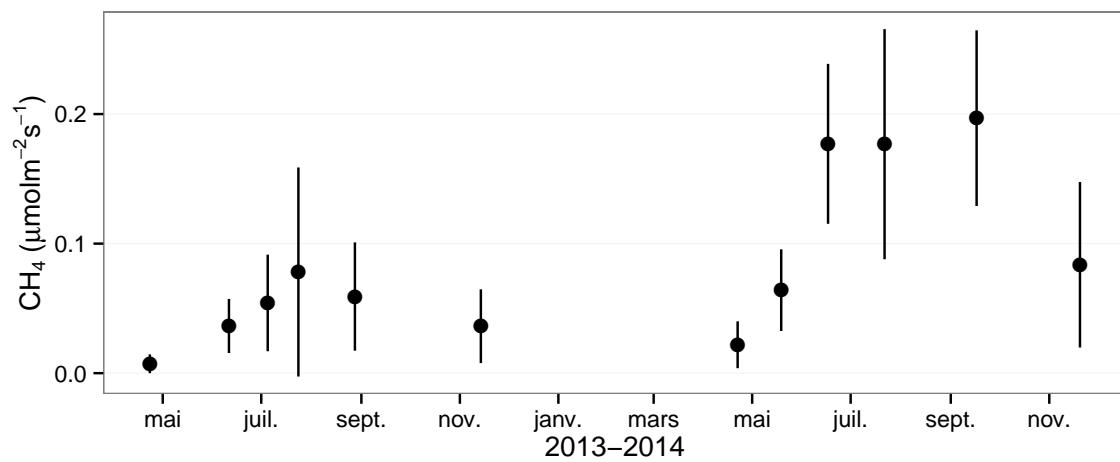


FIGURE 3.9 – Évolution des flux de méthane moyen (N ?) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

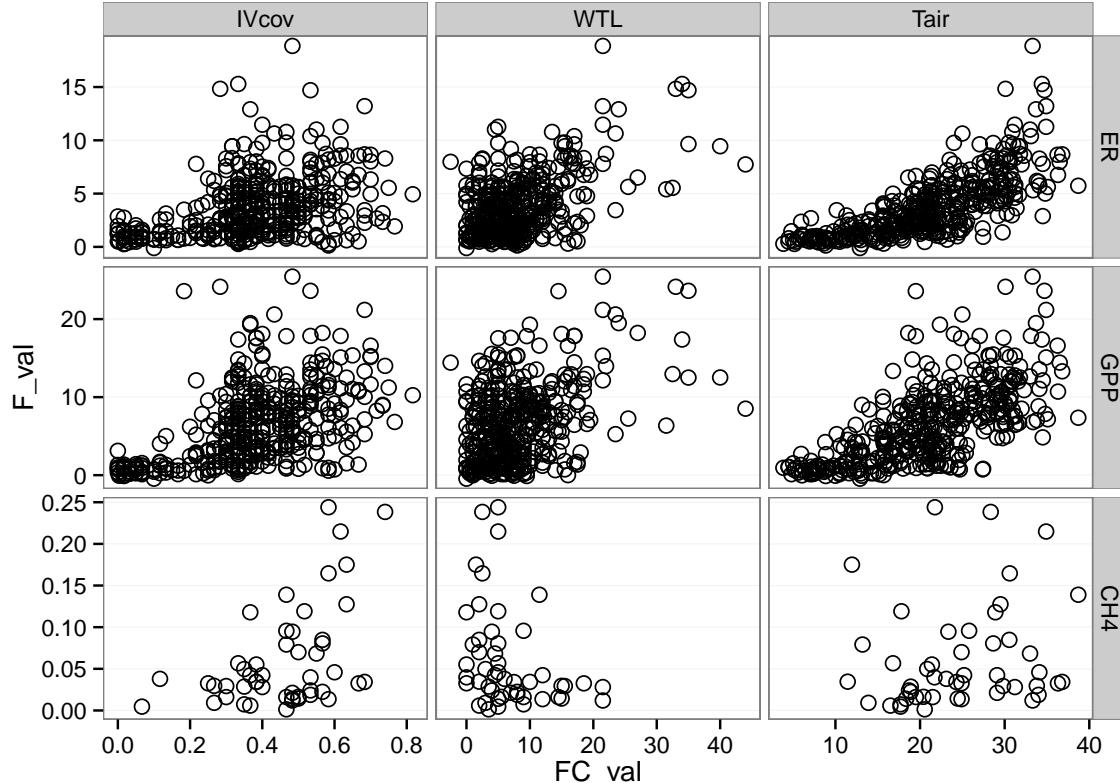


FIGURE 3.10 – Relations entre les flux de gaz et une sélection de facteurs contrôlant

3.3. Résultats

870 Les relations flux gazeux et facteurs contrôlant

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

879 3.3.2 Sélection des modèles

880 La Production Primaire Brute

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

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

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

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

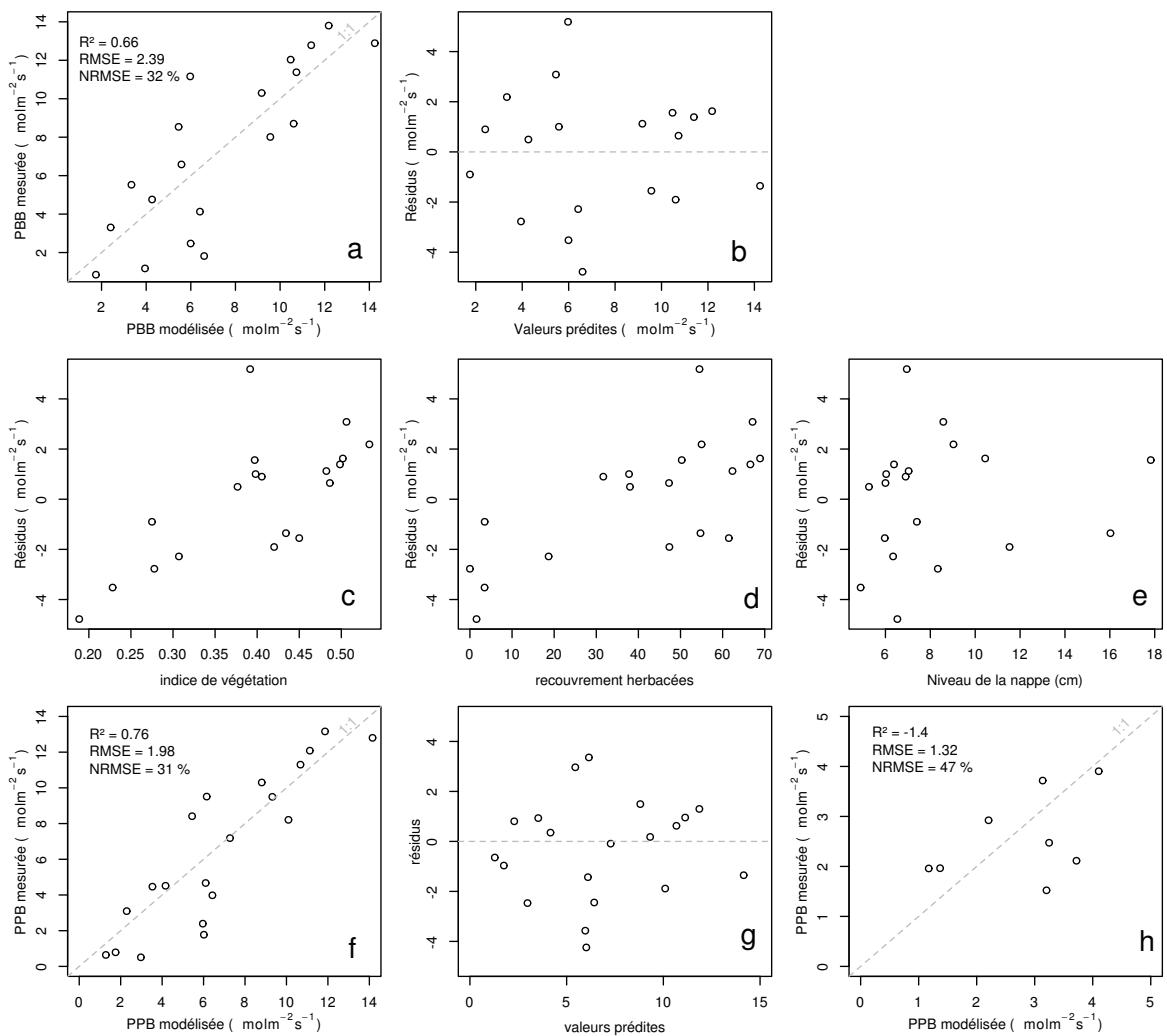


FIGURE 3.11 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.1

3.3. Résultats

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

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

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

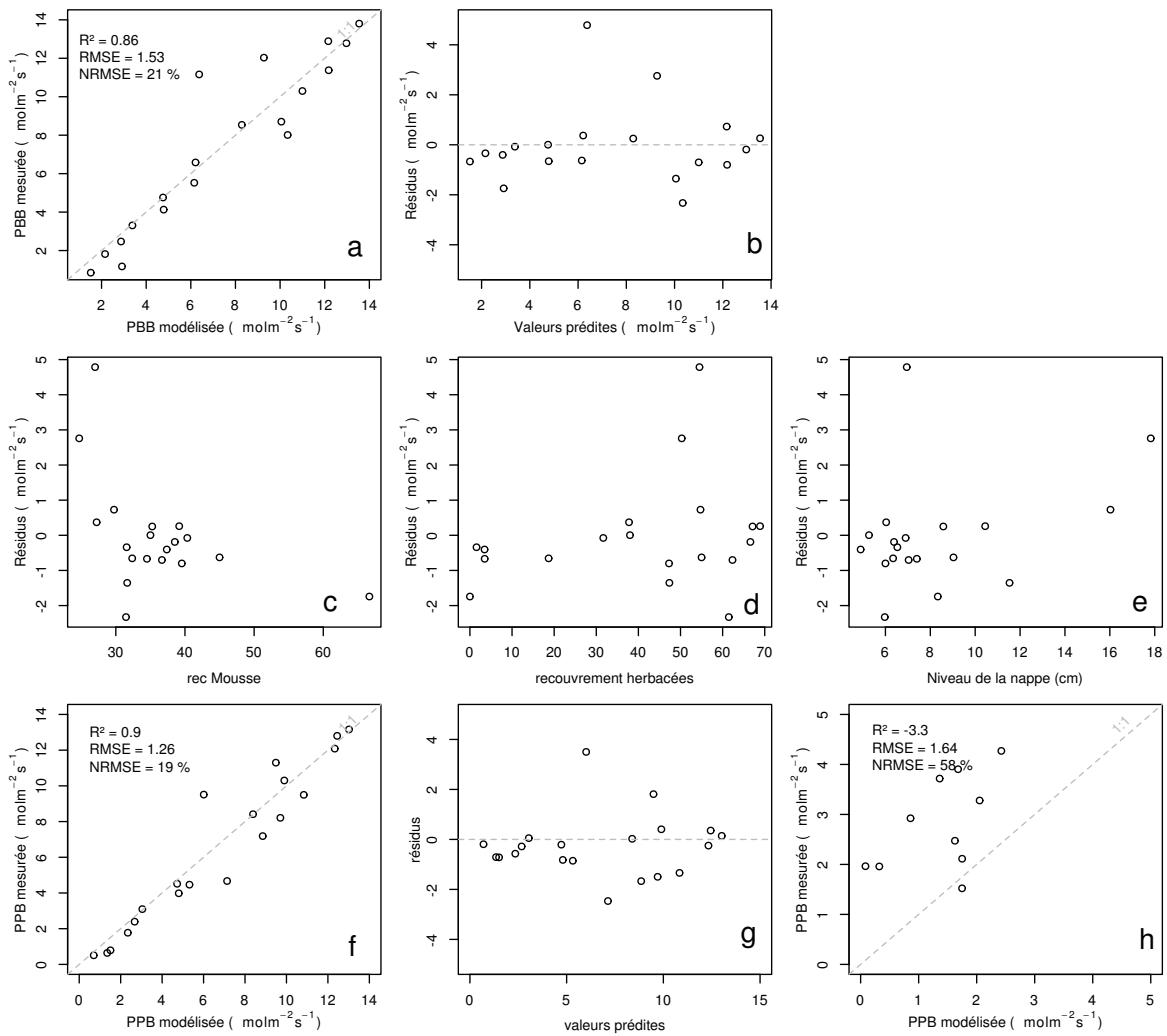


FIGURE 3.12 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.3

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.

930 La Respiration de l'Écosystème

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

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

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

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

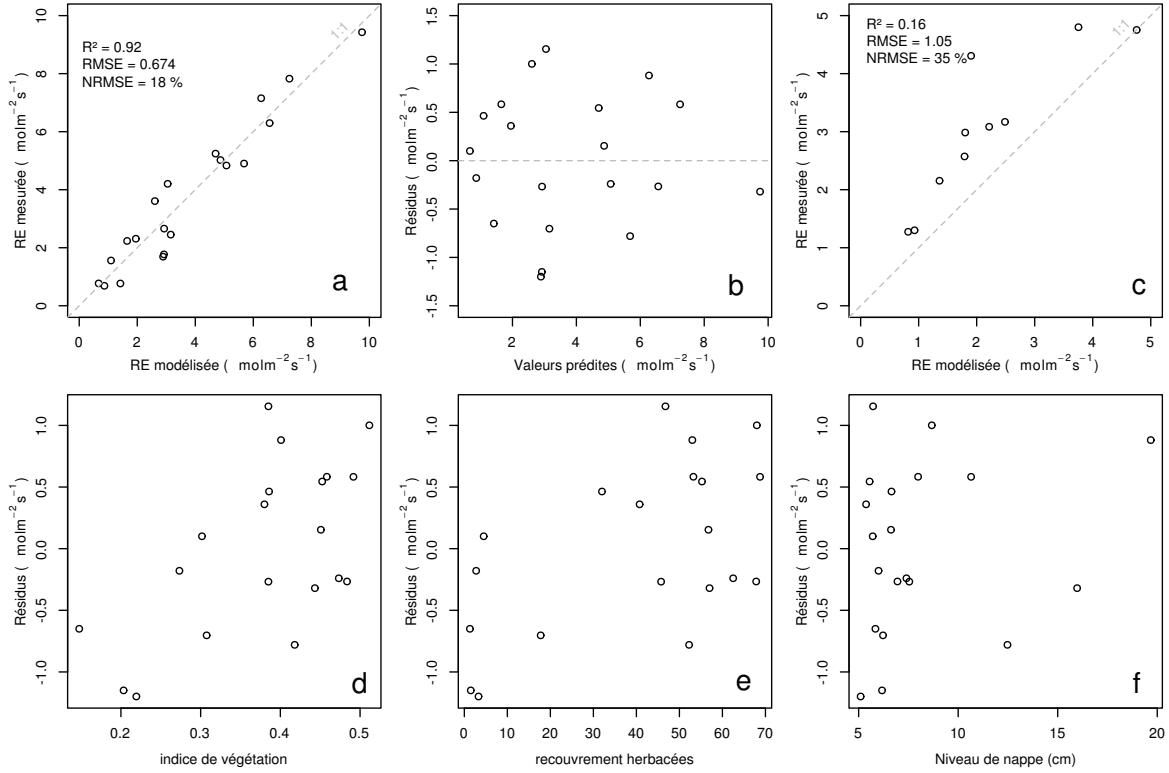


FIGURE 3.13 – RE modèles avec Tair

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

942 Les calibrations de ces nouvelles équations sont présentées dans la figure 3.13-a,b et
 943 3.13-d,e respectivement. Dans les deux cas, l'erreur diminue pour avoisiner 13 %, avec
 944 des résidus qui se répartissent de façon non-biaisée. L'évaluation de ces deux équations
 945 montre cependant des différences : D'un côté l'équation 3.5 ne permet pas de diminuer
 946 l'erreur standard qui vaut 34 %, et est donc très proche des 35 % calculé pour l'évalua-
 947 tion du modèle n'intégrant pas la végétation. De l'autre l'évaluation de l'équation 3.6
 948 montre une erreur standard plus faible s'établissant à 23 %. Les paramètres des diffé-
 949 rentes équations sont présentés dans le tableau 3.1, les modèles RE-1, RE-2, et RE-3
 950 correspondent respectivement aux équations 3.4, 3.5 et 3.6. À l'inverse de la PPB les
 951 paramètres des modèles de la RE ont, à l'exception du paramètre c du modèle RE-2,
 952 une significativité importante et une erreur standard faible.

