

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

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

THÈSE présentée par : Benoît D'ANGELO

soutenue le : [XX mois en lettres 2015]

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

Discipline : Sciences de la Terre et de l'Univers

[Titre de la thèse]

[Sous titre éventuel]

THÈSE dirigée par :

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

RAPPORTEURS :

Prénom Nom Titre, établissement
Prénom Nom Titre, établissement

JURY:

Table des matières

Table des matières	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
Remerciements	ix
Introduction	1
1 Synthèse Bibliographique	7
1.1 Les tourbières et le cycle du carbone	8
1.1.1 Zones humides et tourbières : définitions et terminologies	8
1.1.2 Tourbières et fonctions environnementales	12
1.1.3 Les tourbières et les changements globaux	14
1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants	17
1.2.1 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières	17
1.2.2 Les facteurs majeurs contrôlant les flux	19
1.2.3 Bilans de carbone	23
2 Sites d'études et méthodologies employées	27
2.1 Présentation de la tourbière de La Guette	28
2.2 Autres sites du service national d'observation	33
2.3 Mesures de flux	34
2.3.1 Présentation des méthodologies possibles	34
2.3.2 Les mesures de CO ₂	35
2.3.3 Les mesures de CH ₄	37
2.3.4 Le calcul des flux	38
2.4 Facteurs contrôlants	39
2.4.1 acquisitions automatisées	39
3 Bilan de C de la tourbière de La Guette	41
3.1 Introduction	42
3.2 Procédure expérimentale et analytique	42
3.2.1 Méthodes de mesure	42
3.2.2 Modélisation du bilan de C	44
3.3 Résultats	48
3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la tourbière de La Guette	48
3.3.2 Sélection des modèles	54
3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle de l'écosystème	61

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

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

Liste des figures

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

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

Liste des tableaux

1.1	Estimations des stocks de C pour différents environnements	13
1.2	Surface de tourbe utilisée selon les usages considérés (tourbières non-tropicale). Modifié d'après Joosten et Clarke (2002).	15
1.3	Vitesse apparente d'accumulation du carbon à long terme en $\text{gC m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	24
3.1	Valeur des paramètres des équations utilisées pour modéliser les flux et sensibilité relative (en %) des flux en réponse à une variation de $\pm 10\%$ de chacun des paramètres des modèles.	62
3.2	Bilan des flux en gCm2an1	65
3.3	Bilan des flux en gCm2an1	65
3.4	Sensibilité relative (en %) du bilan de CO ₂ (ENE) en réponse à une variation de $\pm 10\%$ de chacun des paramètres des modèles.	66
3.5	Bilan des flux de CO ₂ en gCm2an1, en utilisant PPB-2 et RE-3	69
4.1	Récapitulatif des mesures pour les deux expérimentations	81

Remerciements

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

¹ Introduction

² Contexte général

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

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

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

29 Ciais *et al.* (2014).

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

32 **schéma ?**

33 Zones humides tourbières

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

37 Pourquoi étudier les tourbières aujourd'hui ?

38 L'étude des tourbières se poursuit car, en plus de rendre de nombreux services éco-
39 logiques (épuration du sol, régulation des flux hydriques, biodiversité), elles constituent
40 un stock de carbone relativement important au regard de la surface qu'elle occupent.

41 Ainsi il est généralement admis que les tourbières contiennent un quart à un tiers
42 du carbone présent Chiffres (**surfaces...**) dans l'ensemble des terres émergées tandis
43 qu'elle ne constituent que 3 % des surfaces continentales (**Réf needed**). Ce ratio rela-
44 tivement important, correspond à un stock d'environ 455 Gt Gorham (1991); Turunen
45 *et al.* (2002) est à mettre perspective avec les autres stock du cycle du carbone. On
46 observe que ce stock est du même ordre de grandeur que celui de la végétation

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

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

52 Transition modèles

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

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

59 Objectif de la thèse et approche mise en oeuvre

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

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

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

⁸⁴ seront exposées.

⁸⁵ 1 Synthèse Bibliographique

⁸⁶

⁸⁷	1.1 Les tourbières et le cycle du carbone	8
⁸⁸	1.1.1 Zones humides et tourbières : définitions et terminologies	8
⁸⁹	1.1.2 Tourbières et fonctions environnementales	12
⁹⁰	1.1.3 Les tourbières et les changements globaux	14
⁹¹	1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants	17
⁹²	1.2.1 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières	17
⁹³	1.2.2 Les facteurs majeurs contrôlant les flux	19
⁹⁴	1.2.3 Bilans de carbone	23
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 :

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

145 Ces variations de définitions ajoutées aux limites floues qui peuvent exister entre
146 certains 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**).

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

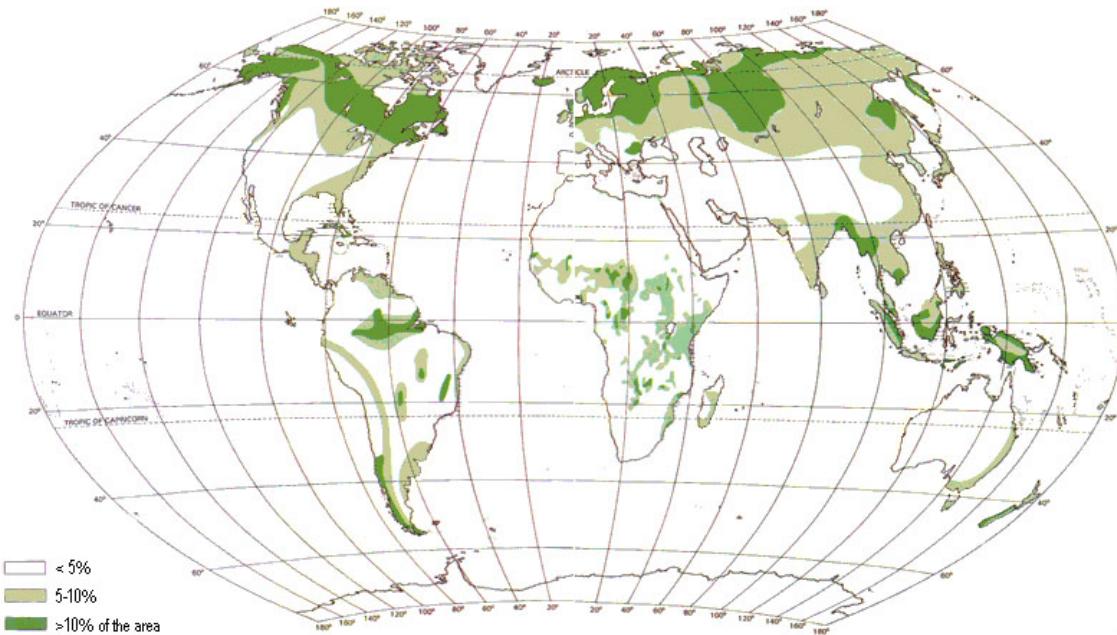


FIGURE 1.1 – Global distribution of peatlands

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
 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-

1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

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
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 récalcitrantes⁴.

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

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

Tableau 1.1 – Estimations des stocks de C pour différents environnements

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

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
 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 défini les changements globaux comme l'ensemble des modifications environne-
²¹⁹ mentales plus ou moins rapide, 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 :
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.

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

241 Contrainte climatique

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

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

1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

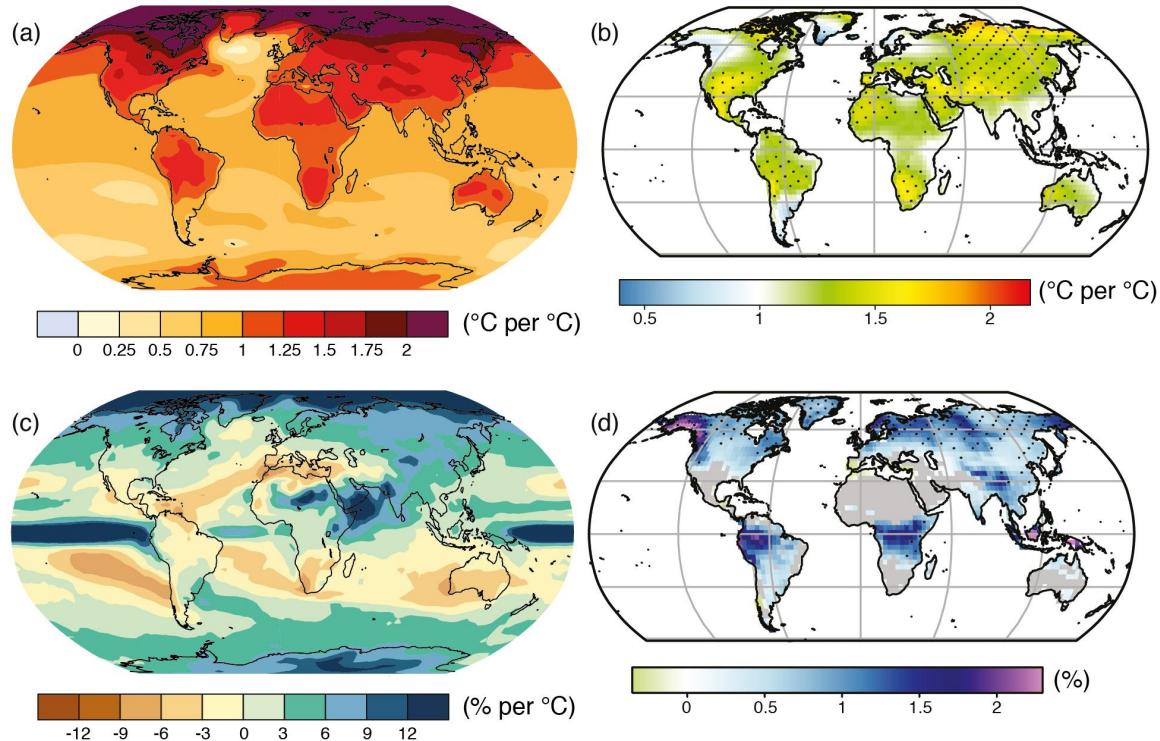


FIGURE 1.2 – Projection des changements à l'horizon 2100, des moyennes et extrêmes annuels (sur terre) des températures de l'air et des précipitations : (a) température de surface moyenne par °C de changement global moyen, (b) 90^e percentile des températures journalières maximum par °C de changement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

261 2 à 8 °C dans les zones boréales, et de 2 à 6 °C dans les zones tempérées, ainsi qu'une
 262 augmentation probable des précipitations (Christensen *et al.*, 2013; Frolking *et al.*,
 263 2011). De façon plus indirecte est attendue la fonte du permafrost, l'augmentation de
 264 l'intensité et de la fréquence de feux et des changements dans les compositions des
 265 communautés végétales.