3.3. Résultats

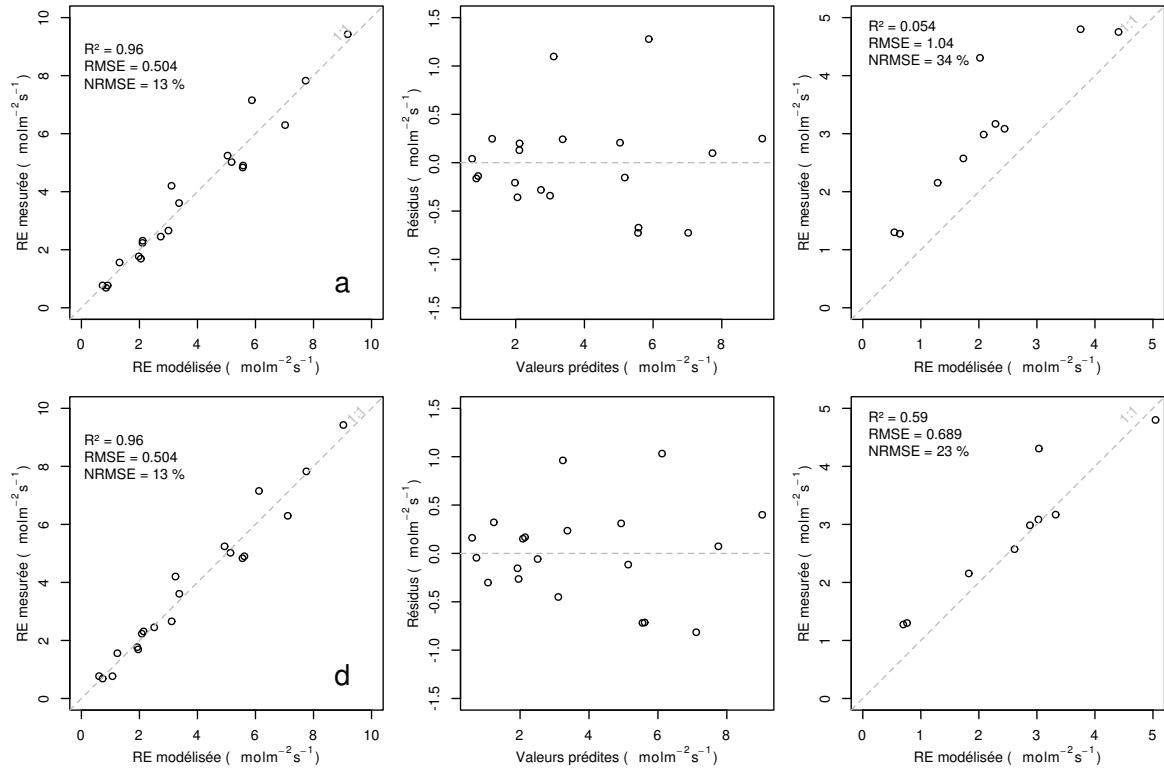


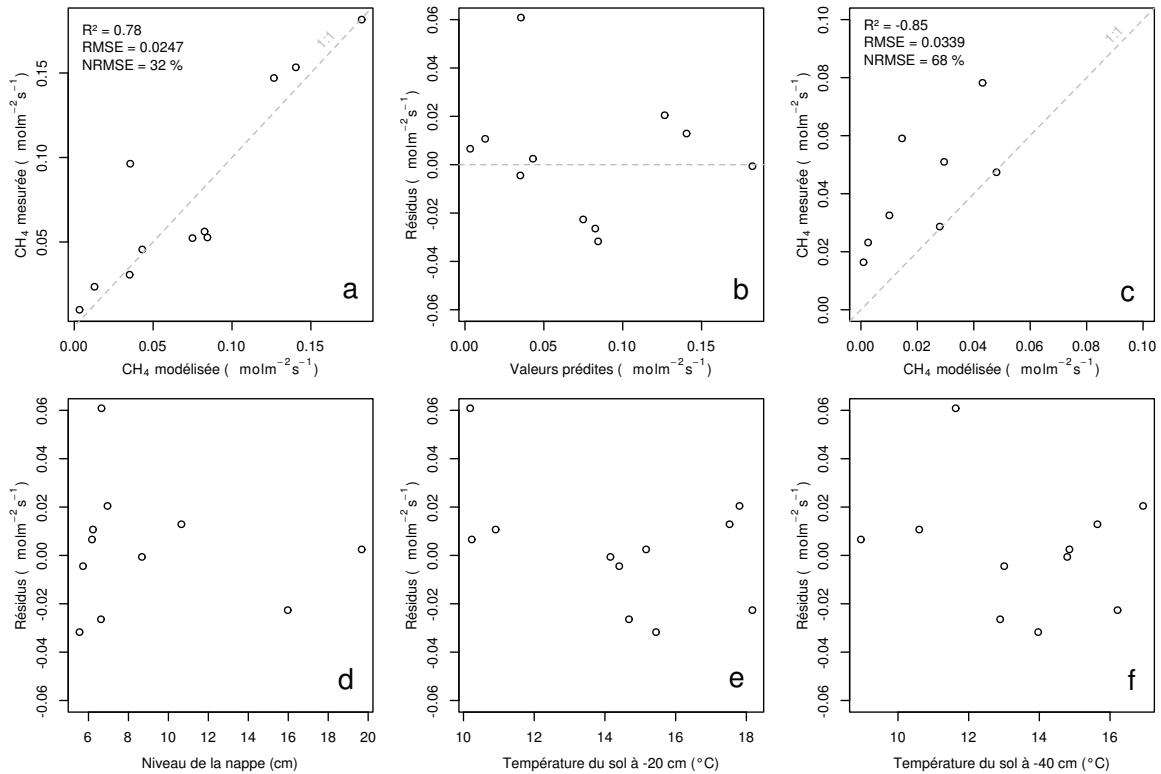
FIGURE 3.14 – RE modèles avec Tair

953 Le flux de CH₄

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

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

960 Avec les données acquises, l'indice de végétation est le meilleur prédicteur (Fi-
 961 gure 3.15), il explique 78 % de la variabilité du CH₄ avec une erreur standard de 32 %.
 962 Aucune tendance ne semble se dégager entre les résidus de cette équation et les facteurs
 963 contrôlant mesurés. L'évaluation de cette équation montre une tendance à sous-estimer
 964 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.

967 Le COD

968 3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle 969 de l'écosystème

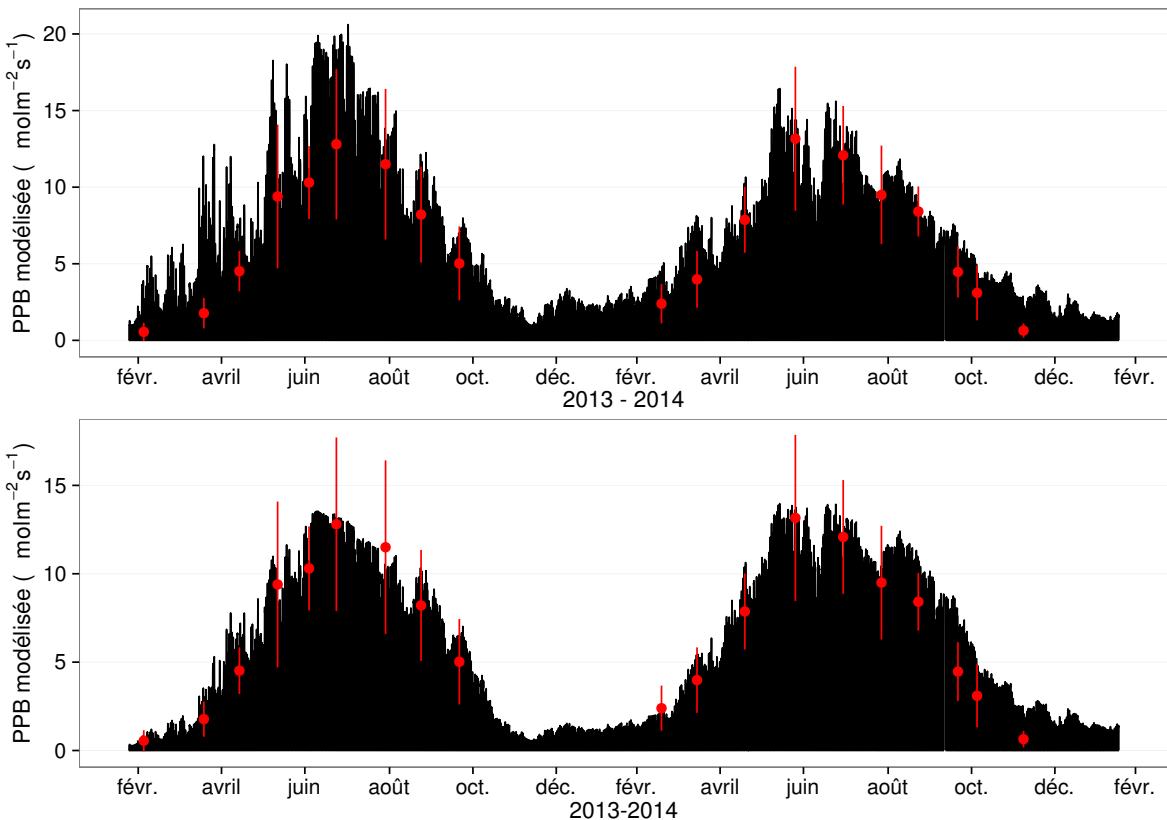
970 L'interpolation des flux de PPB montrent une variabilité saisonnière proche de celle
971 mesurée sur le terrain (Figure 3.16). Les valeurs les plus fortes mesurées ne semblent
972 pas atteinte par le modèle PPB-2 à l'inverse du modèle PPB-1. Dans les deux cas les
973 modèles semblent sur-estimer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

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

3.3. Résultats

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

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

FIGURE 3.16 – Flux de CO₂ interpolé à partir de PPB-1 et PPB-2

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

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

980 L'estimation du CH₄ semble rendre compte dans les grandes lignes de la différence de
981 flux mesurée entre 2013 et 2014.

982 Les flux interpolés à l'heure puis sommés par années sont présentés dans le ta-
983 bleau 3.2 pour les différents modèles. Sur les deux années, selon le modèle utilisé, la
984 PPB stocke du carbone pour 1070 à 1290 gC m⁻² an⁻¹ pour PPB-2 et PPB-1 respecti-
985 vement. Dans le détail on observe une différence entre les deux modèles : Celui utilisant
986 uniquement la température de l'air (PPB-1) présente un stockage plus important en
987 2013 qu'en 2014. Tandis que le modèle prenant en compte la végétation (PPB-2) stocke
988 moins de carbone en 2013 par rapport à 2014. L'intégration de la végétation minimise
989 également l'erreur standard de l'estimation, la divisant approximativement par deux.

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

3.3. Résultats

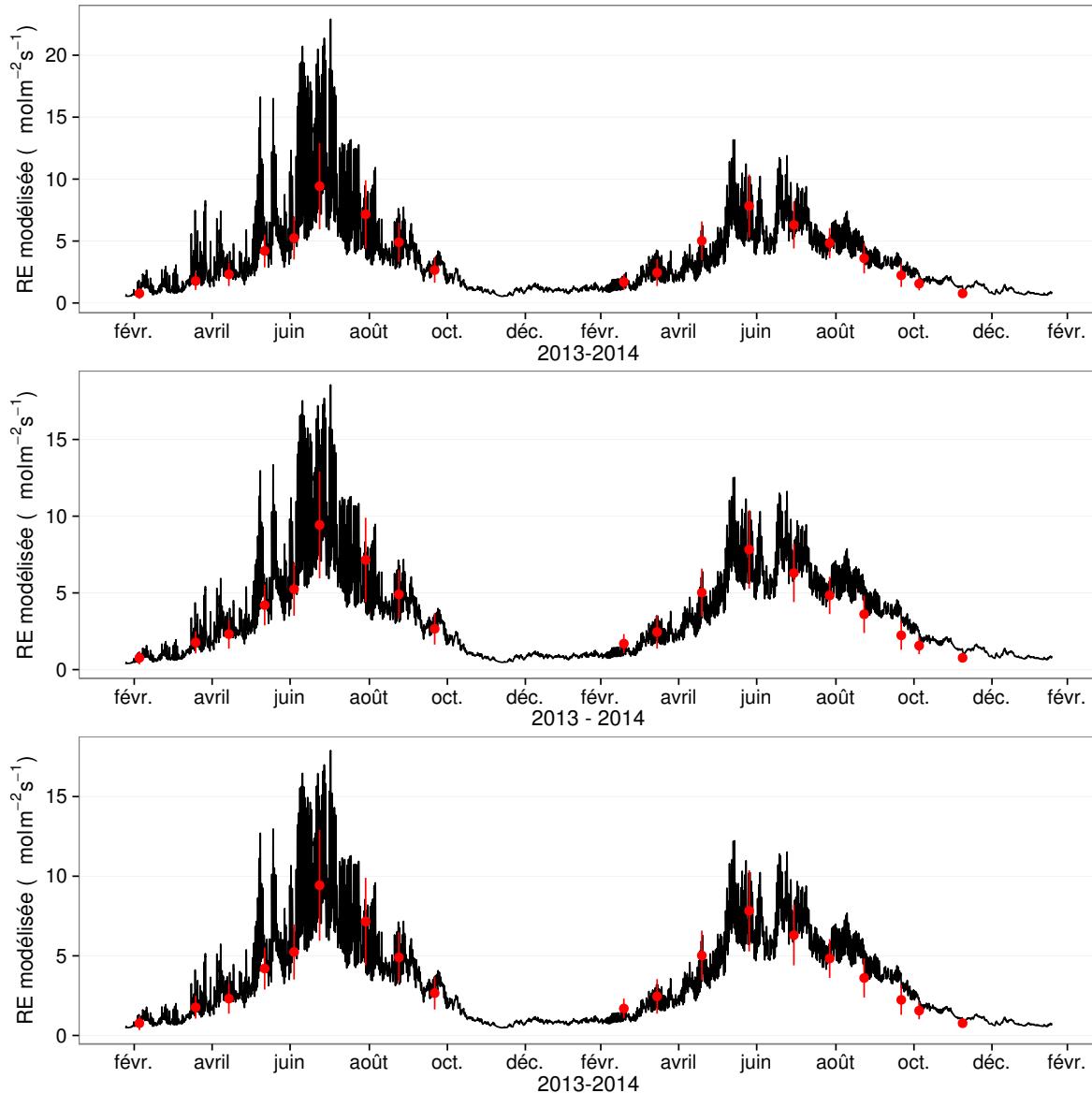


FIGURE 3.17 – Flux de CO_2 interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3

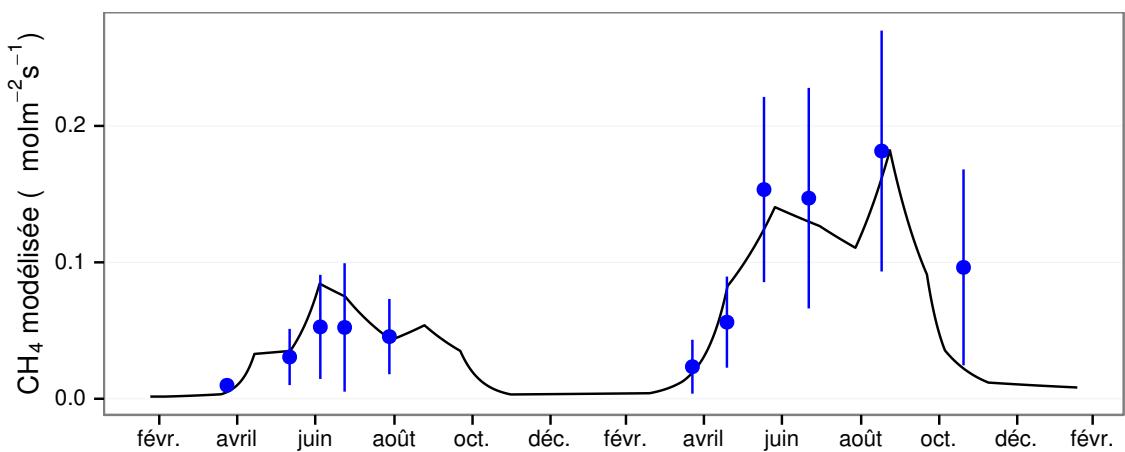


FIGURE 3.18 – Flux de CO_2 interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3

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

992 végétation (modèles RE-2 et RE-3) conduit à une respiration plus forte en 2014 qu'en
 993 2013 à l'inverse de RE-1. La différence entre l'estimation de la RE en 2013 et en 2014
 994 diminue avec l'intégration de la végétation. Elle passe de 102 pour RE-1 à 78 puis
 995 41 pour RE-2 et RE-3. Malgré ces différences, on observe une grande proximité dans
 996 les valeurs des flux interpolés sur les 2 années, quel que soit le modèle, avec un écart
 997 maximum de $25 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

998 Les flux de CH₄ entachés d'une erreur importante, sont cependant beaucoup plus
 999 faible en valeur absolue que ceux de la PPB ou de la RE. On y observe malgré tout un
 1000 flux qui fait plus que doubler en 2014 par rapport à 2013.

1001 Les bilans issus des différentes combinaisons (à l'exception de RE-3, très proche de
 1002 RE-2) de modèles sont présentés dans le tableau [3.3](#) et varient de $-233 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$
 1003 à $+12 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ stocké dans la tourbière. L'intégration de la végétation dans la
 1004 modélisation de PPB fait baisser les bilans de carbone dans le négatif au-delà de
 1005 $-200 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, avec une différence entre les bilans de $220 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ environ.
 1006 Cette différence sur les bilans est bien moindre, environ $26 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ entre les mo-
 1007 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 ±10 % de chacun des paramètres des modèles.

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

1008 Évaluation du bilan

1009 L'analyse de sensibilité, consistant à faire varier chaque paramètre des modèles
 1010 de ±10 %, les combinaisons de modèles PPB-1, PPB-2, RE-1 et RE-3 ont été testé
 1011 (Tableau 3.4). Le modèle RE-2, très proche du modèle RE-3 n'a pas été testé. **Attente**
 1012 **du COD, les valeurs du tableau sont fausse pour le moment**

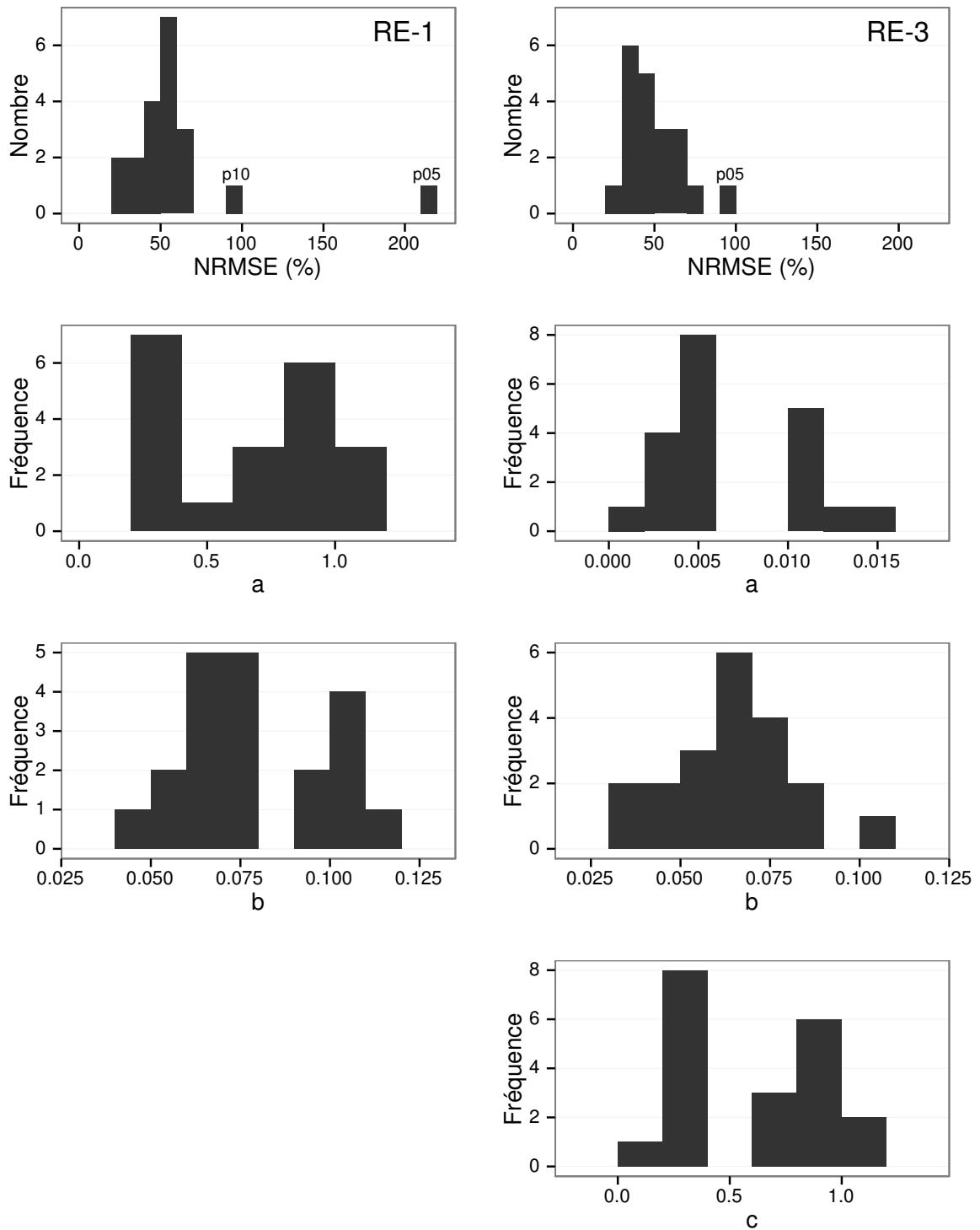


FIGURE 3.19 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres des modèles RE-1 et RE-3

3.3. Résultats

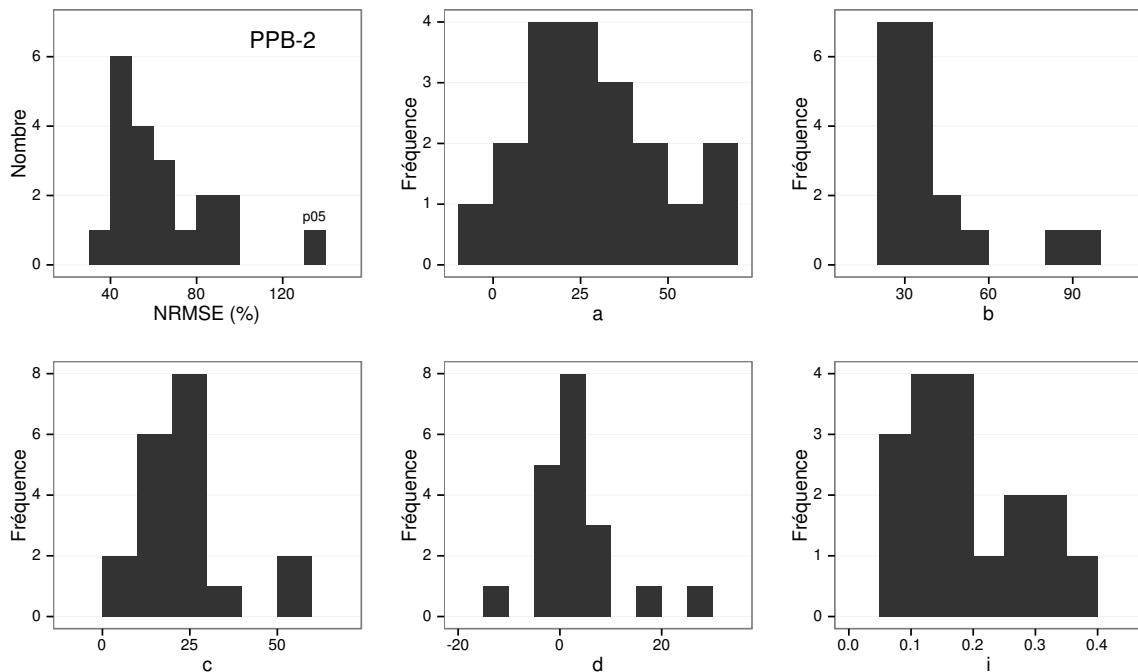


FIGURE 3.20 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2

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-

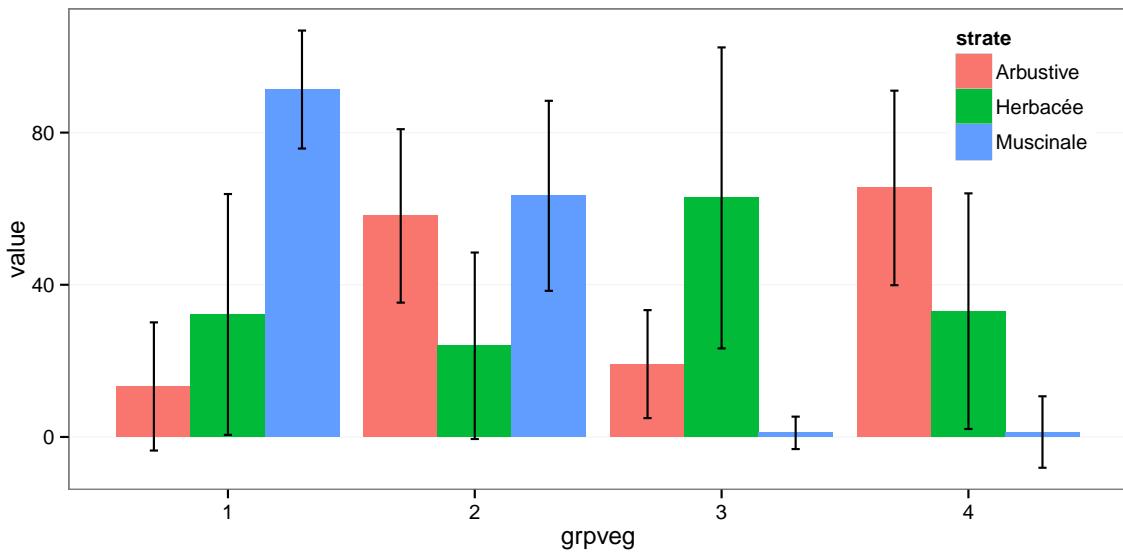


FIGURE 3.21 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2

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

1036 Modélisation par placette

1037 Corrélation avec facteurs contrôlant

1038 3.4 Discussion

1039 3.4.1 Estimations des flux

1040 PPB

1041 L'estimation des flux de PPB, est comprise entre 957 et 1322 gC m⁻² an⁻¹ selon
1042 l'année et le modèle utilisé. Ces valeurs sont très élevées comparées à des tourbières
1043 boréales comme celles étudiées par ([Trudeau et al., 2014](#)) ou encore ([Peichl et al., 2014](#))
1044 dont les valeurs de PPB sont respectivement comprise entre 123 et 131 gC m⁻² an⁻¹
1045 et entre 203 et 503 gC m⁻² an⁻¹. Une première hypothèse permettant d'expliquer une
1046 telle différence, est la différence entre les températures moyennes sur les sites. -4,3 °C
1047 et 1,2 °C respectivement pour [Trudeau et al. \(2014\)](#) et [Peichl et al. \(2014\)](#). Ces tempé-
1048 ratures sont bien plus faible pour les sites des études pré-citées que sur la tourbière de
1049 La Guette. Une seconde hypothèse, qui n'exclue pas la première, serait la composition
1050 végétale de ces sites. La tourbière de La Guette envahie par une végétation vasculaire,
1051 notamment herbacée, est peut-être plus proche d'une prairie tourbeuse. En effet lorsque
1052 la compare à ce type d'écosystèmes les valeurs observées sont plutôt proche. ([Jacobs](#)
1053 *et al., 2007*) estime des valeurs de PPB comprises entre 400 et 2000 gC m⁻² an⁻¹ avec
1054 une moyenne de 1300 gC m⁻² an⁻¹ dans des prairies tourbeuses hollandaises. Sur des
1055 écosystèmes similaires, au Danemark, ([Görres et al., 2014](#)) trouve des valeurs de PPB
1056 plus importantes encore, entre 1555 et 2590 gC m⁻² an⁻¹. Il apparaît cohérent que la
1057 tourbière de La Guette, par sa position géographique, et donc le climat qu'elle subit,
1058 mais également par sa problématique d'envahissement important par une végétation
1059 vasculaire notamment herbacée, s'approche en termes de flux de site tourbeux utilisés
1060 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 $74 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

1084 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

1089 2014; Trudeau *et al.*, 2014) (pour reprendre les études citées précédemment) qui s'éta-
1090 blissent respectivement entre 137 et 443 gC m⁻² an⁻¹ et 206 et 234 gC m⁻² an⁻¹. Elles
1091 sont en revanche plus faible que celle mesurées par (Jacobs *et al.*, 2007), entre 500 et
1092 2000 gC m⁻² an⁻¹, ou par (Görres *et al.*, 2014) : entre 2070 et 3500 gC m⁻² an⁻¹.