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

²⁶⁹ 1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs

²⁷⁰ contrôlants

²⁷¹ 1.2.1 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières

²⁷² De l'atmosphère à l'écosystème

Avant de stocker et de conserver du carbone, le faut le capturer. Ce transfert du carbone de l'atmosphère à la tourbe se fait sous la forme de CO₂, assimilé par la photosynthèse, principalement des végétaux supérieurs, et éventuellement, bien que dans de moindre proportions, par des algues, des lichens ou des bactéries photosynthétiques [Girard *et al.* \(2011\)](#). On peut écrire la réaction de photosynthèse de la façon suivante :



²⁷³ Ce flux est généralement appelé **Production Primaire Brute** (PPB), *Gross Primary*
²⁷⁴ *Production*, (*GPP*) en anglais. Si la photosynthèse est un processus majeur d'assimi-
²⁷⁵ lation du CO₂, il existe d'autres voies métaboliques permettant la capture du CO₂ de
²⁷⁶ l'atmosphère. Ainsi les micro-organismes chemolithotrophes (**expliciter**) sont capables
²⁷⁷ d'assimiler le CO₂ en utilisant l'énergie issue de l'oxydation de composés inorganiques.

²⁷⁸ Les voies métaboliques permettant l'assimilation du CO₂ sont plutôt bien connues et
²⁷⁹ le fait que les substrats de départ de varient pas (mal dit..) a permis une compréhension
²⁸⁰ relativement fine du processus ([Farquhar *et al.*, 1980](#)). Cependant une fois assimilé par
²⁸¹ la végétation le devenir du carbone est moins direct. Une fois assimilé le carbone est
²⁸² stocké principalement à travers la partie non décomposée des litières végétales.

283 De l'écosystème à l'atmosphère

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

285 D'abord différents gaz peuvent être émis, notamment le CO₂ et le CH₄, éventuellement

286 du N₂O, et certains d'entre eux peuvent avoir plusieurs sources.

287 Le CO₂ est émis dans l'atmosphère à travers différents processus. Ces sources prin-

288 pales sont la respiration de la flore qu'elle soit aérienne ou souterraine, ce qu'on appelle

289 la respiration autotrophe et la respiration microbienne que l'on appelle la respiration

290 hétérotrophe. Une autre source de CO₂ est l'oxydation du CH₄ lors de sa migration des

291 zones anoxiques aux zones oxiques de la colonne de tourbe. Enfin dans les zones anaéro-

292 bie, le CO₂ peut être produit par fermentation (respiration anaérobiose). La production

293 de CO₂ est donc un signal intégré sur l'ensemble de la colonne de tourbe. C'est cette

294 multitude de processus qui rend l'estimation de ce flux difficile, en effet chacune des

295 respirations n'aura pas la même sensibilité vis à vis de facteurs contrôlant. La respira-

296 tion de l'écosystème (RE) est définie comme l'ensemble des respirations de la colonne

297 de tourbe, en incluant à la fois sa partie aérienne et sa partie souterraine. La respiration

298 du sol (SR) est elle définie comme l'ensemble des respirations de la colonne de tourbe,

299 en excluant la partie aérienne. La respiration du sol comprend donc principalement les

300 respirations issues de la rhizosphère et des communautés de micro-organisme.

301 Les tourbières sont des écosystèmes dont la production primaire est estimée à en-

302 viron 500 gC m⁻² [Francez \(2000\)](#).

303 La strate muscinale pouvant jouer/participer/produire jusqu'à 80 % de la produc-

304 tion primaire [Francez \(2000\)](#). Cette production primaire n'est pas particulière élevée

305 (**Réf needed**) et c'est en fait la faible décomposition des matières organiques qui per-

306 met aux tourbières de stocker du carbone. L'accumulation moyenne estimée dans les

307 tourbières boréales est de 30 gC m⁻². Le taux d'accumulation varie en fonction des

308 espèces végétales présentes ((**Réf needed**)), le niveau d'eau ((**Réf needed**)), ... (???)

309 Le méthane (Lai2009, seger1998, barlett1993 review)

310 storage ?

311 Le carbone assimilé par photosynthèse, utilisé par la plante puis évacué que se soit
312 sous forme d'exudats racinaire ou de matériels morts, de litière, va en partie se dégrader.
313 Continuum de dégradation avec des matières organiques de plus en plus récalcitrantes
314 avec la profondeur.

315 La vitesse de stockage au cours du temps ?

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

319 1.2.2 Les facteurs majeurs contrôlant les flux

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

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

328 Deuxième facteur contrôlant majeur : l'hydrologie. L'eau joue un rôle indispensable
329 à la formation et au maintient de ces écosystèmes. Le niveau de la nappe, que le
330 défini ici comme la distance entre la surface topographique de l'écosystème et le toit
331 de l'aquifère/l'eau libre/la zone saturée. Ce niveau sépare la colonne de tourbe en une
332 zone oxique, où il y a présence d'oxygène, et une zone anoxique dans laquelle l'oxygène
333 est absent. Cette différence va influer sur la production du CO₂ et du CH₄. La zone
334 anoxique permet aux organismes anaérobies de se développer, notamment les Archaea⁵
335 méthanogènes. L'activité de ces organismes est la plus importante juste sous la surface

5. micro-organismes unicellulaires procaryotes

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

336 de l'eau, là où ils trouvent, en plus de l'anoxie, des matières organiques de qualité
337 (faiblement décomposées). La zone aérobie permet la respiration aérobie (**aérobie vs**
338 **oxygène**) des micro-organismes, des racines et de la faune. C'est donc dans cette zone
339 qu'est produit la majorité du CO₂. Lors de son transport de la zone anoxique vers la
340 surface, le CH₄ passe par la zone oxygénée et y est en partie oxydé en CO₂. (organismes
341 méthanotrophes) Le niveau de la nappe constraint également le teneur en eau du sol et
342 la hauteur de la frange capillaire (Laiho2006). Ce point a son importance notamment
343 pour la végétation.

344 La végétation est également un facteur important concernant les flux de gaz liés aux
345 tourbières. D'abord car elle exerce une influence directe sur les flux, avec d'un côté la
346 photosynthèse et la respiration. La photosynthèse est le seul processus⁶ permettant le
347 piégeage du carbone présent dans l'atmosphère. Le potentiel de végétation pouvant être
348 différent selon la plante considérée (Moore2002), la composition des communautés végé-
349 tales influe donc la quantité de carbone potentiellement assimilable par l'écosystème.
350 La respiration des plantes que ce soit via leurs parties aériennes ou souterraines (les ra-
351 cines) va permettre de libérer du CO₂. (**Estimation chiffres ?**) La végétation fournie
352 également via ses litières, des matières organiques fraîches pour les micro-organismes.
353 Mais la végétation peut également stimuler la respiration des micro-organismes pré-
354 sent dans la rhizosphère⁷ via la libération d'exsudats racinaires (Moore2002). Enfin un
355 effet indirect lié à l'adaptation de certaines plantes vasculaire aux conditions saturée
356 en eau et anoxique. En effet certaines plantes présentes dans ces milieux humides ont
357 développées un Aerenchyme, un espace intercellulaire agrandi permettant le transport
358 d'oxygène des parties aériennes de la plante aux parties submergées. Le transport peut
359 également se faire dans l'autre sens et permettant par exemple le transport du CO₂ ou
360 du CH₄ dans l'atmosphère. Ce passage au travers de la plante permet également au
361 CH₄ d'éviter d'être oxydé avant d'atteindre l'atmosphère.

362 D'autres facteurs à évoquer ?

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

7. zone du sol impacté par les racines

363 Facteurs contrôlant la respiration de l'écosystème

364 Updegraff2001

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

367 Cai2010

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

372 Stratck2006

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

375 Ballantyne2014

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

381 Facteurs contrôlant la production primaire brute

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

384 Comme pour la respiration, l'augmentation de la température augmente la vitesse de
385 réaction (Cai2010). (**Réf needed**)L'effet d'une variation du niveau de la nappe est
386 cependant moins évidente. La baisse du niveau de la nappe peut à la fois induire une
387 augmentation de la PBB, notamment quand elle favorise la végétation vasculaire (Bal-
388 lantyne2014). Mais elle peut également la diminuer, lorsqu'elle induit un stress hydrique
389 important (Strack & Zuback 2013, Peichl 2014, Alm1999, Griffis2000, Weltzin2000)

390 Facteurs contrôlant l'ENE

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

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

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

411 Facteurs contrôlant les flux de méthane

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

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

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

422 1.2.3 Bilans de carbone

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

435 passé

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

438 tableau LORCA ajouter colonne contexte (exple : 7 tourbières ombo-
439 tropes)

440 présent

441 Dans cette approche on estime les flux actuels de carbone entrant et sortant de
442 l'écosystème afin de déterminer un bilan. Un certain nombre de flux de carbone sont
443 présent au sein des écosystèmes terrestres (équation (1.1))

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

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

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

— ENE : Échange Net de l'Écosystème

— PPB : Production Primaire Brute

— Re : Respiration de l'Écosystème

— F_{COP} : Flux de Carbone Organique Dissous

— F_{COP} : Flux de Carbone Organique Particulaire

— F_{CH_4} : Flux de Méthane

— F_{CID} : Flux de Carbone Inorganique Dissous

— F_{COV} : Flux de Composés Organique Volatils

— F_{CO} : Flux de Monoxyde de Carbone

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

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

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

- ⁴⁵⁹ D'autres méthodes, moins souvent utilisées, existent comme l'utilisation du ratio
⁴⁶⁰ C :N (Kirk2015)

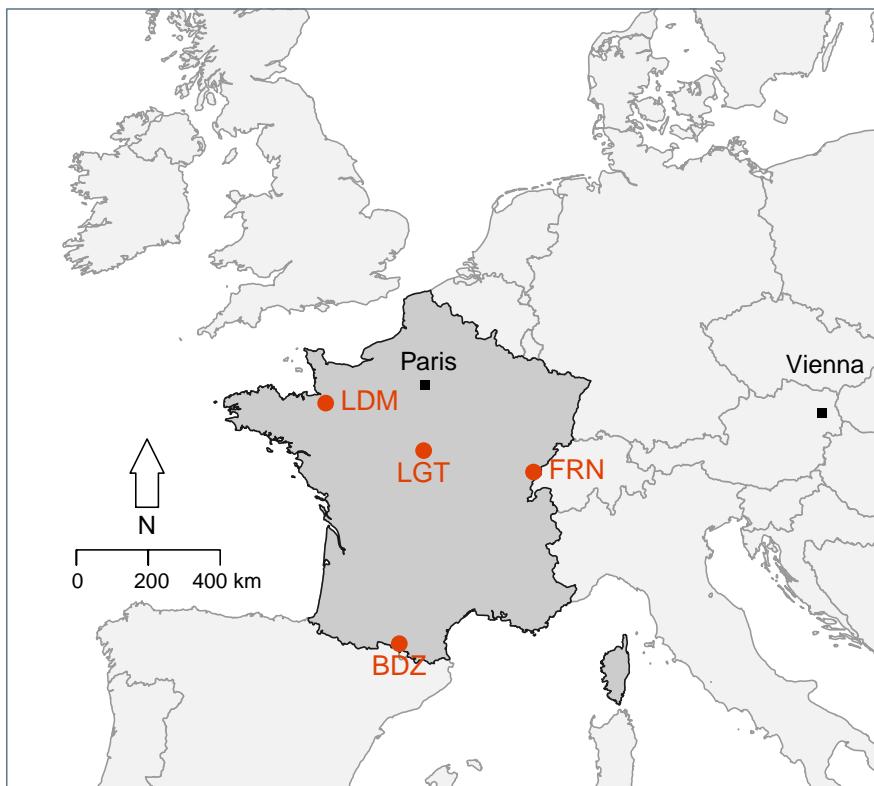
⁴⁶¹ 2 Sites d'études et méthodologies employées