1093 À l'inverse de la PPB, l'intégration de la végétation pour modéliser la RE n'amé-
1094 liore que peu l'estimation de la RE lors de la phase de calibration : la différence entre
1095 les valeurs d'erreur standard est de 5 %. En revanche lors de la phase d'évaluation,
1096 l'utilisation du recouvrement des herbacées semble améliorer l'estimation de façon plus
1097 importante avec une différence de 11 % entre les valeurs d'erreur standard. Contraî-
1098 rement à la PPB la différence apportée par l'intégration de la végétation (RE-2 ou
1099 RE-3) est du même ordre de grandeur en 2013 et en 2014. Sur les 2 années, l'effet
1100 de l'intégration de la végétation est limité avec une différence de 25 gC m⁻² an⁻¹ au
1101 maximum (entre ER-1 et ER-3), soit moins de 2 % du flux. Encore une fois l'intérêt
1102 de l'évaluation est mis en avant puisqu'il permet de distinguer des modèles très proche
1103 lors de la calibration.

1104 Les incertitudes sur l'estimation des paramètres RE sont beaucoup moins impor-
1105 tante que celle de la PPB. L'estimation des paramètres des modèles, à l'exception du
1106 paramètre c du modèles RE-2, ont une p-value inférieure à 0.05. L'erreur calculée lors
1107 de l'évaluation de ces modèles, si elle augmente par rapport à la calibration, reste faible
1108 particulièrement pour le modèle RE-3 où elle vaut moins de 25 %. La RE semble donc
1109 relativement contrainte, avec une estimation des paramètres fiable et une différence
1110 entre les estimations issues des modèles relativement limitée.

1111 CH₄

1112 Les flux de CH₄ sont faibles comparés aux flux de CO₂. Les valeurs mesurées sont
1113 plus forte que celles mesurés entre 0 et 0,03 μmol m⁻² s⁻¹ par Bortoluzzi *et al.* (2006).
1114 Pour 2013 les valeurs mesurées sont proches de celle mesurée par Long *et al.* (2010).
1115 L'absence d'étiage en 2014 explique peut-être le doublement des flux... (**Réf needed**)

1116 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)

1119 COD

1120 3.4.2 Estimations des bilans

1121 D'une manière générale, les bilans sont principalement contraint par les flux de CO₂,
1122 le CH₄ ne jouant qu'un rôle marginal en termes de quantité de carbone. Ces observations
1123 sont cohérentes avec d'autres études comme [Bortoluzzi et al. \(2006\)](#); [Worrall et al.](#)
1124 ([2009](#)). La forte variabilité entre les différents bilans est à attribuer en grande majorité
1125 à l'erreur sur l'estimation du flux de PPB.

1126 Selon le bilan considéré, la tourbière de La Guette stocke légèrement du C pour
1127 une dizaine de grammes par mètre carré, ou relâche du carbone dans l'atmosphère soit
1128 un légèrement, soit de façon important pour plus de 200 gC m⁻² an⁻¹. La tourbière de
1129 La Guette ayant subie un drainage et un envahissement important d'une végétation
1130 vasculaire, ces derniers chiffres ne sont pas incohérents.

1131 3.4.3 Sensibilité et limitations du bilan

1132 Les incertitudes les plus fortes du bilan sont sur les flux de CH₄ avec une erreur
1133 standard de 32 % lors de la calibration et de 68 % lors de la validation. Cette différence
1134 importante montre que l'estimation des flux de CH₄ à l'aide de l'indice de végétation
1135 à permis l'estimation de sa contribution au bilan de carbone de l'écosystème, mais que
1136 sont utilisation dans d'autre conditions est fortement limité. L'importance faible du
1137 CH₄ dans le bilan de carbone de la tourbière rend ces erreurs moins critiques que celles
1138 faite lors de l'estimation de la PPB. Les incertitudes importantes sur la PPB, sont
1139 mise en évidence par les variations fortes des flux interpolés selon l'équation utilisée.
1140 Elles sont la source des variations observées en termes de bilan. L'ajout d'un indice de
1141 végétation diminue d'incertitude des paramètres du modèle, mais cet apport semble
1142 spécifique à l'étude, n'étant pas reflété par l'évaluation. À l'inverse la RE semble rela-

3.4. Discussion

1143 tivement bien contrainte, sur les 2 années la différence entre les différentes équations
1144 utilisées ne dépassent pas $25 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

1145 sensibilité du bilan au variation des paramètres

1146 **limitations** Outre ces aspects ce bilan de carbone est aussi limité par sa repré-
1147 sentativité. Ainsi la strate arborée fortement présente dans certaines zones n'est pas
1148 directement prise en compte. De la même manière une partie restreinte de la tourbière
1149 mais néanmoins présente est constitué de touradons dont l'effet n'a pas été pris en
1150 compte. (**Réf needed**) (**biblio effet microtype**).

- 1151 — pas de cartographie (pas grave si p7 maj bien représentée par mdl ecos)
1152 — extrapolation sur d'autres site difficile (cf validation)

1153 3.4.4 Représentativité locale du modèle

1154 Distribution des paramètres

1155 Pourquoi certaines placette mieux que d'autres

1156 Concernant la respiration la représentativité locale des modèles calibrés à l'échelle
1157 de l'écosystème semble plus homogène pour le modèle RE-3 que pour le modèle RE-1.

1158 Une telle comparaison entre PPB-1 et PPB-2 n'a pas été possible car vu le faible
1159 nombre de données et la qualité relative des modèles PPB par rapport aux modèles
1160 RE, peu de modèles sont parvenus à converger pour PPB-1 (11 sur 20 placettes) et
1161 pour PPB-2 (17 sur 20 placettes).

1162 3.4.5 Variation du bilan avec la végétation

1163 Le calcul des bilans avec les groupes de végétation permet de mettre en évidence
1164 des comportements différents des flux selon la végétation majoritaire. Ainsi le groupe 3
1165 dans lequel la strate herbacée est la plus importante est celui où la PPB est la plus forte.
1166 Ce point semble en cohérence avec la croissance annuelle importante des herbacées. À
1167 l'inverse le groupe 1 dans lequel la strate muscinale est la plus importante est également
1168 le groupe pour lequel la PPB est la plus faible. (**Réf needed**)

₁₁₆₉ Pour la RE, ce sont les groupes 3 et 4 qui ont les flux estimés les plus importants
₁₁₇₀ avec une différence d'environ $200 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ avec les deux autres groupes. Malgré
₁₁₇₁ leurs différences, le groupe 2 possède une strate muscinale importante alors qu'elle est
₁₁₇₂ absente dans le groupe 3, ils ont en commun d'avoir une strate arbustive importante.

₁₁₇₃ **3.4.6 perspectives**

₁₁₇₄ cartographie ?

1175 4 Effets de l'hydrologie sur les flux de GES

1176

1177	4.1 Introduction	76
1178		
1179	4.2 Procédure expérimentale	77
1180	4.2.1 Expérimentation A	78
1181	4.2.2 Expérimentation B	78
1182	4.2.3 traitement	79
1183	4.3 Résultats	80
1184	4.3.1 Expérimentation A	80
1185	4.3.2 Expérimentation B	83
1186	4.3.3 tendances générales	86
1187	4.4 Discussion	86
1188	4.4.1 Comparaison aux mesures <i>in-situ</i>	86
1189	4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de gaz	88
1190	4.4.3 Effet cycles multiples	89
1192		

₁₁₉₃ 4.1 Introduction

₁₁₉₄ Au cours des deux années qu'ont duré les suivis des émissions de flux de CO₂ et
₁₁₉₅ de CH₄ sur la tourbière de La Guette, le niveau de la nappe n'a que très faiblement
₁₁₉₆ varié comparé aux années précédentes bien plus sèches. En conséquence de cette faible
₁₁₉₇ variation peu de variations des flux ont pu y être relié. Malgré tout il est connu que
₁₁₉₈ l'hydrologie est un facteur contrôlant important des flux.

₁₁₉₉ Ainsi de nombreuses études ont reliées les émissions de CO₂ au niveau de la nappe
₁₂₀₀ avec, cependant, des résultats et des conclusions variables. La majorité des études
₁₂₀₁ montrent qu'une tourbière dont le niveau de la nappe est abaissé, soit par un drainage,
₁₂₀₂ soit par une sécheresse, aura tendance à avoir un ENE plus faible : Ainsi [Strack et](#)
₁₂₀₃ [Zuback \(2013\)](#) expliquent des valeurs d'ENE plus faibles qu'escompté, par des mesures
₁₂₀₄ faites pendant une période relativement sèche. Une observation similaire est faite par
₁₂₀₅ [Aurela et al. \(2007\)](#) qui mesure un ENE plus faible lors d'une année sèche, sur une
₁₂₀₆ tourbière à Carex du sud de la Finlande. Ils attribuent la variation de l'ENE à une
₁₂₀₇ augmentation de la RE et à une baisse de la PPB, dans des conditions plus chaudes
₁₂₀₈ et plus sèches. [Peichl et al. \(2014\)](#) observent également une baisse de l'ENE lors d'une
₁₂₀₉ année où le niveau de la nappe baisse de façon importante, au delà de -30 cm. Ils
₁₂₁₀ expliquent cette baisse par une baisse de la PPB. Cette observation va dans le même
₁₂₁₁ sens que [Lund et al. \(2012\)](#) qui, lors de l'étude d'une tourbière située au sud de la suède,
₁₂₁₂ observent en 2008 une baisse de l'ENE. Les mesures de RE faites cette année là étant
₁₂₁₃ similaires à celles effectuées les autres années, ils lient cette baisse à une diminution
₁₂₁₄ de la PPB. En 2006, sur la même tourbière, [Lund et al. \(2012\)](#) observent une autre
₁₂₁₅ baisse de l'ENE. Mais cette fois, les mesures de PPB à leur tour similaires à celle
₁₂₁₆ des autres années n'expliquent pas cette baisse. À l'inverse de 2008, cette baisse est
₁₂₁₇ expliquée par une augmentation de la RE Ce paradoxe apparent est interprété grâce
₁₂₁₈ au type de sécheresse : courte et intense pendant la saison de végétation de 2006 et
₁₂₁₉ d'intensité plus faible mais d'une durée plus longue en 2008. Enfin et à l'inverse des

1220 résultats précédemment cités, [Ballantyne et al. \(2014\)](#) dans une étude des effets à long
 1221 terme d'une baisse du niveau de la nappe, n'observe que peu d'effet sur l'ENE tandis
 1222 que les flux de RE et de PPB augmentent tous deux. Toutes ces études montrent que
 1223 si le niveau de la nappe est incontestablement reconnu comme un facteur de contrôle
 1224 des flux de CO₂, il est difficile d'en dégager, avec certitude, un comportement valable
 1225 de façon générale.

1226 Concernant le méthane, une baisse du niveau de la nappe est généralement liée à
 1227 une baisse des émissions de CH₄, et inversement ([Strack et al., 2006; Pelletier et al.,](#)
 1228 [2007; Turetsky et al., 2008](#)). Cependant d'autres études, principalement dans des sites
 1229 où le niveau de la nappe est proche de la surface du sol, montrent une absence de
 1230 relation entre le niveau de la nappe et les émissions de méthane, voire une relation
 1231 inverse, avec des flux plus faibles liés à des niveaux de nappe plus élevés ([Kettunen](#)
 1232 [et al., 1996; Bellisario et al., 1999; Treat et al., 2007](#)). Là encore selon les conditions
 1233 environnementales, la relation entre les flux de CH₄ et le niveau de la nappe n'est pas
 1234 aisément généralisable.

1235 L'objectif de ce chapitre est donc d'explorer plus en avant l'effet du niveau de la
 1236 nappe sur les émissions de GES, effet peu ou pas visible *in-situ*. Plus précisément il
 1237 s'agit de déterminer l'effet de cycles de dessication/ré-humectation sur les émissions de
 1238 CO₂ et de CH₄.

1239 4.2 Procédure expérimentale

1240 L'étude des cycles de dessication/ré-humectation s'est effectué sur des mésocosmes,
 1241 prélevés sur la tourbière de La Guette. L'expérimentation a été testé durant l'été 2013
 1242 avec un seul cycle relativement long, on s'y référera par la suite comme l'expérimenta-
 1243 tion A. Cette expérimentation a été renouvelée l'été 2014 afin d'augmenter à trois le
 1244 nombre de cycles, ceux-ci étant plus court. On appellera cette seconde expérimentation,
 1245 l'expérimentation B (Tableau 4.1).

1246 4.2.1 Expérimentation A

1247 Le 12 avril 2013, ont été prélevés, sur la tourbière de La Guette 6 mésocosmes. Le
1248 prélèvement de mésocosmes s'effectue à l'aide de cylindres de PVC qui, dans un premier
1249 temps, posé sur le sol, permettent de faire un pré-découpage au couteau, puis dans un
1250 second temps sont insérés, délicatement, dans la tourbe. Les mésocosmes sont finale-
1251 ment dégagés en creusant de chaque côté (Figure 4.1). Les mésocosmes sont transportés
1252 au laboratoire où ils sont enterrés en extérieur et saturé en eau (eau prélevée dans la
1253 tourbière), afin que leur conditions hydrologique de départ soient les plus proche pos-
1254 sible (Figure 4.2). Trois mésocosmes sont choisi pour servir de contrôle, et trois vont
1255 subir un cycle de dessication/ré-humectation. À partir du 31 mars 2013 les précipita-
1256 tions ont été interceptées à l'aide d'abri bâchés installable rapidement en cas de pluie
1257 et la nuit. Ces interceptions ont été faites jusqu'au 17 juillet dans les 3 mésocosmes
1258 traités pour simuler une sécheresse. À cette date de l'eau est ajouté aux mésocosmes,
1259 que ce soit les contrôles ou les traitements, pour simuler de fortes précipitations.