⁴⁶²

⁴⁶³	2.1 Présentation de la tourbière de La Guette	28
⁴⁶⁴		
⁴⁶⁵	2.2 Autres sites du service national d'observation	33
⁴⁶⁶		
⁴⁶⁷	2.3 Mesures de flux	34
⁴⁶⁸	2.3.1 Présentation des méthodologies possibles	34
⁴⁶⁹	2.3.2 Les mesures de CO ₂	35
⁴⁷⁰	2.3.3 Les mesures de CH ₄	37
⁴⁷¹	2.3.4 Le calcul des flux	38
⁴⁷²	2.4 Facteurs contrôlants	39
⁴⁷³	2.4.1 acquisitions automatisées	39
⁴⁷⁴		

475 2.1 Présentation de la tourbière de La Guette

476 Le site d'étude, la tourbière de La Guette, est l'un des quatre sites du service
477 national d'observation des tourbières (SNOT) qui vise à étudier la fonction puits de
478 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

479 La tourbière de La Guette est située à Neuvy-sur-Barangeon, en Sologne, ($N\ 47^{\circ}19'44''$,
480 E $2^{\circ}17'04''$) dans le département du Cher (Figure 2.1). Le site s'étend sur une surface
481 d'une vingtaine d'hectare avec une géométrie relativement allongée 2.2. Cette surface
482 la classe parmi les plus grandes de Sologne. L'épaisseur moyenne de la tourbe est de
483 80 cm avec des maximums locaux atteignant 180 cm. La tourbière de La Guette est pro-
484 bablement topogène (**Réf needed**), formée par l'accumulation d'eau de pluie dans une
485 cuvette imperméabilisée par une couche d'argile issue d'alluvions de la rivière du même
486 nom (La Guette). Les précipitations annuelles moyennes sur le site sont de 880 mm et

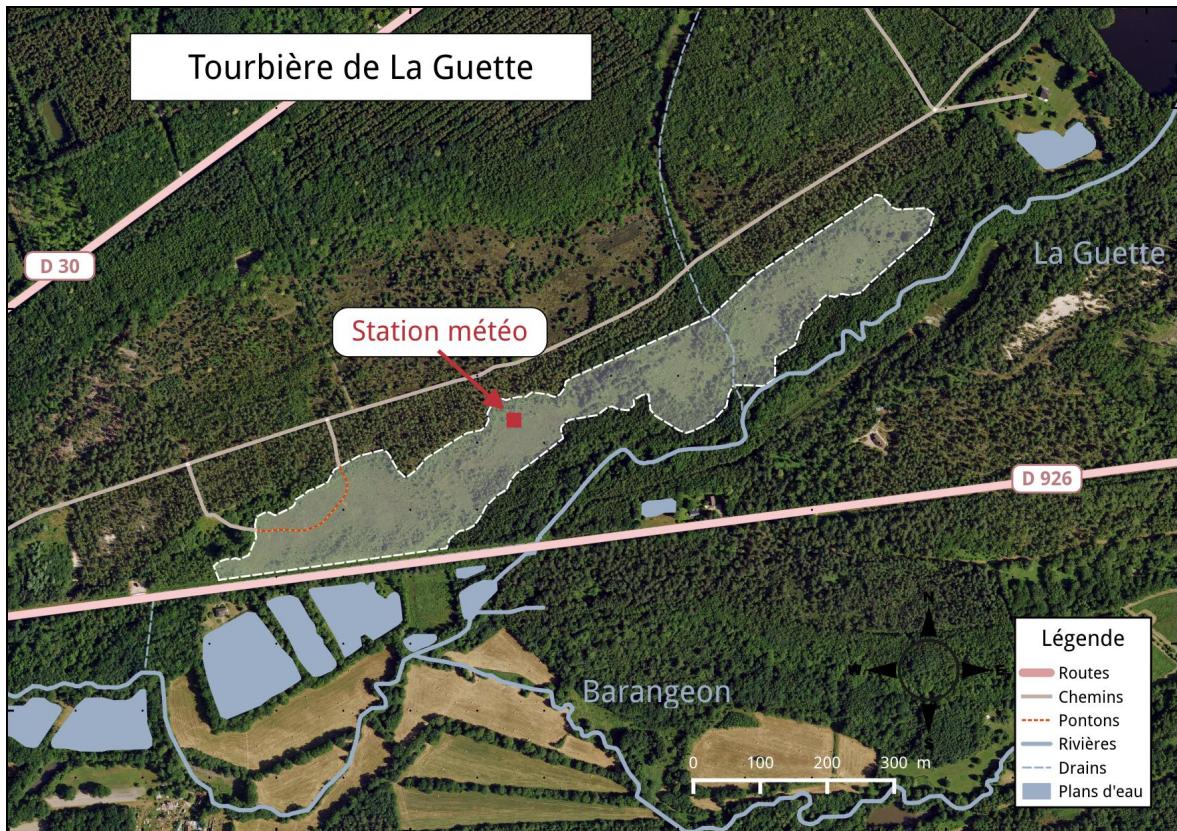


FIGURE 2.2 – Carte de la tourbière de La Guette

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

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

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

2.1. Présentation de la tourbière de La Guette

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

520 Au cours des dernières années, les précipitations sont relativement différentes avec
521 deux années plus sèche que la moyenne avant 2013 et deux années plus humide en 2013
522 et 2014 (Figure 2.4). On observe également cette dualité au niveau du niveau de la
523 nappe. Avant 2013 les étés sont marqués par des étiages important avec des baisses du
524 niveau de nappe allant jusqu'à -60 cm en 2012 (Figure 2.5). Après 2013, les étiages
525 sont beaucoup moins importants sur le site (Figure 2.6). Les variations inter-annuelles
526 de la température moyenne de l'air semblent moins marquées. L'année 2011 est très
527 proche de 2014 avec une température moyenne supérieure à 11 °C. De la même façon
528 les années 2012 et 2013 sont très proche avec des température moyenne inférieure à
529 10 °C.



(a) *Sphagnum – Eriophorum austifolium*



(b) *Erica tetralix – Molinia caerulea*



(c) *Molinia caerulea*

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

2.1. Présentation de la tourbière de La Guette

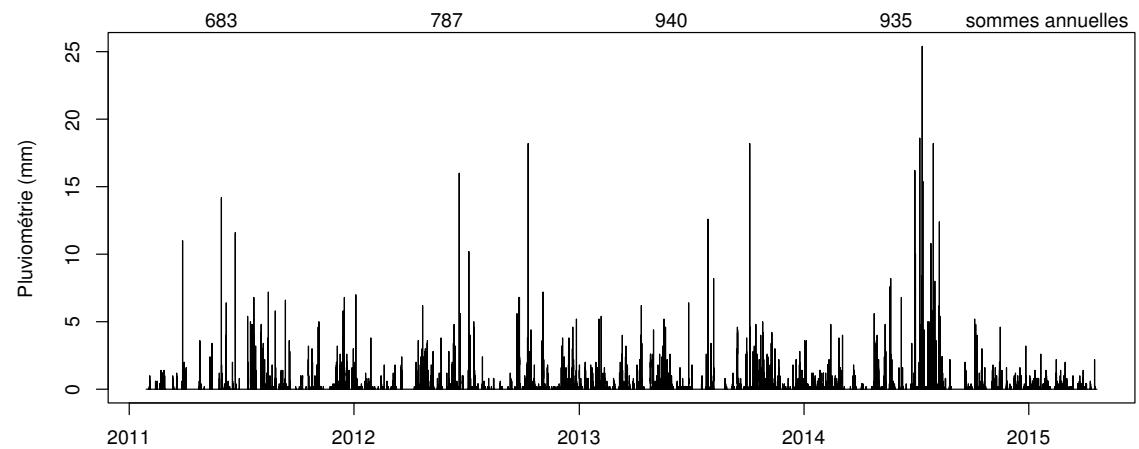


FIGURE 2.4 – Évolution du niveau de la pluviométrie, en mm, des années 2011 à 2014

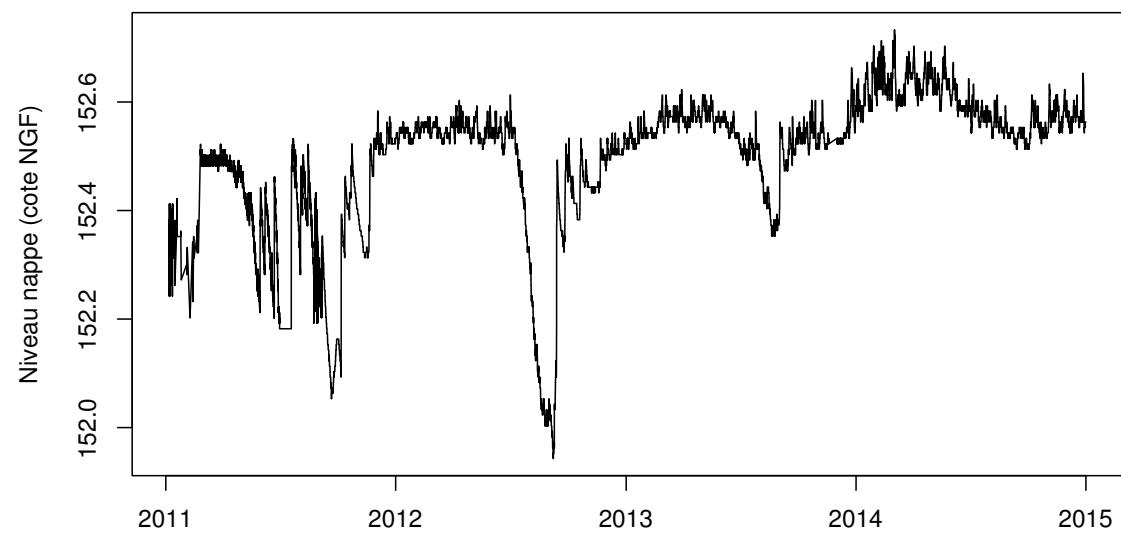


FIGURE 2.5 – Évolution du niveau de la nappe, en cm par rapport à la surface, des années 2011 à 2014

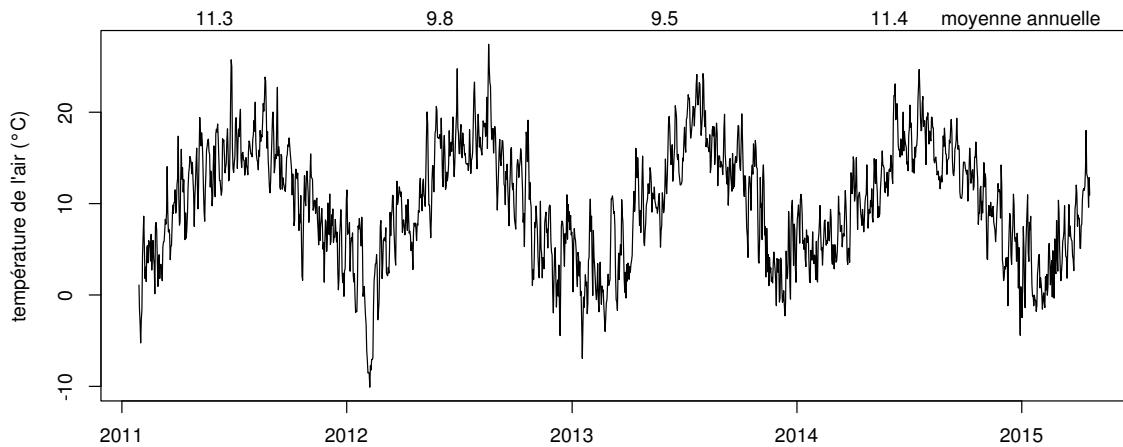


FIGURE 2.6 – Évolution de la température de l'air (en °C) des années 2011 à 2014

530 2.2 Autres sites du service national d'obser- 531 vation

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

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

⁵⁴⁴ 2.3 Mesures de flux

⁵⁴⁵ 2.3.1 Présentation des méthodologies possibles

⁵⁴⁶ De nombreuses techniques permettent de mesurer des flux de gaz, avec en premier
⁵⁴⁷ lieu les méthodes de chambres.

⁵⁴⁸ Les chambres peuvent être ouvertes, c'est à dire que la mesure se fait lorsque le
⁵⁴⁹ gaz à l'intérieur de la chambre à l'équilibre avec celui à l'extérieur, ou fermées, dans
⁵⁵⁰ ce cas le gaz à l'intérieur de la chambre n'est pas à l'équilibre avec celui à l'extérieur.
⁵⁵¹ Elles peuvent également être dynamique, lorsqu'un système de pompe, permettant
⁵⁵² notamment de transporter le gaz jusqu'à l'analyseur, est présent. Ou statique si le
⁵⁵³ système est sans flux artificiel.

⁵⁵⁴ Trois grandes techniques de chambre existent. D'abord les chambres **dynamiques**
⁵⁵⁵ **ouvertes** qui se basent sur un état d'équilibre et mesurent une différence de concen-
⁵⁵⁶ tration d'un gaz dont une partie passe par la chambre et l'autre non. Cette méthode
⁵⁵⁷ nécessite un système de pompe et donc le passage d'un flux. Ensuite les chambres **dy-
558 namiques fermées** qui mesurent l'évolution de la concentration du gaz au sein de la
⁵⁵⁹ chambre à l'aide d'un système de pompe permettant l'envoi du gaz dans un analyseur
⁵⁶⁰ externe. Enfin les chambres **statiques fermées** qui mesurent également l'évolution de
⁵⁶¹ la concentration du gaz au sein de la chambre sans qu'un système de pompe ne soit
⁵⁶² présent. Dans ce cas soit l'analyseur est présent dans la chambre, soit des prélèvements
⁵⁶³ sont fait à intervalles réguliers puis analysés par la suite en chromatographie gazeuse.

⁵⁶⁴ Il faut noter que les dénominations anglaises de ces méthodes doit faire l'objet d'une
⁵⁶⁵ attention particulière. *Closed chamber* par exemple est parfois utilisé pour se référer
⁵⁶⁶ à l'état ou non d'équilibre, comme défini dans ce document, mais parfois également
⁵⁶⁷ pour désigner les méthodes de chambre sans système de flux ce qui peut prêter à
⁵⁶⁸ confusion [Pumpenan et al. \(2004\)](#). Souvent utilisées les dénominations *open/closed* et
⁵⁶⁹ *dynamic/static* sont décrites dans [Luo et Zhou \(2006\)](#), une autre convention peut être
⁵⁷⁰ rencontrée : *flow-through/non-flow-through* et *steady state/non-steady state* [Livingston](#)

571 et Hutchinson (1995)

572 Ces différentes méthodes ont divers avantages et inconvénients.

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

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

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

578 2.3.2 Les mesures de CO₂

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

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

590 Pour les raisons détaillée précédemment, la méthode mise en œuvre est celle de
591 la chambre statique fermée, aucun système de pompe n'est donc utilisé. la chambre
592 est posée sur l'embase, elle contient l'analyseur de CO₂ qui mesure la variation de
593 la concentration en gaz au cours du temps. Un ventilateur de faible puissance est
594 également présent à l'intérieur de la chambre afin d'homogénéiser l'air. 1 à 3 min de
595 stabilisation sont nécessaires après la pose de la chambre afin d'éviter les effets pouvant
596 y être liés. Ensuite l'enregistrement est lancé, avec l'acquisition toutes les 5 s pendant
597 5 min de la concentration en CO₂, de la température et de l'humidité. La mesure se
598 déroule donc sur une période de temps relativement courte afin de minimiser le dés-

2.3. Mesures de flux

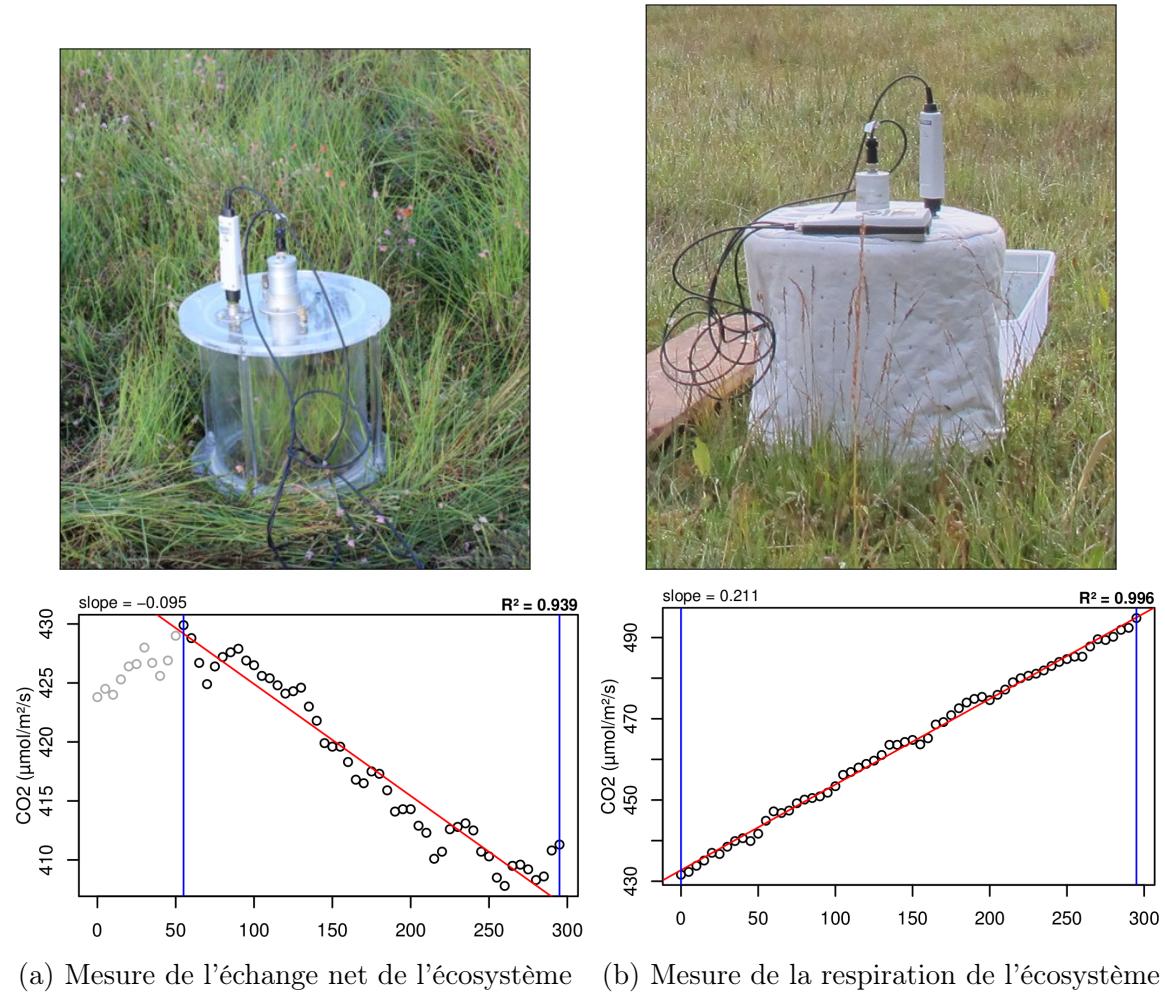


FIGURE 2.7 – Mesures de CO₂

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

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

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

622 2.3.3 Les mesures de CH₄

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

2.3. Mesures de flux

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

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

650 2.3.4 Le calcul des flux

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

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

653 Avec :

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

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

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

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

658 T : la température dans la chambre en K

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

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

661 2.4 Facteurs contrôlants

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

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

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

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

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

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

668 expérimentations.

669 2.4.1 acquisitions automatisées

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

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

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

673 2014 puis toutes les demi-heures par la suite. Les paramètres enregistrés sont la pres-

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

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

2.4. Facteurs contrôlants

676 ment permis l'acquisition de la température de l'air et de la tourbe à -5, -10, -20 et
677 -40 cm. Installées à la même époque, quatre sondes **OTT?** de mesure du niveau de
678 la nappe d'eau permettent le suivi du niveau de la nappe dans la tourbière.

679 3 Bilan de C de la tourbière de La Guette

680	
681	3.1 Introduction 42
682	
683	3.2 Procédure expérimentale et analytique 42
684	3.2.1 Méthodes de mesure 42
685	3.2.2 Modélisation du bilan de C 44
686	3.3 Résultats 48
687	3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la tour-
688	bière de La Guette 48
689	3.3.2 Sélection des modèles 54
690	3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle
691	de l'écosystème 61
692	3.3.4 Variabilité spatiale du bilan 68
693	3.4 Discussion 70
694	3.4.1 Estimations des flux 70
695	3.4.2 Estimations des bilans 73
696	3.4.3 Sensibilité et limitations du bilan 73
697	3.4.4 Représentativité locale du modèle 74
698	3.4.5 Variation du bilan avec la végétation 74
699	3.4.6 perspectives 75
700	
701	

702 3.1 Introduction

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

715 3.2 Procédure expérimentale et analytique

716 3.2.1 Méthodes de mesure

717 Mesures de flux de gaz

718 Les mesures des flux de CO₂ et de CH₄ ont été effectués en utilisant la méthode
719 décrite dans la partie 2.3. En juin 2011, 20 placettes ont été installées¹ selon un échan-
720 tillonnage aléatoire stratifié : La surface de la tourbière a été divisée selon une grille
721 de 20 mailles et un point choisi aléatoirement dans chaque maille localise chaque pla-
722 cette. Cette méthode permet de conserver un échantillonnage aléatoire tout en étant
723 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.