1260 4.2.2 Expérimentation B

1261 Le 17 avril 2014, 6 nouveaux mésocosmes ont été prélevés sur la tourbières de La
1262 Guette et installé près du laboratoire, en suivant le même protocole que pour l'expéri-
1263 mentation A. Une station météo a été installée à côté des mésocosmes afin de mesurer
1264 la température de l'air, l'humidité relative, l'irradiation solaire, la vitesse et la direction
1265 du vent et les précipitations toutes les 15 minutes. Cette station permettait également
1266 l'enregistrement des températures mesurées par des sondes (T107) installées à -5, -10,
1267 et -20 cm. Les conditions météorologiques moins ensoleillée qu'en 2013 et l'objectif de
1268 suivre plusieurs cycles de dessication/réhumectation ont nécessité la mise en place
1269 d'un abaissement manuel du niveau de la nappe. Pendant les phases d'assèchement les
1270 niveaux de nappes des placettes traitées étaient donc abaissés en moyenne de 2,5 cm
1271 par jour. Le premier cycle de dessication/réhumectation dura du 30 juin au 6 juillet
1272 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

¹²⁷³ Le deuxième cycle dura du 17 au 28 juillet et du 29 juillet au 3 aout, Enfin le dernier
¹²⁷⁴ cycle fut mesuré du 4 au 11 aout pour la dessication et du 12 au 14 aout pour la
¹²⁷⁵ réhumectation.

¹²⁷⁶ 4.2.3 traitement

¹²⁷⁷ Les flux sont moyennés par jour de mesure.

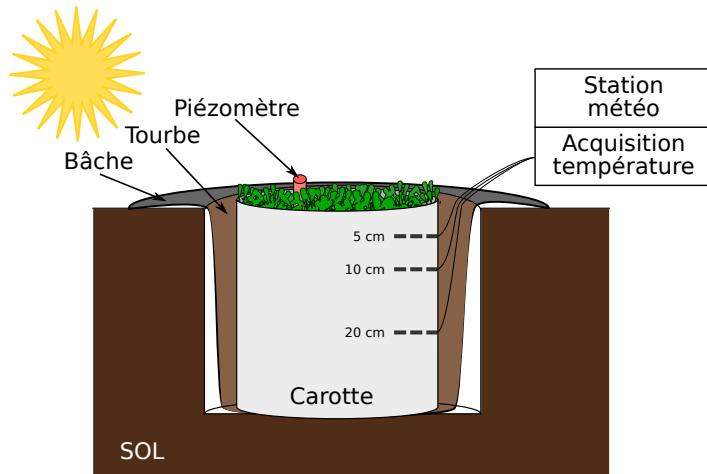


FIGURE 4.2 – Schéma d'un mésocosme

¹²⁷⁸ 4.3 Résultats

¹²⁷⁹ 4.3.1 Expérimentation A

¹²⁸⁰ Pendant la phase de dessication de l'expérimentation A, on observe une baisse du
¹²⁸¹ niveau de la nappe pour les placettes contrôles comme pour les placettes traitements
¹²⁸² (Figure 4.3–A). Malgré tout leur comportement est différent : les placettes contrôles ont
¹²⁸³ un niveau de nappe relativement élevé jusqu'au 24 juin puis ce niveau baisse fortement
¹²⁸⁴ alors que les placettes du groupe traité ont un niveau de nappe qui diminue de façon
¹²⁸⁵ plus continue sur l'ensemble de la phase. La remontée du niveau de la nappe s'effectue
¹²⁸⁶ de façon similaire pour les deux groupes. Enfin après la phase de ré-humectation, le
¹²⁸⁷ niveau de la nappe baisse à nouveau, plus rapidement pour le groupe traitement que
¹²⁸⁸ pour le groupe contrôle.

¹²⁸⁹ Les émissions de CH_4 , s'étendant de 0 et $0,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sont relativement si-
¹²⁹⁰ milaires entre les deux groupes jusqu'au 24 juin 2013, date à partir de laquelle ils
¹²⁹¹ commencent à diverger (Figure 4.3–B). À cette date les émissions du groupe contrôle
¹²⁹² augmentent rapidement pour atteindre $0,55 \pm 0,31 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ tandis que celles du
¹²⁹³ groupe traité restent stable. Finalement mi-juillet, à la fin de la phase de dessicca-
¹²⁹⁴ tion les deux groupes retrouvent des niveaux d'émission similaires compris entre 0,1 et

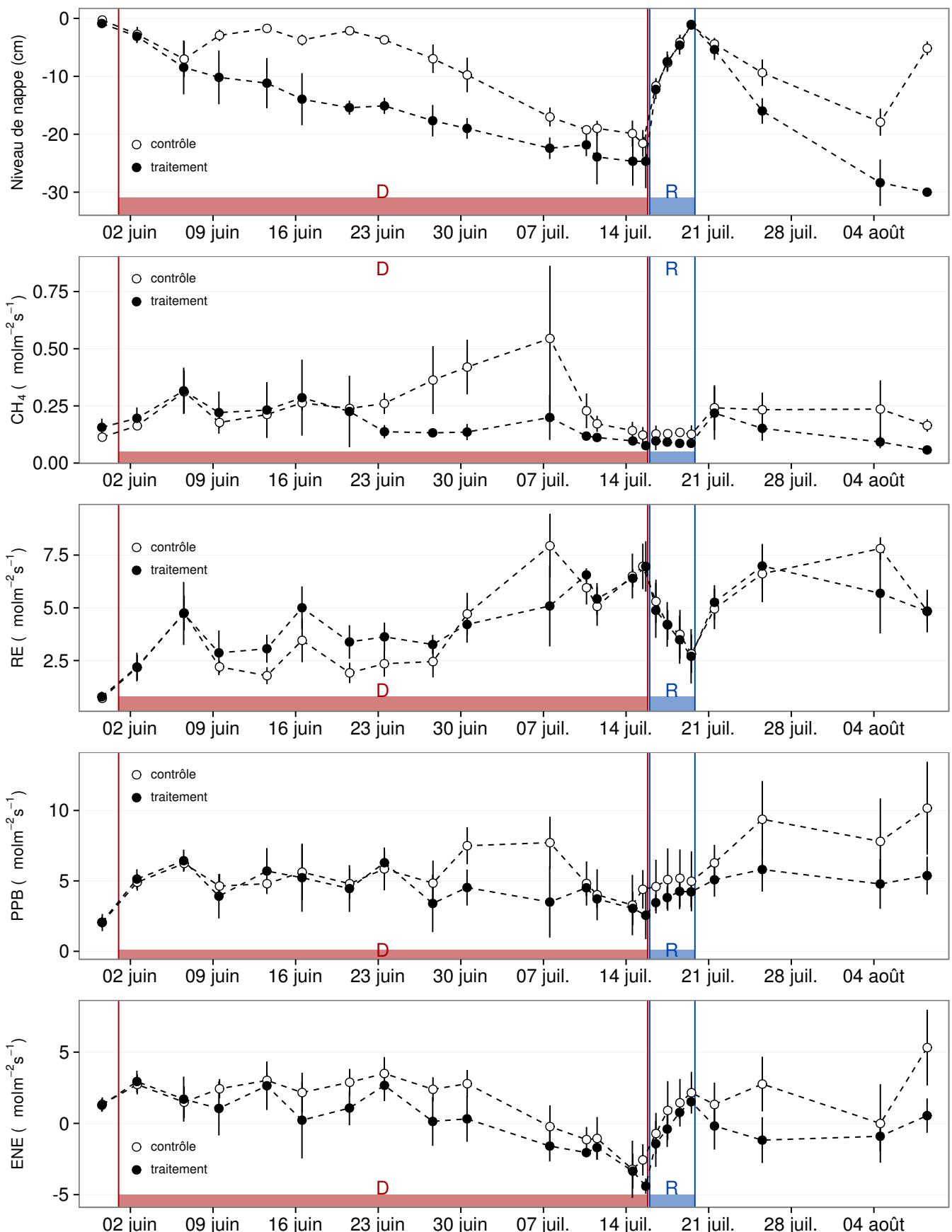


FIGURE 4.3 – Expérimentation A : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH_4 , RE, PPB, ENE en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent à la phase de dessiccation (D) en rouge et à la phase de réhumémentation (R) en bleu.

4.3. Résultats

1295 0,2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ces niveaux restent constant pendant toute la phase de réhumecta-
1296 tion, avant d'augmenter légèrement par la suite ; ils ne dépassent pas 0,25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
1297 mais franchissent la barre des 0,2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

1298 Pendant la phase de dessication, les valeurs de la RE tendent à augmenter quel
1299 que soit le groupe de placettes considéré (Figure 4.3–C). Ces valeurs inférieures à
1300 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
1301 mi-juillet, avant la réhumectation. Dans le détail cependant les deux groupes ne se
1302 comportent pas de la même façon : la RE du groupe traité augmente régulièrement
1303 pendant l'ensemble de cette phase, tandis que les valeurs du groupe de contrôle res-
1304 tent, dans un premier temps, stable jusqu'à fin juin. La RE de ce groupe vaut alors
1305 $2,45 \pm 0,75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ contre $3,26 \pm 0,46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le groupe traité. Cet
1306 écart, pouvant varier dans le temps, étant installé depuis le 9 juin. À partir de dé-
1307 but juillet, les valeurs de RE du groupe de contrôle augmentent fortement dépas-
1308 sant les valeurs du groupe traité. La RE de ce groupe atteint alors un maximum à
1309 $7,93 \pm 1,52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ le 8 juillet avant de retrouver des valeurs proche de celles ob-
1310 servées dans le groupe traité. Cette augmentation brusque correspond temporellement
1311 à celle observée, pour le même groupe, dans les flux de CH₄. Lors de la phase de réhu-
1312 mectation, les flux de RE diminuent de façon très similaire pour les deux groupes ou
1313 ils atteignent un minimum proche de 2,75 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ce minimum reste cependant
1314 plus élevé que les valeurs mesurées initialement. Après la phase de réhumectation, les
1315 flux des deux groupes restent relativement proches pendant le reste des mesures, où ils
1316 remontent à mesure que le niveau de la nappe diminue à nouveau.

1317 Pour les deux groupes, les flux de PPB restent relativement stables pendant la
1318 phase de dessiccation (Figure 4.3–D). Jusqu'au 24 juin, les flux des deux groupes sont
1319 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
1320 moyenne pour les deux groupes). Après cette date, et comme pour le CH₄ et la RE,
1321 les valeurs de la PPB du groupe de contrôle augmentent et s'écartent de celles me-
1322 surées dans le groupe traité, en attendant de les rejoindre avant la fin de cette phase
1323 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

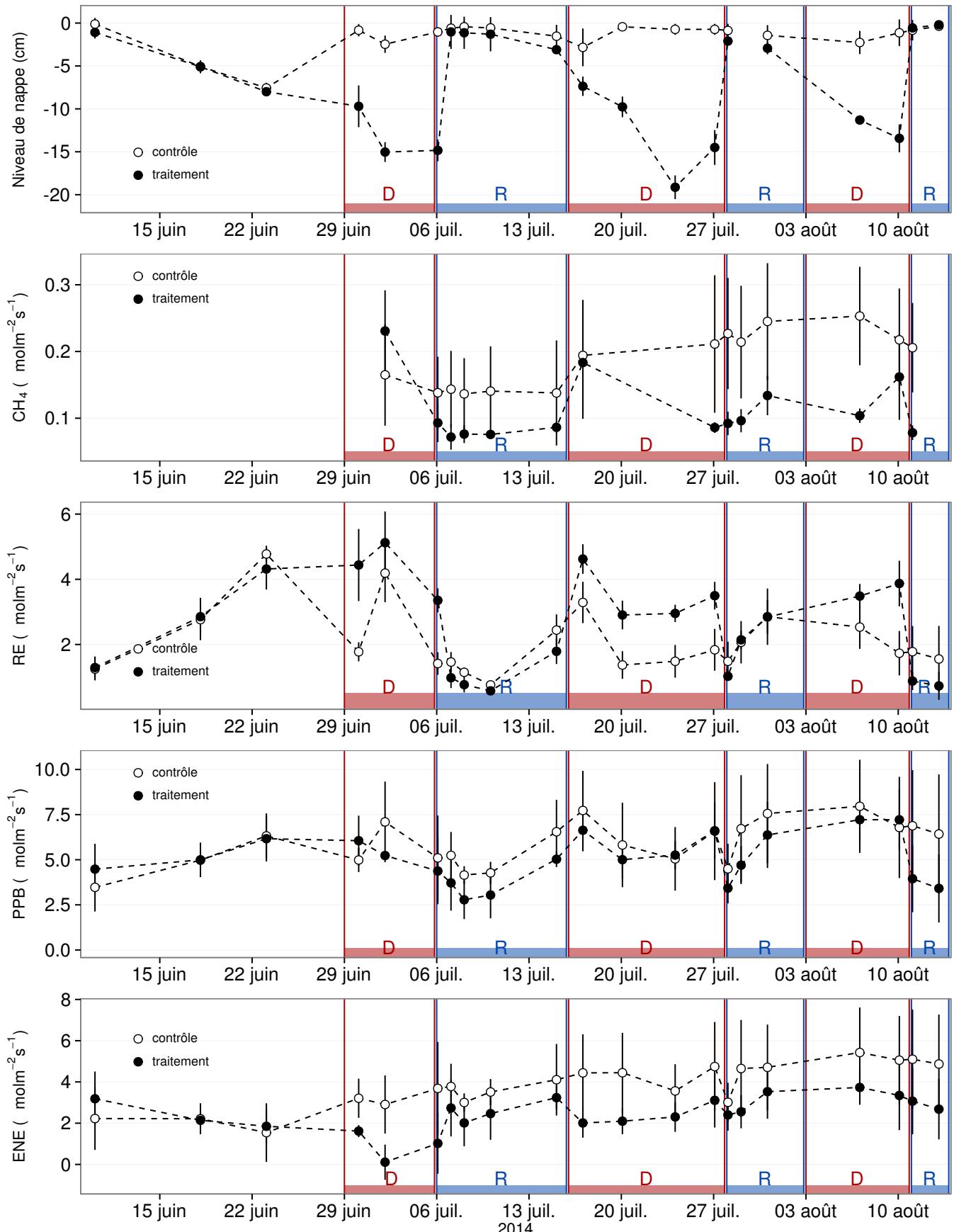


FIGURE 4.4 – Expérimentation B : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH_4 , RE, PPB, ENE en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent aux phases de dessiccation (D) en rouge et aux phases de réhumectation (R) en bleu.

1352 d'une quinzaine de centimètres en moyenne pour chaque cycle (Figure 4.4–A).

1353 Les flux de CH₄ moyen s'étendent de 0,07 à 0,34 µmol m⁻² s⁻¹. Les flux du groupe
1354 de contrôle, à l'exception de la première mesure, sont supérieurs aux flux du groupe
1355 traité, leurs moyennes respectives sur l'ensemble des mesures étant de 0,20 ± 0,06 et
1356 0,11 ± 0,05 µmol m⁻² s⁻¹ respectivement. Les émissions du groupe de contrôle tendent
1357 à augmenter sur la période de mesure. Une tendance similaire, quoique moins mar-
1358 quée, est également visible pour le groupe traité. Concernant les cycles de dessicca-
1359 tion/réhumectation, il est difficile de dégager des comportements communs, même s'il
1360 semble que l'assèchement conduit à une baisse des émissions (Figure 4.4–B) Cette re-
1361 lation, mise en exergue pas un nombre de points très faible, n'apparaît cependant pas
1362 sur l'ensemble des données (Figure 4.5–B) Un pic d'émission de CH₄ est également à
1363 noter pour chaque cycle pendant la phase de dessiccation.

1364 La RE varie pour les deux groupes entre 0,42 et 5,12 µmol m⁻² s⁻¹ (Figure 4.4–C)).
1365 Avant le démarrage des manipulations du niveau de la nappe, les valeurs des deux
1366 groupes sont très proches et augmentent tandis que le niveau de nappe diminue. Pen-
1367 dant les phases de dessiccation, les valeurs du groupe traité sont systématiquement supé-
1368 rieures, de 1,5 à 1,8 µmol m⁻² s⁻¹ en moyenne par phase, par rapport à celle du groupe
1369 de contrôle. À l'inverse pendant les phases de réhumectation les flux entre les deux
1370 groupes sont beaucoup plus proches avec une tendance de la RE du groupe de contrôle
1371 à être au dessus de celle du groupe traité. La RE du groupe traité est systématiquement
1372 plus faible pendant les phases de réhumectations que pendant les phases de dessicca-
1373 tions. En moyenne la RE vaut respectivement 2,28 ± 1,00 et 3,86 ± 0,80 µmol m⁻² s⁻¹
1374 pour les groupes de contrôle et traité pendant les phases de dessiccation et 1,70 ± 0,62
1375 et 1,51 ± 0,98 µmol m⁻² s⁻¹ pendant les phases de réhumectation.

1376 Sur l'ensemble de la période de mesure la PPB est comprise entre 2,78 et 7,96 µmol m⁻² s⁻¹.

1377 Avant le début des traitements les flux des deux groupes sont similaires (Figure 4.4–D).
1378 La première phase de dessiccation fait passer la PPB du groupe de contrôle au dessus
1379 du groupe traité. Pour les deux groupes, la PPB est plus importante lors des phases
1380 de dessiccation comparée aux phase de réhumectation, avec des moyennes respectives

4.4. Discussion

1381 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
1382 $4,05 \pm 1,60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le groupe traité.

1383 Les valeurs d'ENE mesurées sont comprises entre $0,11$ et $5,42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, elles
1384 ont tendance à augmenter au cours du temps. Passé la période pré-traitements pendant
1385 laquelle les flux de l'ENE sont similaires pour les deux groupes l'ENE du groupe de
1386 contrôle est systématiquement supérieure à celle du groupe de traitement (Figure 4.4–
1387 E). L'évolution des deux groupes reste cependant relativement conjointe pendant la
1388 période de mesure avec pour le groupe traité une diminution récurrente de l'ENE au
1389 début de chaque phase de dessiccation.

1390 4.3.3 tendances générales

1391 Pour les deux expérimentations une relation nette est visible entre le niveau de la
1392 nappe et l'ENE qui diminue lorsque le niveau de nappe augmente (Figure 4.5–G,H).
1393 La relation inverse est visible, pour les deux expérimentations, entre la RE et le niveau
1394 de la nappe (Figure 4.5–C,D). La PPB par contre ne montre aucune tendance claire
1395 quelle que soit l'expérimentation. On peut malgré tout noter que les valeurs de PPB les
1396 plus faibles correspondent aux niveaux de nappe les plus élevés(Figure 4.5–E,F). Pour
1397 le méthane, que ce soit pour l'expérimentation A ou B, aucune tendance ne semble se
1398 dégager vis à vis du niveau de la nappe (Figure 4.5–A,B).

1399 4.4 Discussion

1400 4.4.1 Comparaison aux mesures *in-situ*

1401 Les flux moyen de CH_4 mesurés dans les mésocosmes des deux expérimentations
1402 font partie des valeurs hautes mesurées sur le terrain. Certaines campagnes dépassent
1403 nettement, en faisant plus que doubler, le maximum de $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mesuré en
1404 2014 sur la tourbière de La Guette.

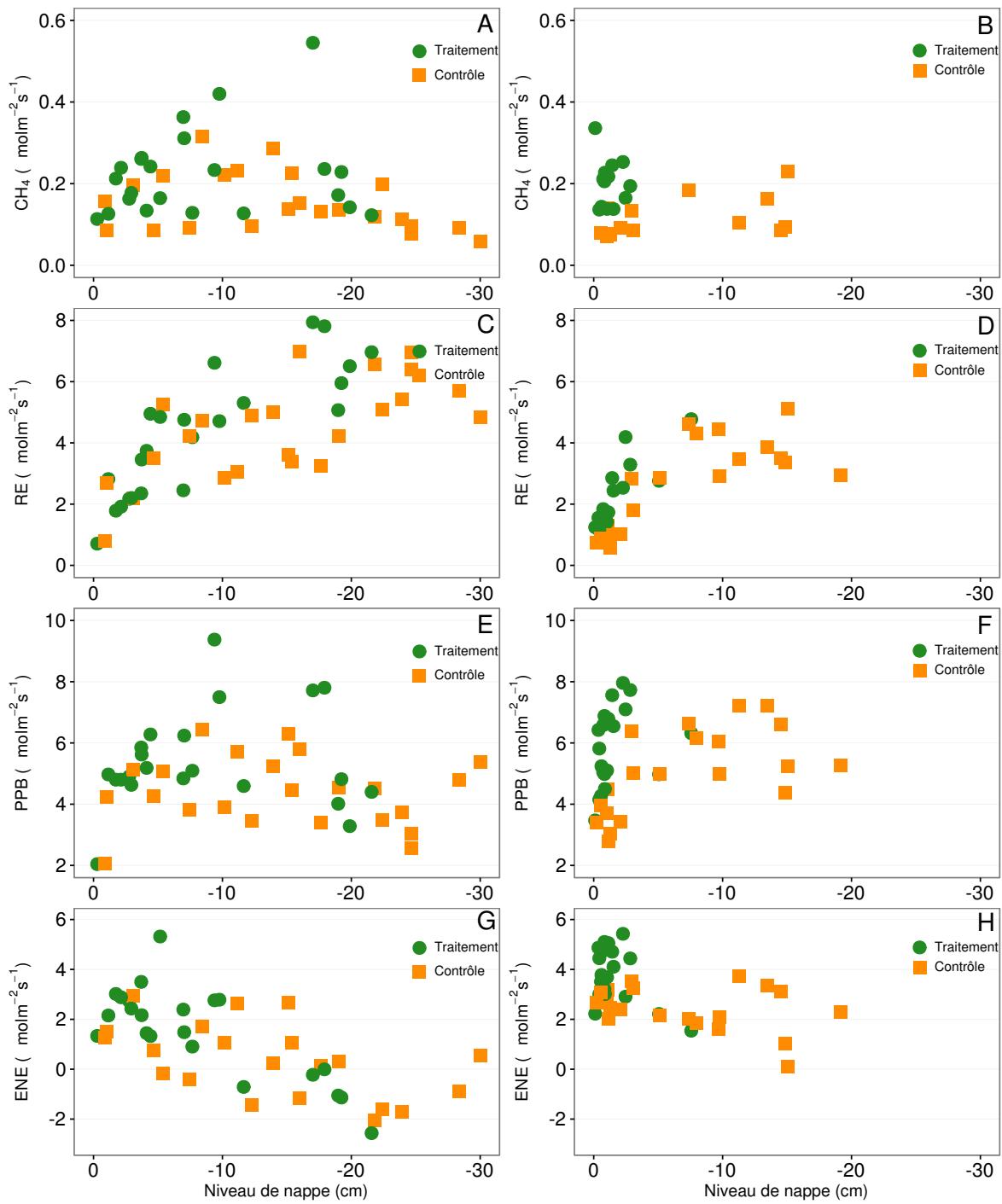


FIGURE 4.5 – Relations entre les flux de GES et le niveau de la nappe

4.4. Discussion

1405 Pour le CO₂ les flux sont généralement dans la gamme des valeurs mesurée sur la
1406 tourbière de La Guette. Pour l'expérimentation A, l'ENE moyen est plus faible que
1407 celui mesuré sur le terrain la même année : 0,81 contre 2,85 µmol m⁻² s⁻¹. Pour l'expé-
1408 rimentation B en revanche l'ENE moyen vaut 0,71 µmol m⁻² s⁻¹ ce qui est relativement
1409 proche de celui mesuré sur le terrain : 2,93 µmol m⁻² s⁻¹. Les flux de RE et de PPB
1410 sont moins fort que les flux mesurés sur le terrain mais restent dans leur gamme de
1411 valeurs. Ces comparaisons sont par ailleurs à relativiser puisque les mesures de flux
1412 n'ont pas nécessairement lieu aux mêmes moment de la journée.

1413 Comme pour la RE, les flux de PPB sont du même ordre de grandeur que ceux me-
1414 surés sur le terrain, mais légèrement plus faible : les maxima moyens mesurés dans les
1415 mésocosmes sont d'environ 7,5 pour des valeurs de 13 µmol m⁻² s⁻¹ mesuré directement
1416 sur la tourbière.

1417 4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de 1418 gaz

1419 Les résultats de ces deux expérimentations montrent clairement une augmentation
1420 de la RE quand le niveau de la nappe diminue. Ceci est en accord avec les résultats
1421 d'autres études que ce soit in-situ (Ballantyne *et al.*, 2014) ou en mésocosmes (Blodau
1422 *et al.*, 2004; Dinsmore *et al.*, 2009). Dans ces deux dernières publications, la baisse
1423 du niveau de la nappe diminue la PPB. Pas de variations claires de la PPB n'est vi-
1424 sible dans les données présentées, même si une légère tendance semble émergée aux
1425 plus fortes profondeur de nappe pour l'expérimentation A, ces observations restent à
1426 confirmer. Cette absence d'effet du niveau de la nappe sur la PPB peut, peut être,
1427 être liée à la profondeur des mésocosmes (30 cm). En effet dans Blodau *et al.* (2004)
1428 et Dinsmore *et al.* (2009), les mésocosmes utilisés sont plus grands, 75 et 41 cm res-
1429 pectivement, ont permis d'abaisser le niveau de l'eau au delà de -30 cm. Cette limite
1430 a été rapportée plusieurs fois comme étant un seuil au delà duquel son observés des
1431 changements importants (Blodau *et al.*, 2004; Peichl *et al.*, 2014). Ce seuil est expliqué
1432 comme étant la limite au delà de laquelle les forces de capillarités ne permettent plus

1433 d'alimenter en eau les sphaignes (Rydin et Jeglum, 2013b; Ketcheson et Price, 2014).
1434 Il résulte des constats précédents qu'une baisse du niveau de nappe, faisant augmenter
1435 la RE et ne changeant pas ou peu la PPB, conduit à une baisse de l'ENE. Cette di-
1436 minution de l'ENE est cohérente avec la littérature, que ce soit des expérimentations
1437 en mésocosmes (Aerts et Ludwig, 1997; Blodau *et al.*, 2004), ou in-situ (Bubier *et al.*,
1438 2003; Sonnentag *et al.*, 2010). Malgré tout l'extrapolation de ses résultats à d'autres
1439 situations n'est pas évidente car fortement fonction du contexte. D'autre études n'ont,
1440 par exemple, pas observé d'influence du niveau de la nappe sur la RE (Updegraff *et al.*,
1441 2001). Par ailleurs Laiho (2006) a montré l'importance du contexte et notamment celui
1442 de l'échelle de temps considéré qui peut impliquer des phénomènes différents et donc
1443 avoir des conséquences différentes.

1444 La dépendance entre les flux de CH₄ et le niveau de la nappe, devant conduire à une
1445 baisse des émissions quand le niveau de la nappe diminue, comme décrite dans Aerts et
1446 Ludwig (1997), Pelletier *et al.* (2007) ou Turetsky *et al.* (2008), n'a pas été clairement
1447 observée. Ce constat rejoins d'autres études dans lesquelles une relation inverse ou un
1448 absence de relation a été trouvé entre le CH₄ et le niveau de la nappe Kettunen *et al.*
1449 (1996); Bellisario *et al.* (1999); Treat *et al.* (2007). L'observation d'un pic de méthane
1450 suivant de quelques jours une phase de hausse du niveau de la nappe, est également
1451 rapportée par Kettunen *et al.* (1996). (**And so what ?**)

1452 4.4.3 Effet cycles multiples

1453 5 Variation journalière de la respiration de l'écosystème (article)

1456	5.1 Introduction	93
1457		
1458	5.2 Procédure expérimentale et analytique	93
1459	5.2.1 Synchronisation des données	93
1460	5.2.2 Différence entre mesures de jour et mesures de nuit	93
1461	5.2.3 Caractérisation physico-chimique	93
1462	5.3 Résultats	93
1463	5.3.1 Température de l'air et variabilité de RE	93
1464	5.3.2 Synchronisation RE et température du sol	93
1465	5.3.3 Équations utilisées	93
1466	5.3.4 Relation entre RE et la température	93
1467	5.3.5 Évolution du Q10	93
1468	5.3.6 Différence entre mesures de jour et de nuit	93
1469	5.3.7 Caractérisation de la tourbe	93
1470	5.4 Discussion	93
1471	5.4.1 Différence de RE entre les différents sites	93
1472	5.4.2 Temps de latence entre température et RE	93
1473	5.4.3 La synchronisation entre RE et la température améliore la représentation de la sensibilité de RE à la température	93
1474	5.4.4 Différence entre mesure de RE faite le jour et la nuit	93
1475	5.4.5 La sensibilité du Q10 à la profondeur de la température et à la synchronisation	93
1476		
1477		
1478		

5.4. Discussion

₁₄₈₀ 5.1 Introduction

₁₄₈₁ 5.2 Procédure expérimentale et analytique

₁₄₈₂ 5.2.1 Synchronisation des données

₁₄₈₃ 5.2.2 Différence entre mesures de jour et mesures de nuit

₁₄₈₄ 5.2.3 Caractérisation physico-chimique

₁₄₈₅ 5.3 Résultats

₁₄₈₆ 5.3.1 Température de l'air et variabilité de RE

₁₄₈₇ 5.3.2 Synchronisation RE et température du sol

₁₄₈₈ 5.3.3 Équations utilisées

₁₄₈₉ 5.3.4 Relation entre RE et la température

₁₄₉₀ 5.3.5 Évolution du Q10

₁₄₉₁ 5.3.6 Différence entre mesures de jour et de nuit

₁₄₉₂ 5.3.7 Caractérisation de la tourbe

₁₄₉₃ 5.4 Discussion

₁₄₉₄ 5.4.1 Différence de RE entre les différents sites

₁₄₉₅ 5.4.2 Temps de latence entre température et RE

₁₄₉₆ 5.4.3 La synchronisation entre RE et la température améliore

₁₅₀₁ Conclusions et perspectives

₁₅₀₂ 5.5 Bilan du bilan (de C) ?