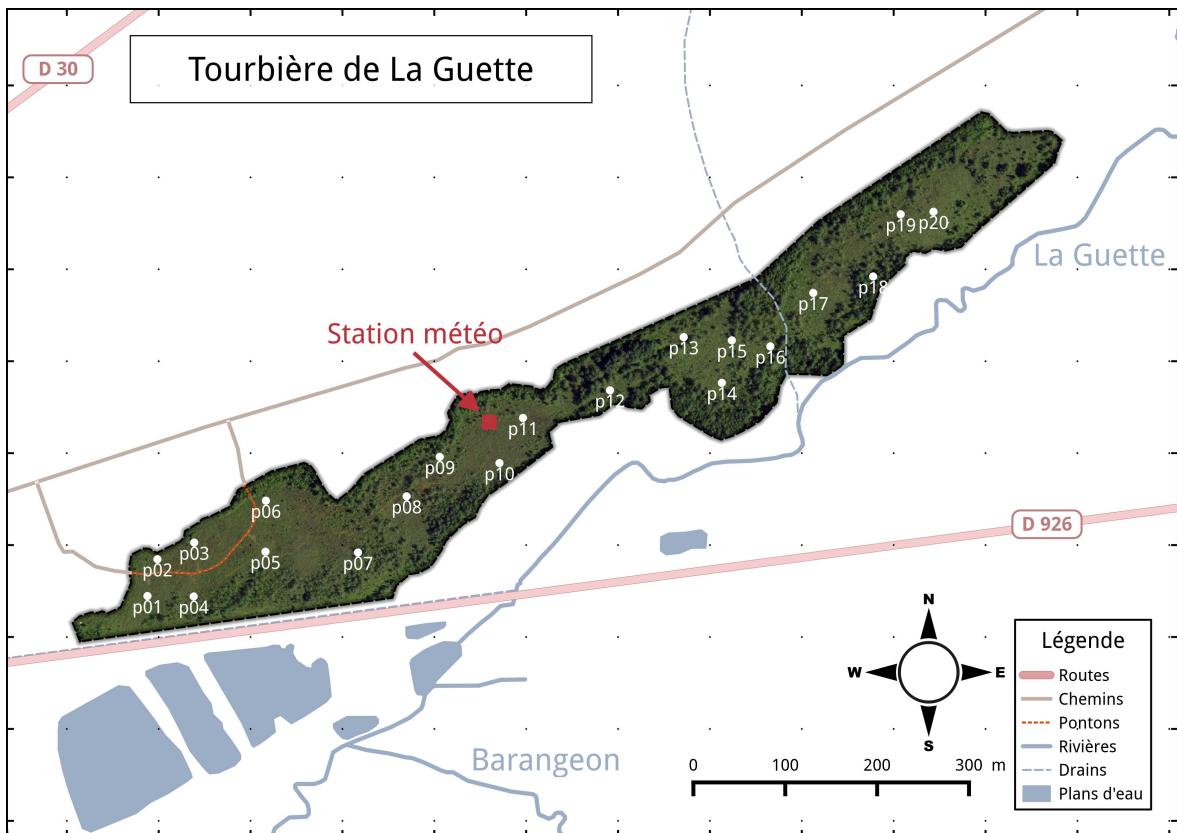


FIGURE 3.1 – Répartition des 20 placettes de mesures suivant un échantillonnage aléatoire stratifié.

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

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

3.2. Procédure expérimentale et analytique

738 (20 campagnes, pour 24 mois de mesure). Quand aux mesures de CH₄ ont été effectuées
739 avec une fréquence moindre (12 campagnes) principalement liée au difficulté de mise
740 en oeuvre de l'instrument SPIRIT (lourd, difficilement transportable dans un milieu
741 tourbeux).

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

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

754 3.2.2 Modélisation du bilan de C

755 Estimation du bilan et variabilité temporelle

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

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

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

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

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

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

2. Valeurs moyennes - Valeurs moyennes estimées

3.2. Procédure expérimentale et analytique

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

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

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

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

812 Étude de la variabilité spatiale

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

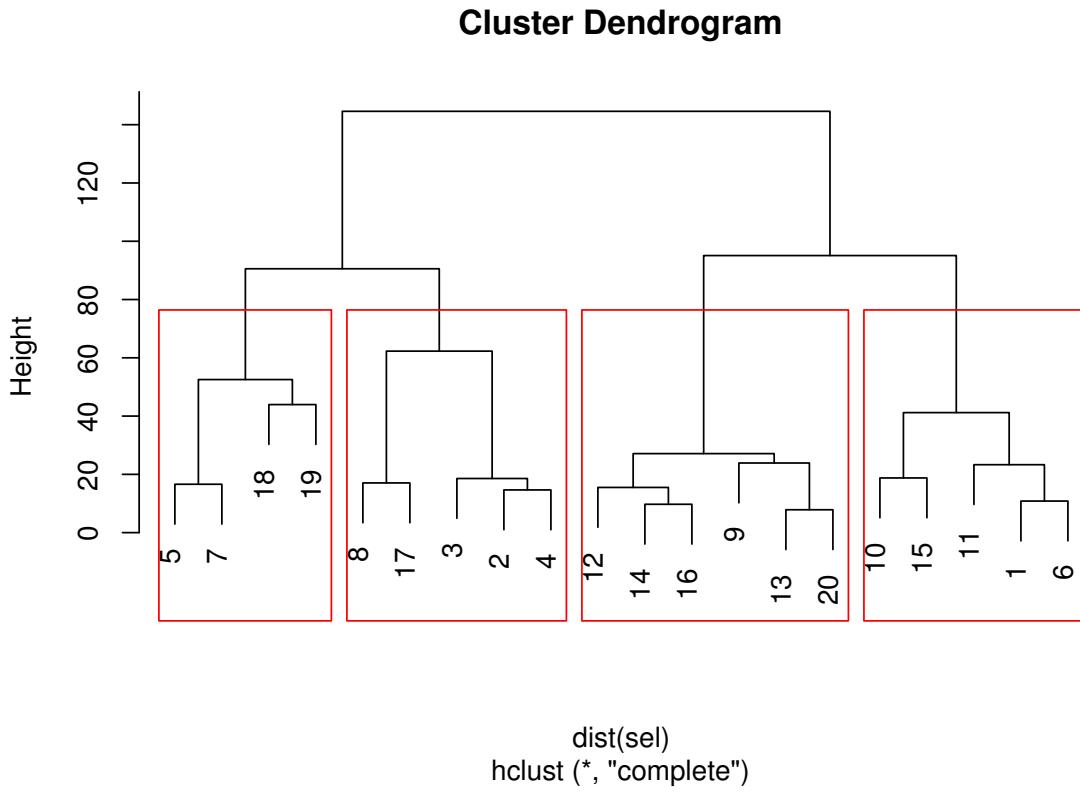


FIGURE 3.2 – Partitionnement des placettes en fonction de leur similarité en termes de composition végétale (pourcentage des strates muscinales, herbacées et arbustives)

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

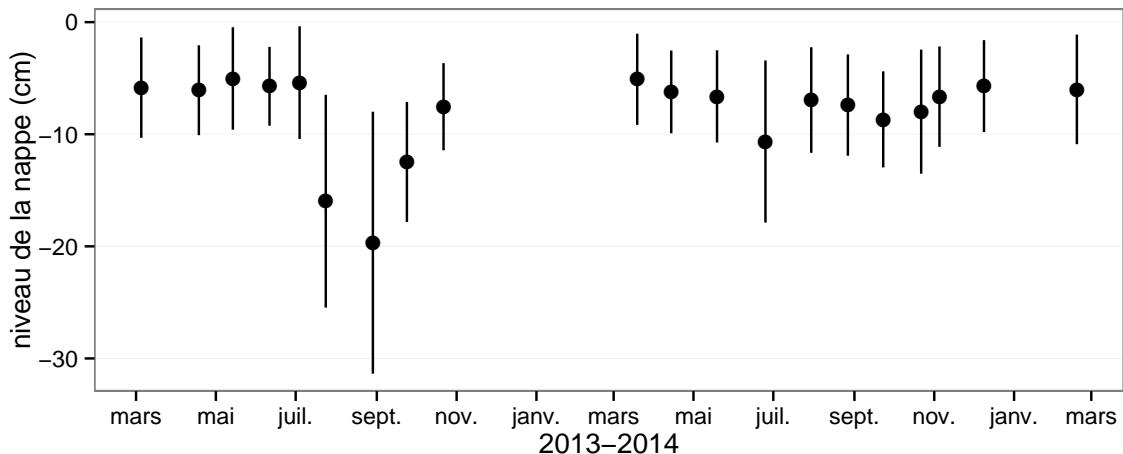


FIGURE 3.3 – Évolution du niveau de la nappe moyen des 20 embases mesuré pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

826 3.3 Résultats

827 3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la 828 tourbière de La Guette

829 Les Facteurs contrôlant

830 L'évolution du niveau de la nappe des 20 placettes, décrite dans la figure 3.3, est
831 marquée par un étiage d'une vingtaine de centimètres en moyenne en 2013 et l'absence
832 d'un étiage net en 2014 avec un niveau de la nappe moyen ne descendant que rarement
833 sous la barre des -10 cm . Ces observations sont cohérentes avec la figure 2.5 représen-
834 tant des données acquises à plus haute fréquence, et confirment la particularité de ces
835 2 années vis-à-vis des précédentes qui présentent des étiages bien plus fort.

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

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

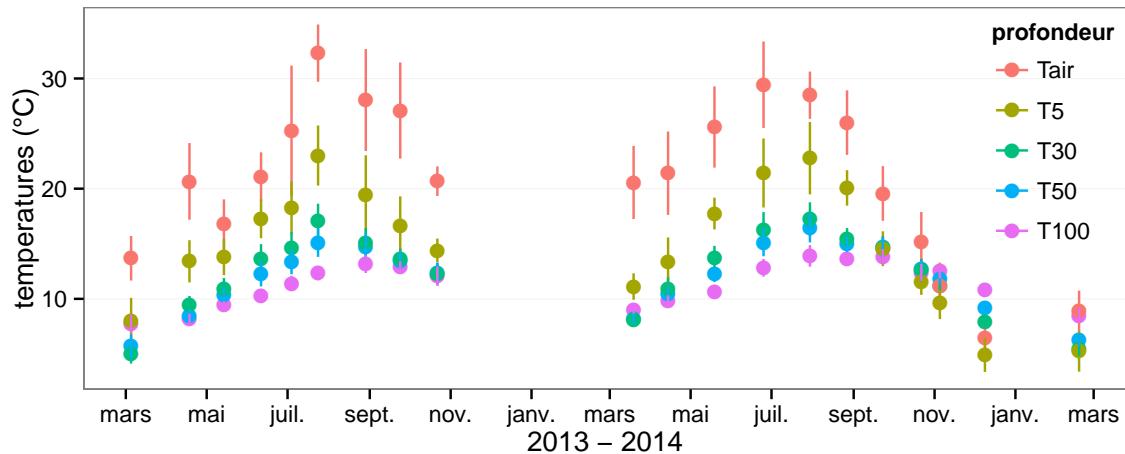


FIGURE 3.4 – Évolution des températures de l'air (Tair) et du sol à -5 , -30 , -50 et -100 cm (T5, T30, T50 et T100 respectivement) moyenne mesurée lors des campagnes de terrain de mars 2013 à février 2015