₁₅₀₃ Flux fort
₁₅₀₄ sensibilité param forte
₁₅₀₅ Modèles multi annuel et pr ise en compte de la végétation
₁₅₀₆ Quid des variations journalières dans un bilan annuel ?
₁₅₀₇ Les prendre en compte améliorerait-il les modèles
₁₅₀₈ modèles globaux ? **limitations deséquations** : Plus généralement, la majorité des
₁₅₀₉ tourbières sont sous la neige une partie de l'année, ce qui n'arrive que rarement sur
₁₅₁₀ la tourbière de La Guette et une partie possède également des zones d'eau libre, qui
₁₅₁₁ n'existent pas sur ce site.
₁₅₁₂ modèles globaux et profondeur de tourbe

₁₅₁₃ 5.6 Résilience de la tourbe par rapport aux

₁₅₁₄ 2 années sèches qui précèdent le BdC

₁₅₁₅ (lien chap 3 et 4)

₁₅₁₆ 5.7 Ouverture vers d'autre méthodes de me-

₁₅₁₇ sures

₁₅₁₈ — chambre automatique (lien chap 5, et chap 3 ?)
₁₅₁₉ — tour eddy covariance (lien chap 5 et chap 3 ?)

1520

Bibliographie

- 1521 AERTS, R. et LUDWIG, F. (1997). Water-table changes and nutritional status affect
1522 trace gas emissions from laboratory columns of peatland soils. *Soil Biology and*
1523 *Biochemistry*, 29(11–12):1691–1698.
- 1524 ALM, J., SAARNIO, S., NYKÄNEN, H., SILVOLA, J. et MARTIKAINEN, P. (1999). Winter
1525 CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeo-*
1526 *chemistry*, 44(2):163–186.
- 1527 ALM, J., TALANOV, A., SAARNIO, S., SILVOLA, J., IKKONEN, E., AALTONEN, H.,
1528 NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1997). Reconstruction of the carbon balance
1529 for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland. *Oecologia*, 110:423–431.
- 1530 ANDREJKO, M. J., FIENE, F. et COHEN, A. D. (1983). Comparison of ashing techniques
1531 for determination of the inorganic content of peats. In *Testing of Peats and Organic*
1532 *Soils : A Symposium*, volume 820, pages 5–10. ASTM International.
- 1533 AURELA, M., RIUTTA, T., LAURILA, T., TUOVINEN, J.-P., VESALA, T., TUITILA,
1534 E.-S., RINNE, J., HAAPANALA, S. et LAINE, J. (2007). CO₂ exchange of a sedge fen
1535 in southern Finland—the impact of a drought period. *Tellus B*, 59(5):826–837.
- 1536 BALLANTYNE, D. M., HRIBLJAN, J. A., PYPKER, T. G. et CHIMNER, R. A. (2014).
1537 Long-term water table manipulations alter peatland gaseous carbon fluxes in nor-
1538 thern Michigan. *Wetlands Ecol. Manage.*, 22(1):35–47.
- 1539 BEER, C., REICHSTEIN, M., TOMELLERI, E., CIAIS, P., JUNG, M., CARVALHAIS, N.,
1540 RÖDENBECK, C., ARAIN, M. A., BALDOCCHI, D., BONAN, G. B., BONDEAU, A.,
1541 CESCATTI, A., LASSLOP, G., LINDROTH, A., LOMAS, M., LUSSAERT, S., MARGO-
1542 LIS, H., OLESON, K. W., ROUPSARD, O., VEENENDAAL, E., VIOVY, N., WILLIAMS,
1543 C., WOODWARD, F. I. et PAPALE, D. (2010). Terrestrial Gross Carbon Dioxide Up-
1544 take : Global Distribution and Covariation with Climate. *Science*, 329(5993):834–838.
- 1545 BELLISARIO, L. M., BUBIER, J. L., MOORE, T. R. et CHANTON, J. P. (1999). Controls
1546 on CH₄ emissions from a northern peatland. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(1):81–
1547 91.
- 1548 BLODAU, C., BASILIKO, N. et MOORE, T. R. (2004). Carbon turnover in peatland
1549 mesocosms exposed to different water table levels. *Biogeochemistry*, 67(3):331–351.
- 1550 BOND-LAMBERTY, B. et THOMSON, A. (2010). Temperature-associated increases in
1551 the global soil respiration record. *Nature*, 464(7288):579–582.
- 1552 BORTOLUZZI, E., EPRON, D., SIEGENTHALER, A., GILBERT, D. et BUTTLER, A.
1553 (2006). Carbon balance of a European mountain bog at contrasting stages of re-
1554 generation. *New Phytol.*, 172(4):708–718.

- 1555 BUBIER, J., COSTELLO, A., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et SAVAGE, K. (1993).
1556 Microtopography and methane flux in boreal peatlands, northern Ontario, Canada.
1557 *Canadian Journal of Botany*, 71(8):1056–1063.
- 1558 BUBIER, J. L., BHATIA, G., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et LAFLEUR, P. M. (2003).
1559 Spatial and Temporal Variability in Growing-Season Net Ecosystem Carbon Dioxide
1560 Exchange at a Large Peatland in Ontario, Canada. *Ecosystems*, 6:353–367.
- 1561 BUBIER, J. L., CRILL, P. M., MOORE, T. R., SAVAGE, K. et VARNER, R. K. (1998).
1562 Seasonal patterns and controls on net ecosystem CO₂ exchange in a boreal peatland
1563 complex. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(4):703–714.
- 1564 BUBIER, J. L., MOORE, T. R., BELLISARIO, L., COMER, N. T. et CRILL, P. M. (1995).
1565 Ecological controls on methane emissions from a Northern Peatland Complex in the
1566 zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada. *Global Biogeochemical Cycles*,
1567 9(4):455–470.
- 1568 BUCKLAND, P. C. (1993). Peatland archaeology : a conservation resource on the edge
1569 of extinction. *Biodivers. Conserv.*, 2(5):513–527.
- 1570 CHAPMAN, S., BUTTLER, A., FRANCEZ, A.-J., LAGGOUN-DÉFARGE, F., VASANDER,
1571 H., SCHLOTER, M., COMBE, J., GROSVERNIER, P., HARMS, H., EPRON, D. et
1572 OTHERS (2003). Exploitation of northern peatlands and biodiversity maintenance :
1573 a conflict between economy and ecology. *Front. Ecol. Environ.*, 1(10):525–532.
- 1574 CIAIS, P., SABINE, C., BALA, G., BOPP, L., BROVKIN, V., CANADELL, J., CHHABRA,
1575 A., DEFRIES, R., GALLOWAY, J., HEIMANN, M. et OTHERS (2014). Carbon and
1576 other biogeochemical cycles. In *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis.*
1577 *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 465–570. Cambridge University Press.
- 1579 CROW, S. E. et WIEDER, R. K. (2005). Sources of CO₂ emission from a northern
1580 peatland : root respiration, exudation, and decomposition. *Ecology*, 86(7):1825–1834.
- 1581 DINSMORE, K. J., SKIBA, U. M., BILLETT, M. F. et REES, R. M. (2009). Effect
1582 of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms. *Plant Soil*,
1583 318(1-2):229–242.
- 1584 ESWARAN, H., VAN DEN BERG, E. et REICH, P. (1993). Organic carbon in soils of
1585 the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57(1):192–194.
- 1586 FRANCEZ, A.-J. (2000). La dynamique du carbone dans les tourbières à Sphagnum,
1587 de la sphaine à l'effet de serre. *L'Année Biologique*, 39:205–270.
- 1588 GOGO, S., GUIMBAUD, C., LAGGOUN-DÉFARGE, F., CATOIRE, V. et ROBERT, C.
1589 (2011). In situ quantification of CH₄ bubbling events from a peat soil using a new
1590 infrared laser spectrometer. *Journal of Soils and Sediments*, 11:545–551.
- 1591 GORHAM, E. (1991). Northern Peatlands : Role in the Carbon Cycle and Probable
1592 Responses to Climatic Warming. *Ecol. Appl.*, 1(2):182–195.

- 1593 GÖRRES, C. M., KUTZBACH, L. et ELSGAARD, L. (2014). Comparative modeling of
1594 annual CO₂ flux of temperate peat soils under permanent grassland management.
1595 *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 186:64–76.
- 1596 GUIMBAUD, C., CATOIRE, V., GOGO, S., ROBERT, C., CHARTIER, M., LAGGOUN-
1597 DÉFARGE, F., GROSSEL, A., ALBÉRIC, P., POMATHIOD, L., NICOULLAUD, B. et
1598 RICHARD, G. (2011). A portable infrared laser spectrometer for flux measurements
1599 of trace gases at the geosphere-atmosphere interface. *Measurement Science & Tech-*
1600 *nology*, 22(7):1–17.
- 1601 HARRIS, D. C. (2010). Charles David Keeling and the Story of Atmospheric CO₂
1602 Measurements†. *Anal. Chem.*, 82(19):7865–7870.
- 1603 JACOBS, C. M. J., JACOBS, A. F. G., BOSVELD, F. C., HENDRIKS, D. M. D., HENSEN,
1604 A., KROON, P. S., MOORS, E. J., NOL, L., SCHRIER-UIJL, A. et VEENENDAAL, E. M.
1605 (2007). Variability of annual CO₂ exchange from Dutch grasslands. *Biogeosciences*,
1606 4(5):803–816.
- 1607 JOOSTEN, H. et CLARKE, D. (2002). *Wise use of mires and peatlands*. International
1608 mire conservation group.
- 1609 JUNE, T., EVANS, J. R. et FARQUHAR, G. D. (2004). A simple new equation for the
1610 reversible temperature dependence of photosynthetic electron transport : a study on
1611 soybean leaf. *Funct. Plant Biol.*, 31(3):275–283. WOS :000220831200008.
- 1612 KETCHESON, S. J. et PRICE, J. S. (2014). Characterization of the fluxes and stores of
1613 water within newly formed Sphagnum moss cushions and their environment. *Ecohy-
1614 drology*, 7(2):771–782.
- 1615 KETTUNEN, A., KAITALA, V., ALM, J., SILVOLA, J., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN,
1616 P. J. (1996). Cross-correlation analysis of the dynamics of methane emissions from
1617 a boreal peatland. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 10(3):457–471.
- 1618 KIM, J. et VERMA, S. B. (1992). Soil surface CO₂ flux in a Minnesota peatland.
1619 *Biogeochemistry*, 18(1):37–51.
- 1620 LAIHO, R. (2006). Decomposition in peatlands : Reconciling seemingly contrasting
1621 results on the impacts of lowered water levels. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8):
1622 2011–2024.
- 1623 LANDVA, A. O., KORPIJAAKKO, E. O. et PHEENEY, P. E. (1983). Geotechnical clas-
1624 sification of peats and organic soils. In *Testing of peats and organic soils*, volume
1625 820, pages 37–51.
- 1626 LAPPALAINEN, E. (1996). *Global peat resources*, volume 4. International Peat Society
1627 Jyskä.
- 1628 LIVINGSTON, G. P. et HUTCHINSON, G. L. (1995). Enclosure-based measurement of
1629 trace gas exchange : applications and sources of error. *Biog. Trace Gases Meas.*
1630 *Emiss. Soil Water*, pages 14–51.

- 1631 LONG, K. D., FLANAGAN, L. B. et CAI, T. (2010). Diurnal and seasonal variation in
 1632 methane emissions in a northern Canadian peatland measured by eddy covariance.
 1633 *Global Change Biology*, 16(9):2420–2435.
- 1634 LUND, M., CHRISTENSEN, T. R., LINDROTH, A. et SCHUBERT, P. (2012). Effects
 1635 of drought conditions on the carbon dioxide dynamics in a temperate peatland.
 1636 *Environ. Res. Lett.*, 7(4):045704.
- 1637 LUO, Y. et ZHOU, X. (2006). Chapter 8 - Methods of measurements and estimations.
 1638 In LUO, Y. et ZHOU, X., éditeurs : *Soil Respiration and the Environment*, pages 161
 1639 – 185. Academic Press, Burlington.
- 1640 MANNEVILLE, O. (1999). *Le monde des tourbières et des marais : France, Suisse,
 1641 Belgique et Luxembourg*. Delachaux & Niestle.
- 1642 NATIONAL WETLANDS WORKING GROUP (1997). *The Canadian wetland classifica-
 1643 tion system*. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 2nd edition édition.
- 1644 PEICHL, M., ÖQUIST, M., LÖFVENIUS, M. O., ILSTEDT, U., SAGERFORS, J., GRELLE,
 1645 A., LINDROTH, A. et NILSSON, M. B. (2014). A 12-year record reveals pre-growing
 1646 season temperature and water table level threshold effects on the net carbon dioxide
 1647 exchange in a boreal fen. *Environ. Res. Lett.*, 9(5):055006.
- 1648 PELLETIER, L., MOORE, T. R., ROULET, N. T., GARNEAU, M. et BEAULIEU-AUDY,
 1649 V. (2007). Methane fluxes from three peatlands in the La Grande Rivière watershed,
 1650 James Bay lowland, Canada. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).
- 1651 POST, W. M., EMANUEL, W. R., ZINKE, P. J. et STANGENBERGER, A. G. (1982). Soil
 1652 carbon pools and world life zones. *Nature*, 298:156–159.
- 1653 PUMPANEN, J., KOLARI, P., ILVESNIEMI, H., MINKKINEN, K., VESALA, T., NIINISTÖ,
 1654 S., LOHLA, A., LARMOLA, T., MORERO, M., PIHLATIE, M., JANSENS, I., YUSTE,
 1655 J. C., GRÜNZWEIG, J. M., RETH, S., SUBKE, J.-A., SAVAGE, K., KUTSCH, W., ØS-
 1656 TRENG, G., ZIEGLER, W., ANTHONI, P., LINDROTH, A. et HARI, P. (2004). Com-
 1657 parison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agric. For.
 1658 Meteorol.*, 123(3–4):159–176.
- 1659 RAMEAU, J.-C., MANSION, D. et DUMÉ, G. (2008). *Flore forestière française : Plaines
 1660 et collines*. Forêt privée française.
- 1661 RAMSAR, C. (1987). *Convention relative aux zones humides d'importance internatio-
 1662 nale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau, (Ramsar, Iran, 1971) telle
 1663 qu'amendée en 1982 et 1987.*
- 1664 ROBERT, C. (2007). Simple, stable, and compact multiple-reflection optical cell for
 1665 very long optical paths. *Appl. Opt.*, 46(22):5408.
- 1666 ROBERT, M. et SAUGIER, B. (2003). Contribution des écosystèmes continentaux à la
 1667 séquestration du carbone. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(6–7):577–595.
- 1668 RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013a). Peat and organic soil. In *The biology of Peatlands*,
 1669 pages 85–107. Oxford University Press.

- 1670 RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013b). Sphagnum - the builder of boreal peatlands. In
1671 *The biology of Peatlands*, pages 65–84. Oxford University Press.
- 1672 SIEGENTHALER, U. et OESCHGER, H. (1987). Biospheric CO₂ emissions during the
1673 past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus B*, 39B(1-
1674 2):140–154.
- 1675 SILVOLA, J., ALM, J., AHLHOLM, U., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1996).
1676 The contribution of plant roots to CO₂ fluxes from organic soils. *Biol Fertil Soils*,
1677 23(2):126–131.
- 1678 SONNENTAG, O., VAN DER KAMP, G., BARR, A. G. et CHEN, J. M. (2010). On the
1679 relationship between water table depth and water vapor and carbon dioxide fluxes
1680 in a minerotrophic fen. *Glob. Change Biol.*, 16(6):1762–1776.
- 1681 STRACK, M. (2008). *Peatlands and climate change*. IPS, International Peat Society,
1682 Jyväskylä, Finland.
- 1683 STRACK, M., WALLER, M. F. et WADDINGTON, J. M. (2006). Sedge succession and
1684 peatland methane dynamics : A potential feedback to climate change. *Ecosystems*,
1685 9(2):278–287.
- 1686 STRACK, M. et ZUBACK, Y. C. A. (2013). Annual carbon balance of a peatland 10 yr
1687 following restoration. *Biogeosciences*, 10(5):2885–2896.
- 1688 TREAT, C. C., BUBIER, J. L., VARNER, R. K. et CRILL, P. M. (2007). Timescale
1689 dependence of environmental and plant-mediated controls on CH₄ flux in a temperate
1690 fen. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).
- 1691 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2012). Methane fluxes from a
1692 patterned fen of the northeastern part of the La Grande river watershed, James Bay,
1693 Canada. *Biogeochemistry*, 113(1-3):409–422.
- 1694 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2014). Interannual variability in
1695 the CO₂ balance of a boreal patterned fen, James Bay, Canada. *Biogeochemistry*,
1696 118(1-3):371–387.
- 1697 TURETSKY, M. R., TREAT, C. C., WALDROP, M. P., WADDINGTON, J. M., HAR-
1698 DEN, J. W. et MC GUIRE, A. D. (2008). Short-term response of methane fluxes and
1699 methanogen activity to water table and soil warming manipulations in an Alaskan
1700 peatland. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 113(G3).
- 1701 TURUNEN, J., TOMPOPO, E., TOLONEN, K. et REINIKAINEN, A. (2002). Estimating
1702 carbon accumulation rates of undrained mires in Finland—application to boreal and
1703 subarctic regions. *The Holocene*, 12(1):69–80.
- 1704 UPDEGRAFF, K., BRIDGHAM, S. D., PASTOR, J., WEISHAMPEL, P. et HARTH, C.
1705 (2001). Response of CO₂ and CH₄ emissions from peatlands to warming and water
1706 table manipulation. *Ecol. Appl.*, 11(2):311–326.
- 1707 VIEL, E., BINET, S., GOGO, S. et LAGGOUN-DÉFARGE, F. (2015). Tree invasion
1708 controls the drainage pattern in La Guette peatland (France) : impact on the water
1709 storage capacity of the peat. *Journal of Hydrology (submitted)*.

- 1710 WADDINGTON, J. M. et ROULET, N. T. (2000). Carbon balance of a boreal patterned
1711 peatland. *Global Change Biology*, 6(1):87–97.
- 1712 WORRALL, F., BURT, T., ROWSON, J., WARBURTON, J. et ADAMSON, J. (2009).
1713 The multi-annual carbon budget of a peat-covered catchment. *Science of The Total
1714 Environment*, 407(13):4084–4094.
- 1715 YU, Z., LOISEL, J., BROSSEAU, D. P., BEILMAN, D. W. et HUNT, S. J. (2010). Global
1716 peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophys. Res. Lett.*, 37(13).

Index

A

1717 atterrissage 10

C

1720 carbone

1721 stock 11

1722 changements globaux 2, 12

E

1724 échange net de l'écosystème

1725 contrôle 18

P

1727 paludification 10

1728 photosynthèse 14

1729 production primaire brute

1730 contrôle 18

R

1732 respiration 15

1733 de l'écosystème 15

1734 contrôle 17

1735 du sol 15

S

1736 services écologiques 3

T

1739 tourbières 8–13

1740 distribution 9

1741 formation 10

1742 surface 9

1743 utilisation 12

1744 turbification 8

Z

1746 zone humide 8

₁₇₄₇ Annexes

₁₇₄₈ A Photos supplémentaires



(a) droséra

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

₁₇₄₉ B protocole végétation

₁₇₅₀ Le suivi non-destructif d'une végétation n'est pas triviale et nécessite la mise en
₁₇₅₁ place de protocoles particuliers en fonction du type de végétation. L'objectif est de
₁₇₅₂ pouvoir estimer une biomasse produite en impactant au minimum la végétation en
₁₇₅₃ place. Pour l'ensemble des espèces végétales présentes dans les embases servant à la
₁₇₅₄ mesure des flux un recouvrement à été estimé, à l'œil.

₁₇₅₅ **La strate arbustive**

₁₇₅₆ Pour la strate arbustive des mesures de hauteur moyenne ont été effectuées, en
₁₇₅₇ mesurant depuis le niveau du sol, ou le toit des sphaignes, si elles étaient présentes,
₁₇₅₈ jusqu'au sommet de l'individu.

₁₇₅₉ **La strate herbacée**

₁₇₆₀ Pour la strate herbacée, en 2013, 5 individus des deux espèces majoritaires (*Eriophorum vaginatum* ? *augustifolium* ?, *Molinia Caerulea*) ont été marqués afin de pourvoir
₁₇₆₁ les mesurer plusieurs fois au cours de la saison. Cependant les difficultés à retrouver
₁₇₆₂ les individus marqués couplés à la mort d'un nombre important d'entre eux n'ont pas
₁₇₆₃ permis d'acquérir de résultats significatifs. En conséquence en 2014 ces deux espèces
₁₇₆₄ ont fait l'objet de comptage exhaustif et de mesure de hauteur moyenne.

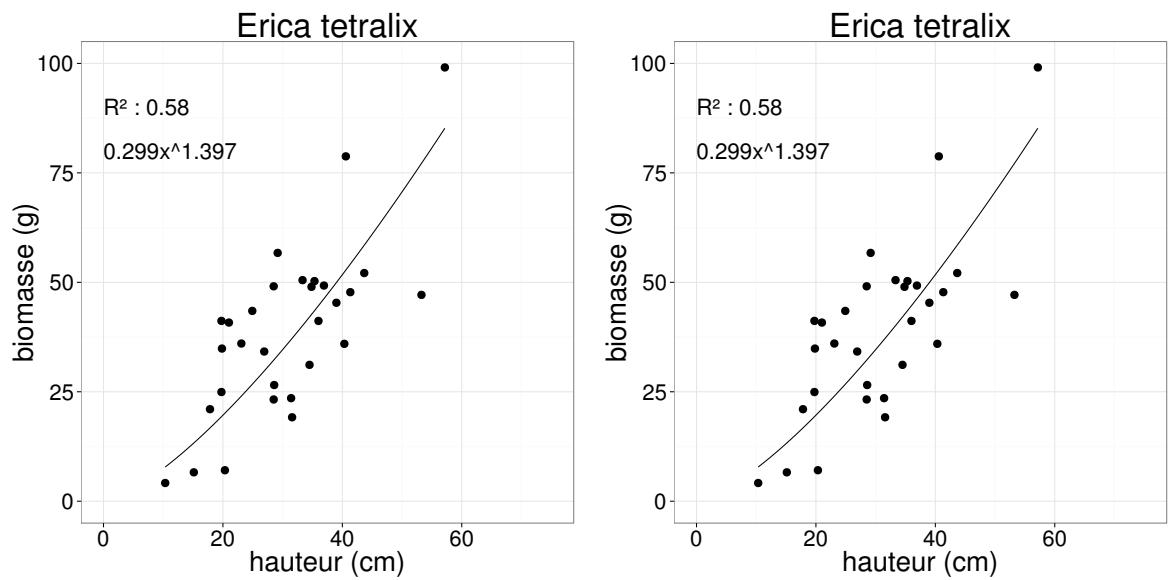


FIGURE 2 – Calibration de la biomasse en fonction de la hauteur

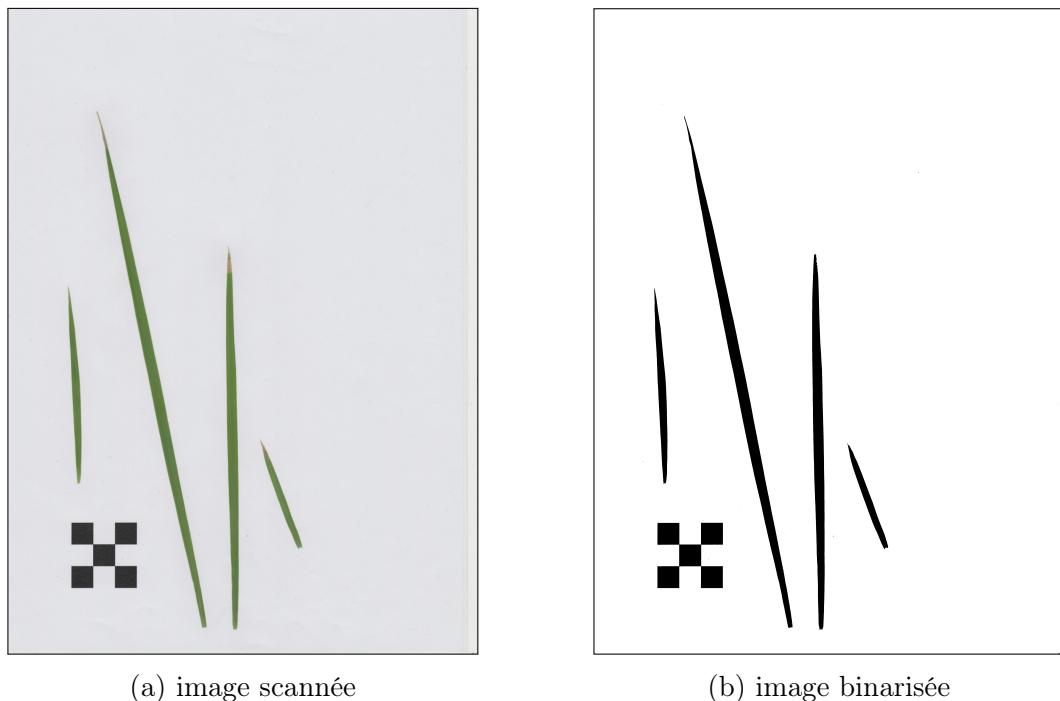


FIGURE 3 – Scanne des feuilles

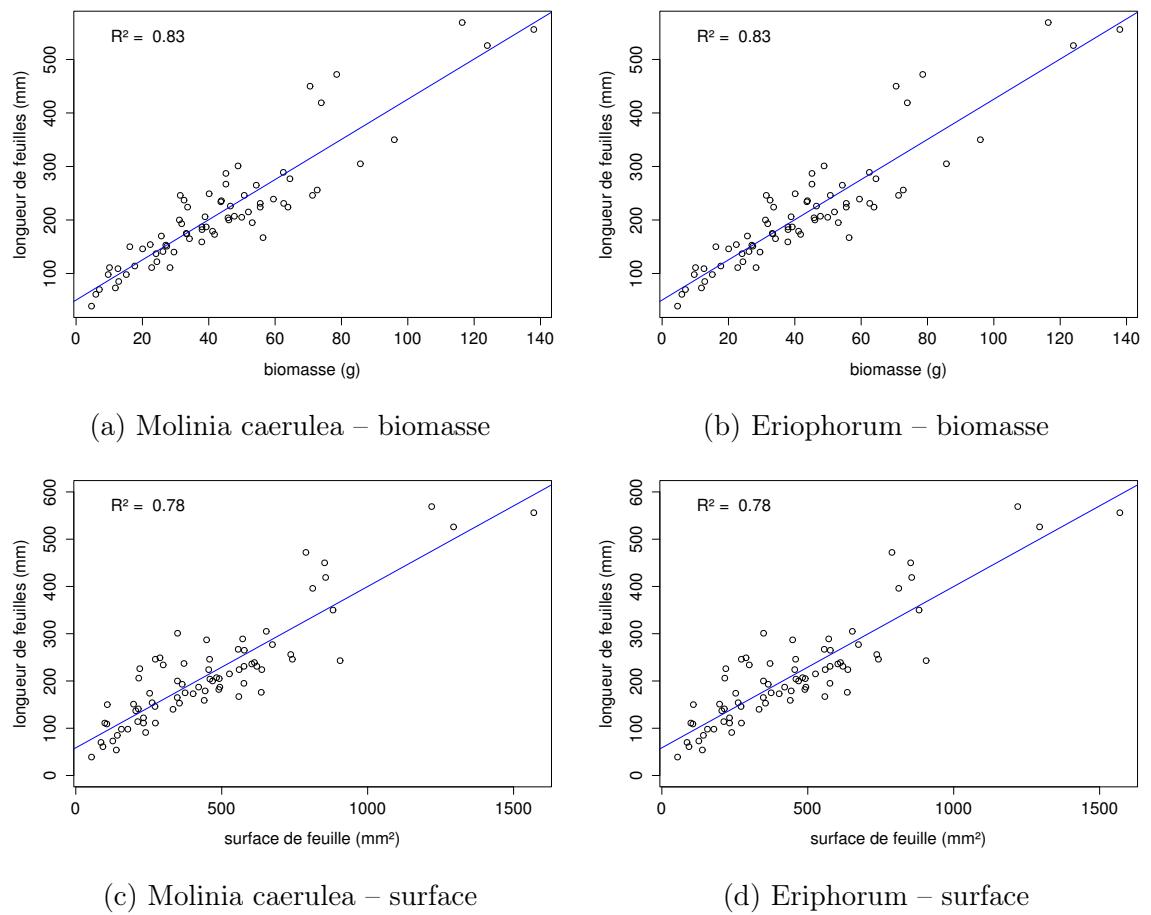


FIGURE 4 – Calibration de la biomasse herbacées pour *Molinia Caerulea* (a), pour *Eriophorum* (b) et de la surface de feuille pour *Molinia Caerulea* (c), pour *Eriophorum* (d) en fonction de la hauteur

₁₇₆₆ C CARBIODIV

₁₇₆₇ 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, ...