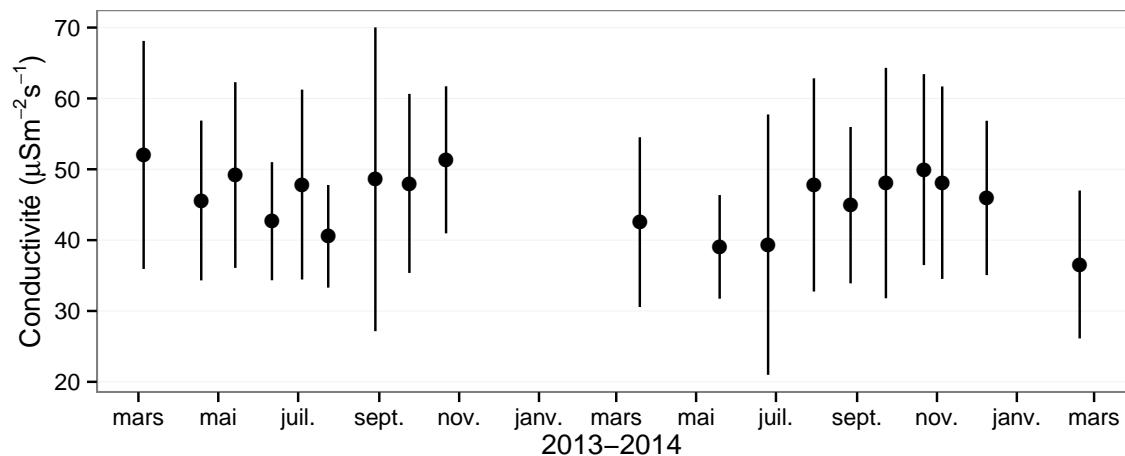


FIGURE 3.5 – Évolution de la conductivité pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

3.3. Résultats

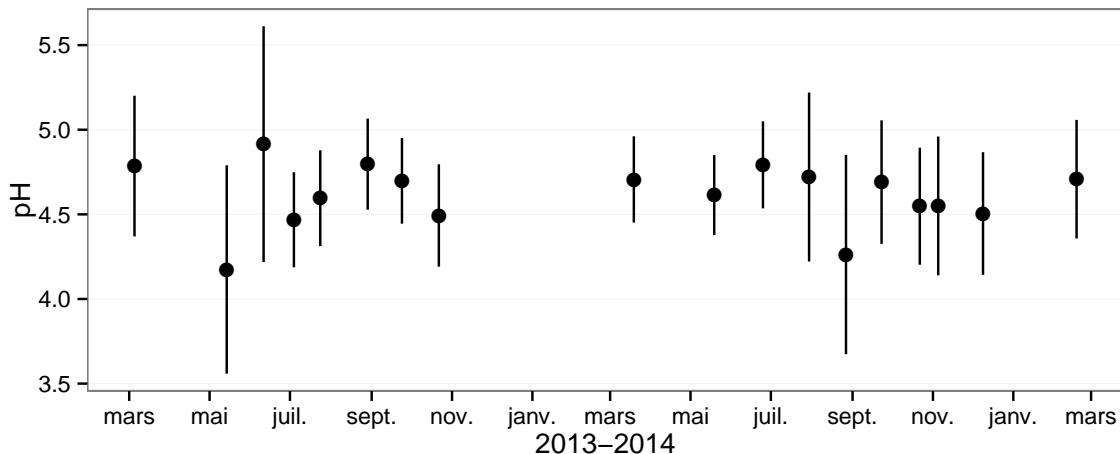


FIGURE 3.6 – Évolution du pH pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

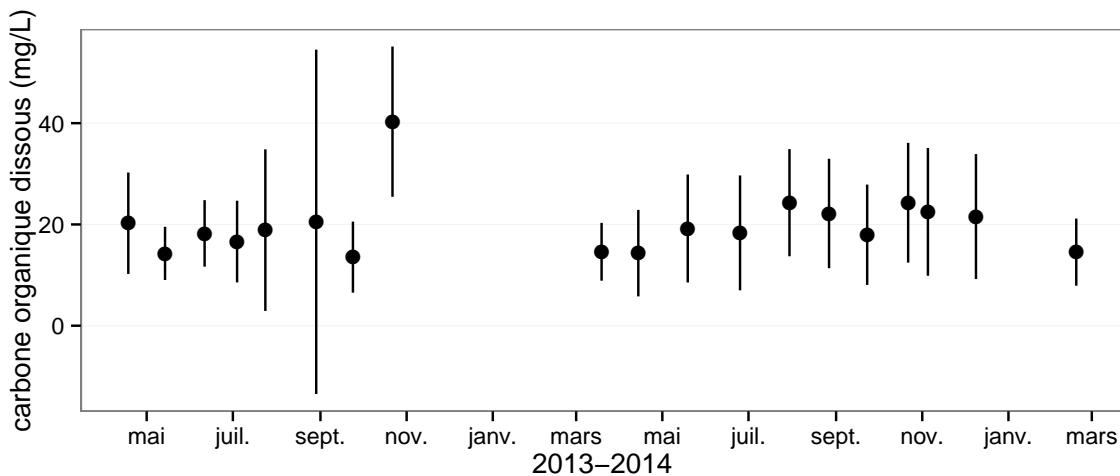


FIGURE 3.7 – Évolution de la concentration en carbone organique dissous dans l'eau du sol pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

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

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

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

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

846 Les flux de carbone

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

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

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

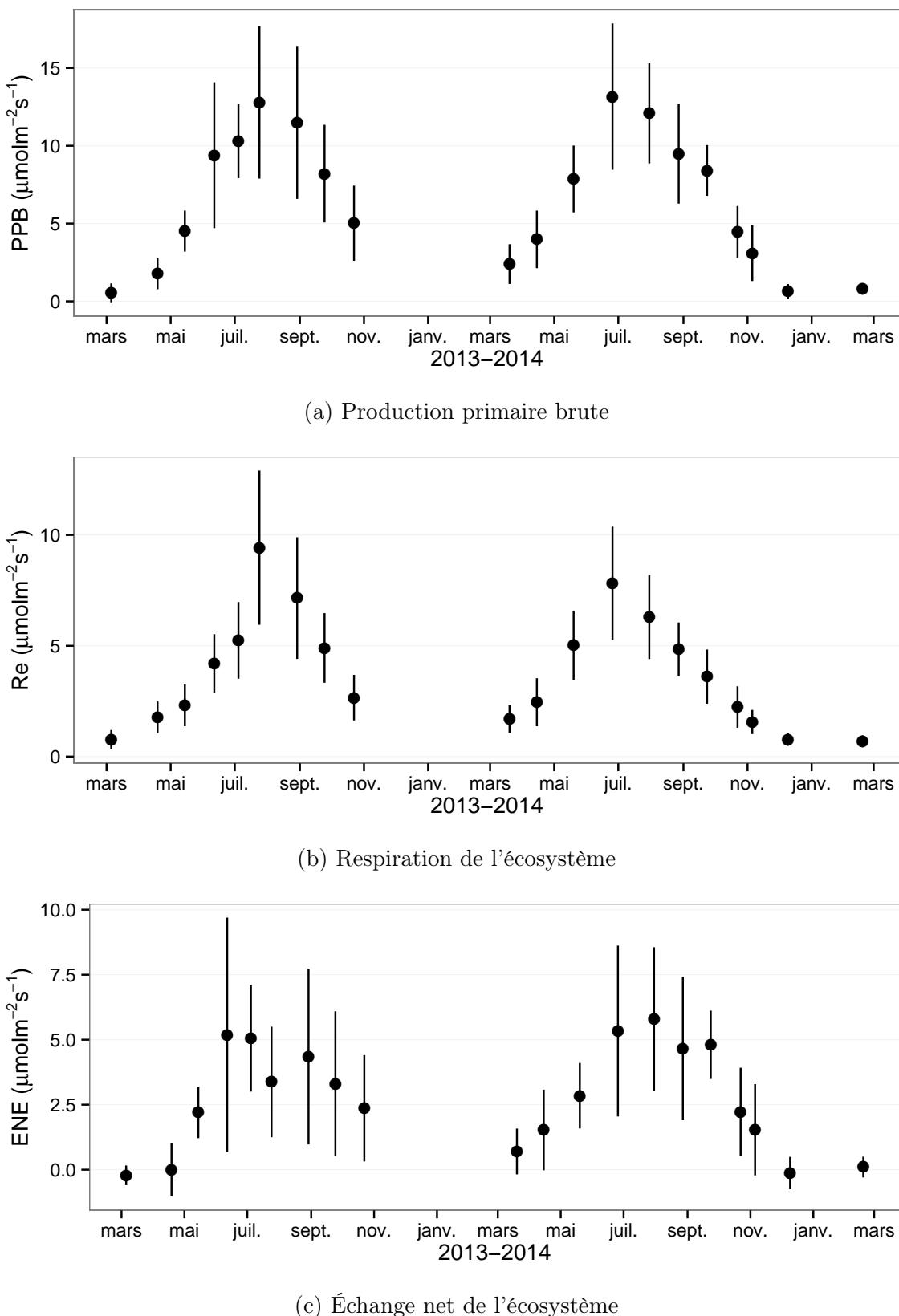


FIGURE 3.8 – Évolution du niveau de PPB, RE et ENE pendant la période de mesure. Moyenne des 20 embases de mars 2013 à février 2015.

3.3. Résultats

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

853 En 2013, les valeurs de la PPB augmentent au printemps et une partie de l'été
854 avec un maximum de $12,80 \pm 4,91 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ atteint fin juillet, avant de diminuer
855 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
856 en juin, soit plus tôt que l'année précédente. Puis pendant l'été et l'automne les va-
857 leurs décroissent jusqu'à être proche de 0. En moyenne les valeurs de la PPB sont de
858 $7,12 \pm 5,19 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en 2013 et de $6,56 \pm 4,72 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en 2014 (Figure 3.8a).

859 La RE en 2013 augmente pendant le printemps et une partie de l'été, elle atteint
860 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
861 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
862 de décroître jusqu'en hiver pour approcher des valeurs nulles. La moyenne annuelle de
863 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
864 2014 : $3,63 \pm 2,56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figure 3.8b).

865 Concernant l'ENE, en 2013 elle augmente jusque $5,19 \pm 4,51 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, son
866 maximum en juin, avant de diminuer jusqu'à la fin de l'année. Cependant, cette baisse
867 est moins homogène que celle des deux flux précédents, avec notamment une augmenta-
868 tion de l'ENE entre juillet et août 2013. Ceci étant, il faut également noter les valeurs
869 importantes de la déviation standard particulièrement en juin et en août. En 2014,
870 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
871 décroisse. Cette baisse est cependant plus homogène qu'en 2013. les moyennes de l'ENE
872 en 2013 et 2014 sont très proches et sont respectivement de $2,85 \pm 3,05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
873 et $2,93 \pm 2,77 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figure 3.8c).

874 Le CH₄ comme le CO₂ montre une variabilité saisonnière importante, cependant
875 les flux mesurés sont un ordre de grandeur en dessous de ceux mesurés pour le CO₂
876 (Figure 3.9). À l'inverse de ce dernier, l'importance des flux de CH₄ mesurés en 2013 et
877 2014 est différente. En 2013 les flux sont moins importants qu'en 2014 avec des maximum
878 de $0,078$ et $0,196 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivement.

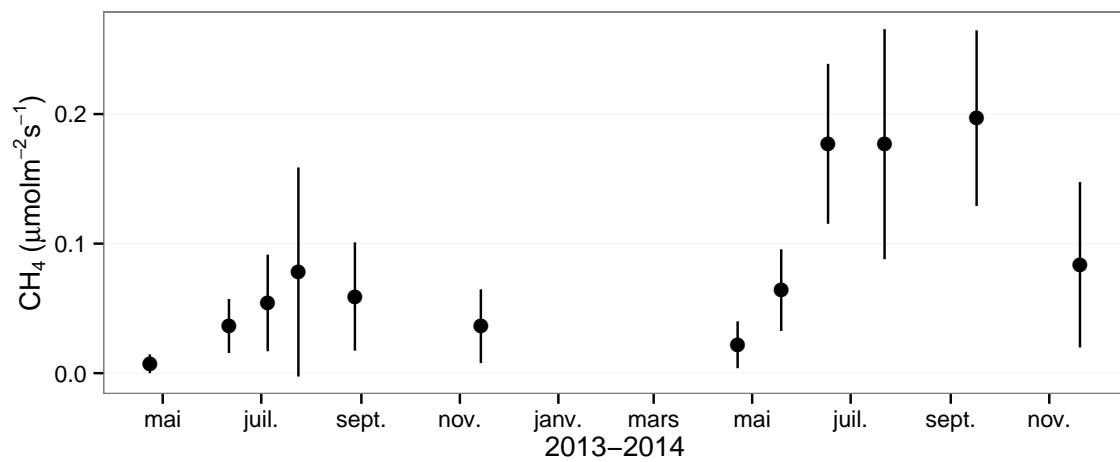


FIGURE 3.9 – Évolution des flux de méthane moyen (N ?) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

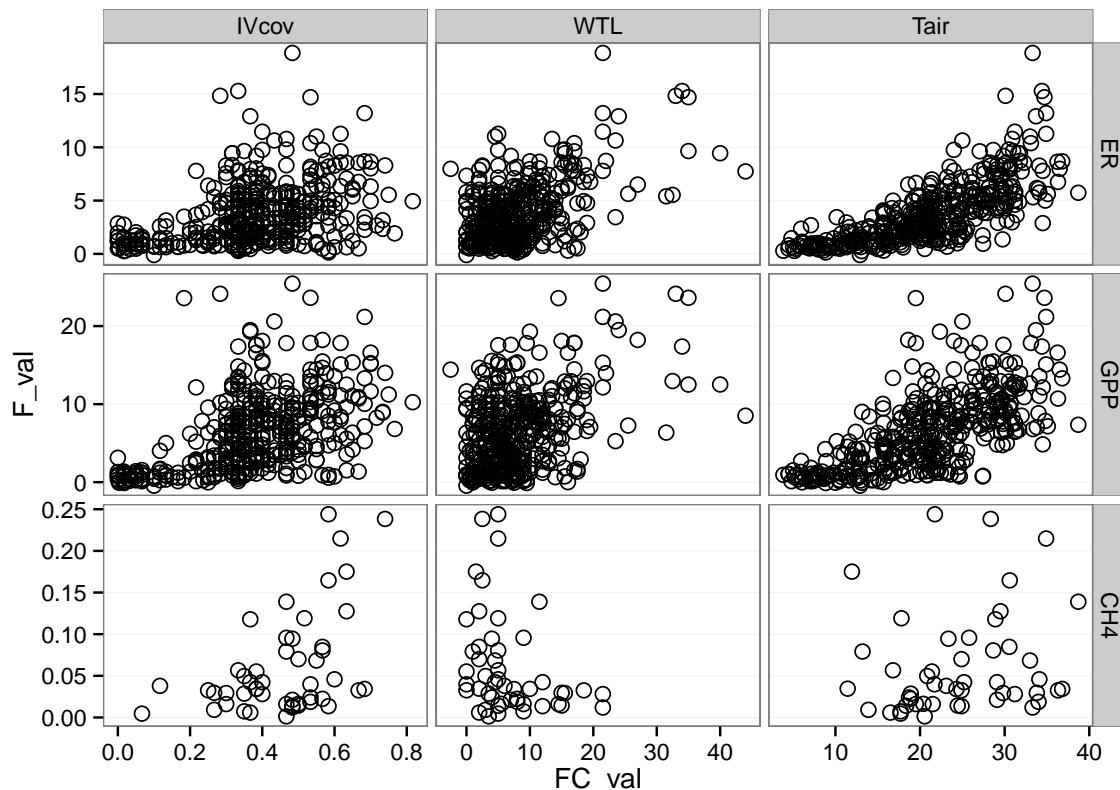


FIGURE 3.10 – Relations entre les flux de gaz et une sélection de facteurs contrôlant

3.3. Résultats

879 Les relations flux gazeux et facteurs contrôlant

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

888 3.3.2 Sélection des modèles

889 La Production Primaire Brute

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

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

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

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

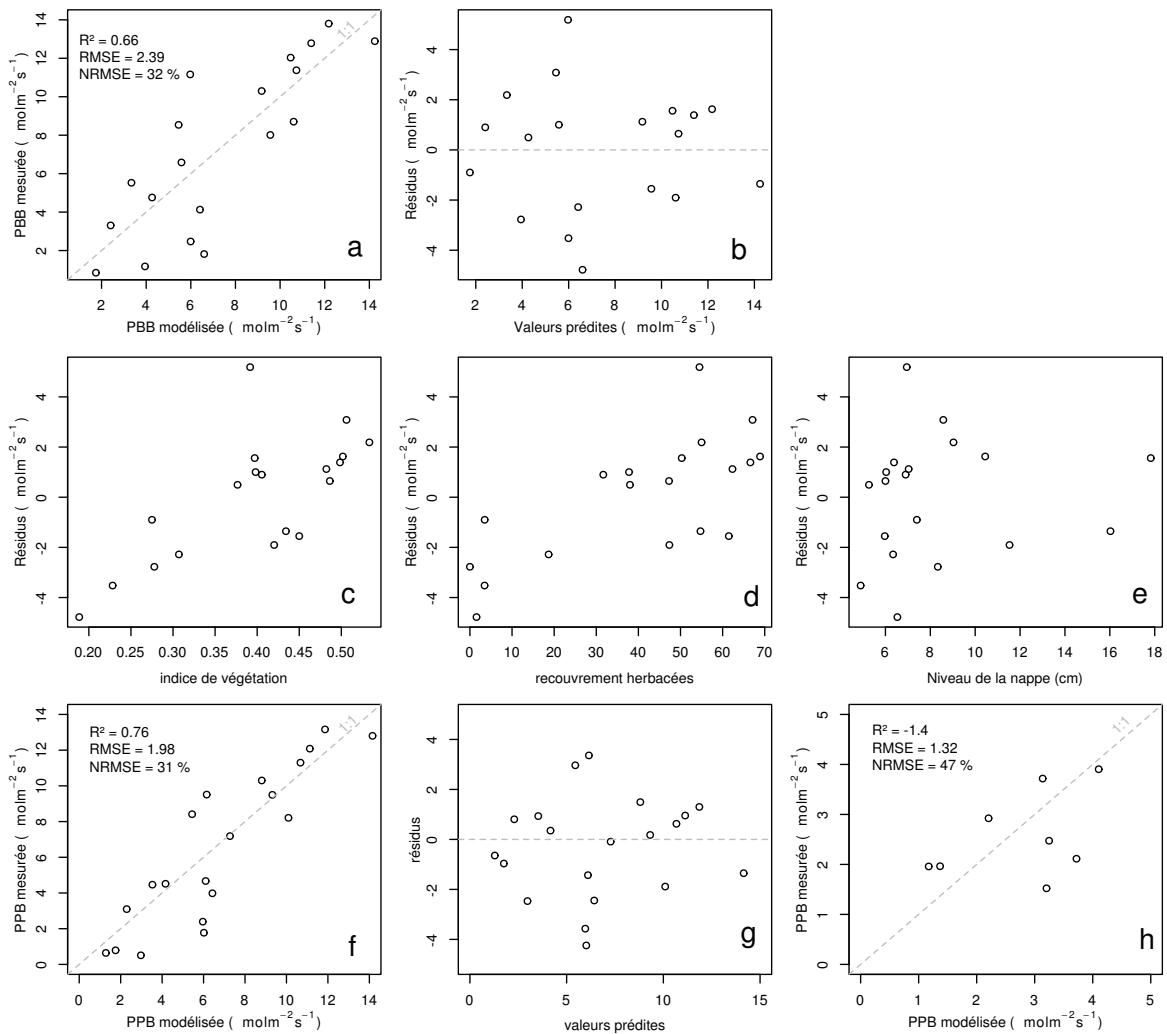


FIGURE 3.11 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.1

3.3. Résultats

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

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

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

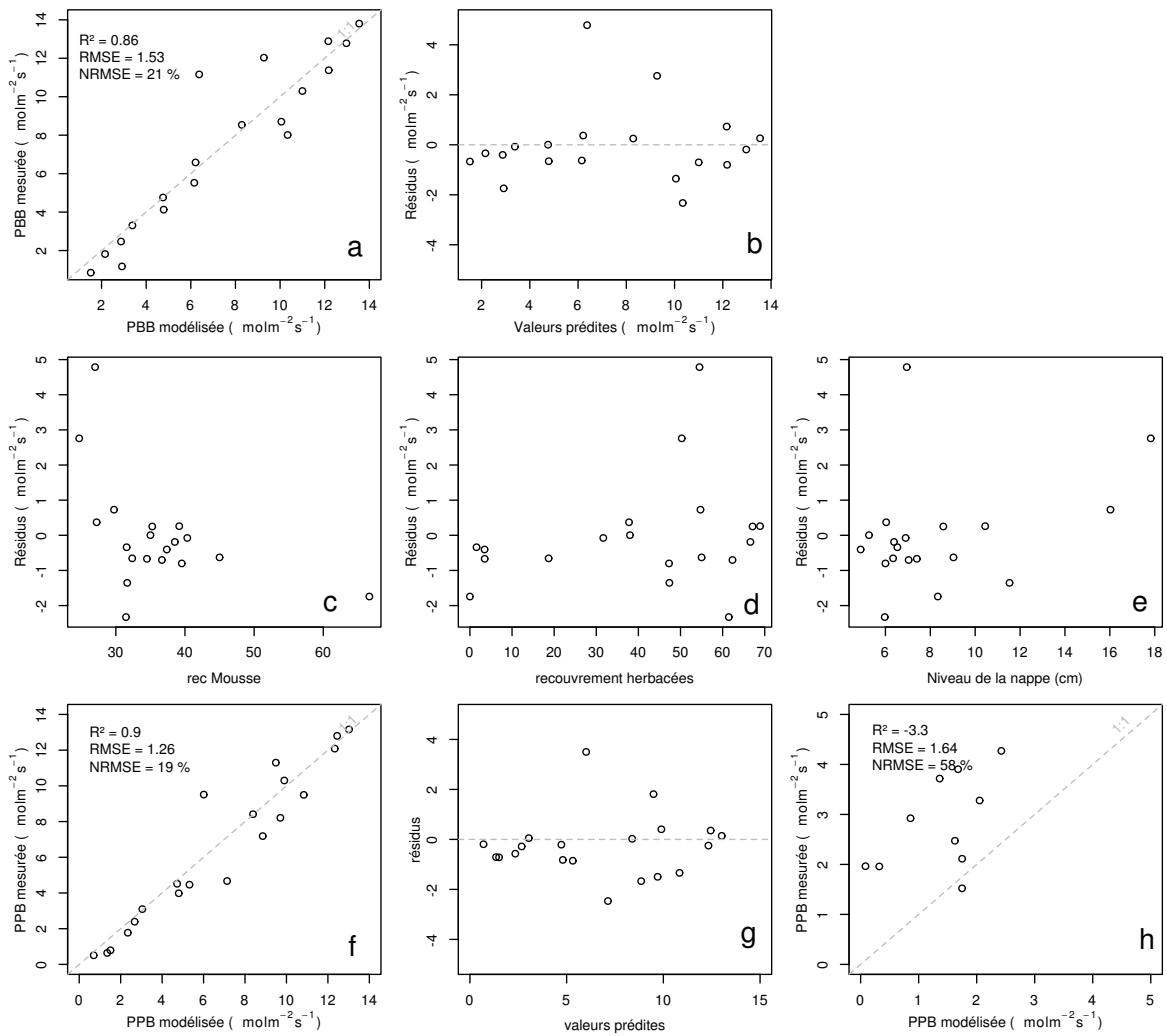


FIGURE 3.12 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.3

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.

939 La Respiration de l'Écosystème

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

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

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

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

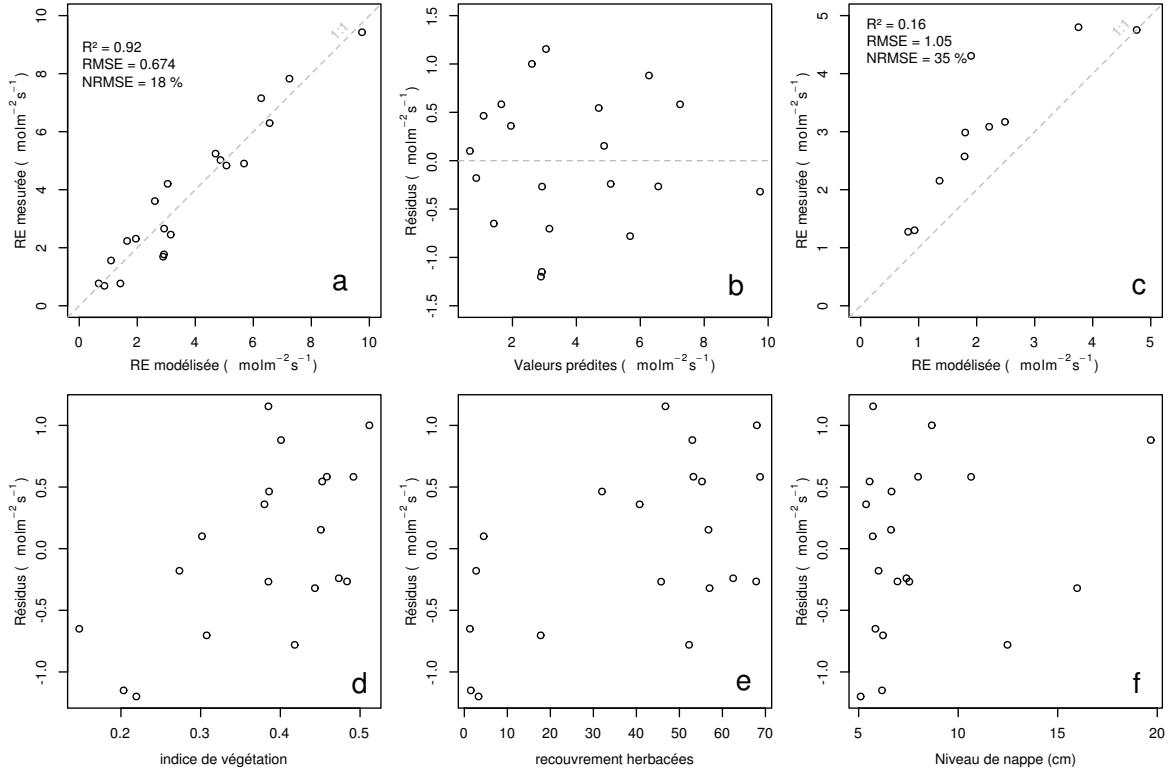


FIGURE 3.13 – RE modèles avec Tair

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

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

3.3. Résultats

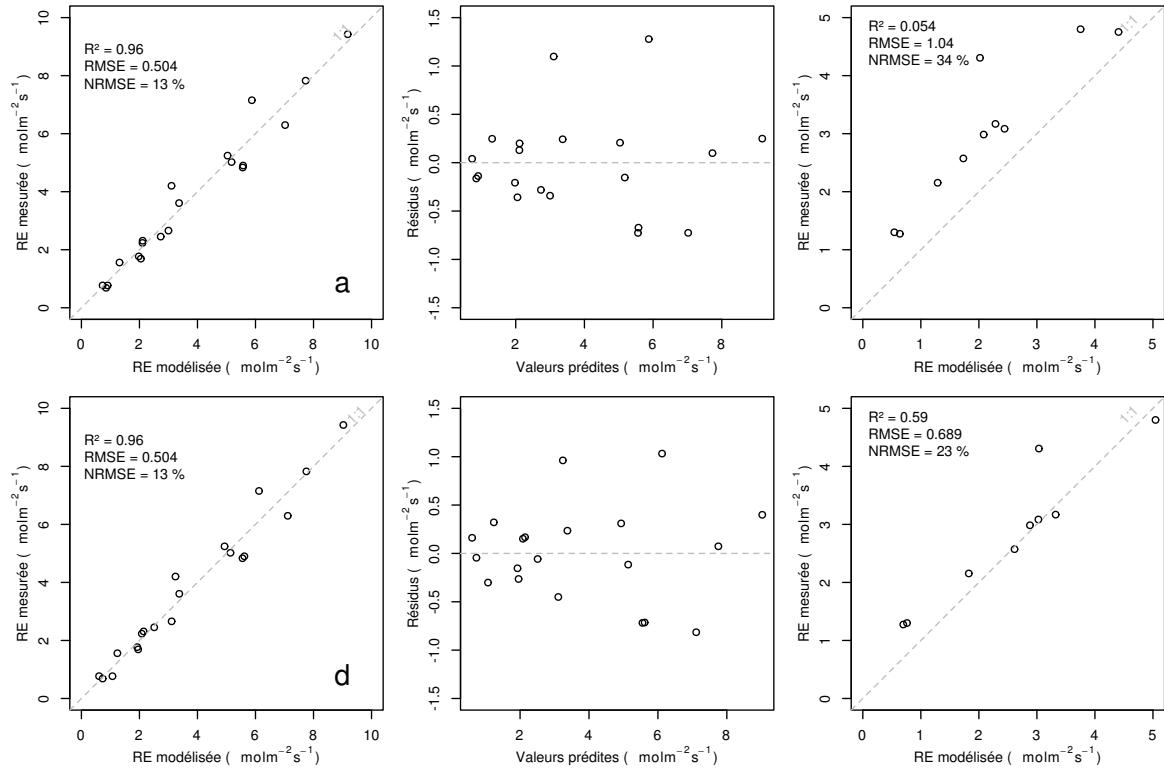


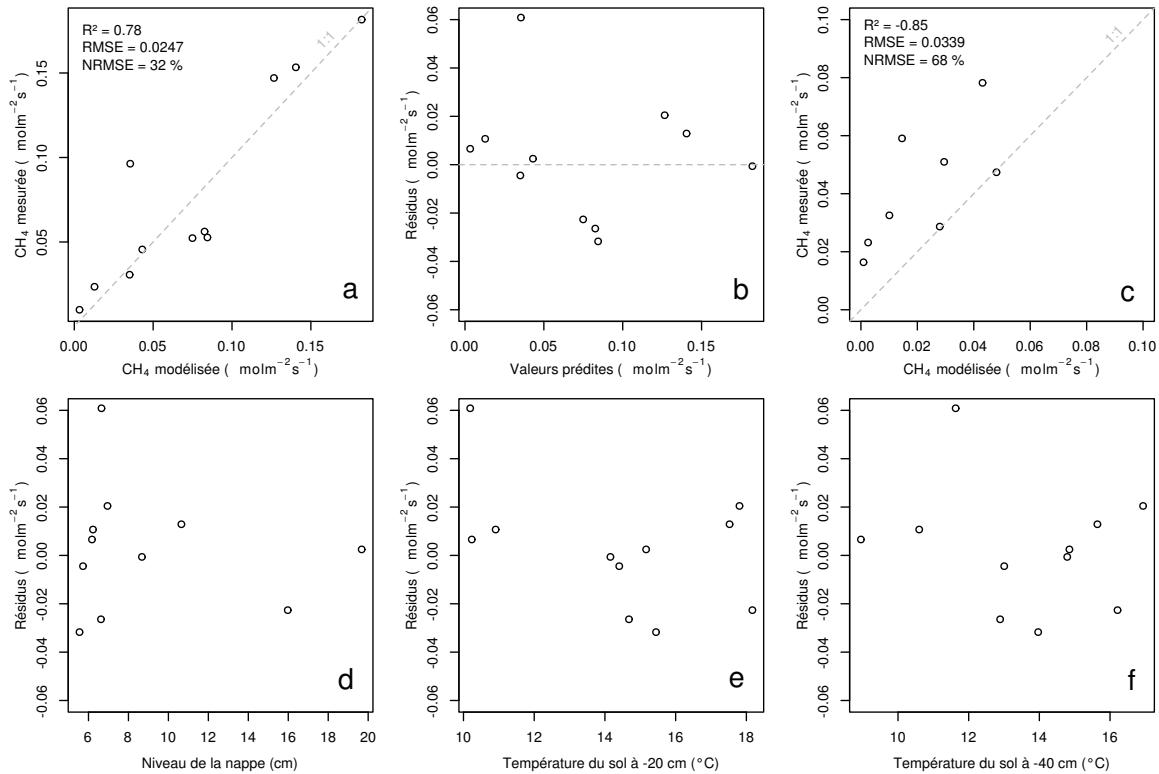
FIGURE 3.14 – RE modèles avec Tair

962 Le flux de CH₄

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

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

969 Avec les données acquises, l'indice de végétation est le meilleur prédicteur (Fi-
 970 gure 3.15), il explique 78 % de la variabilité du CH₄ avec une erreur standard de 32 %.
 971 Aucune tendance ne semble se dégager entre les résidus de cette équation et les facteurs
 972 contrôlant mesurés. L'évaluation de cette équation montre une tendance à sous-estimer
 973 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.

976 Le COD

977 3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle 978 de l'écosystème

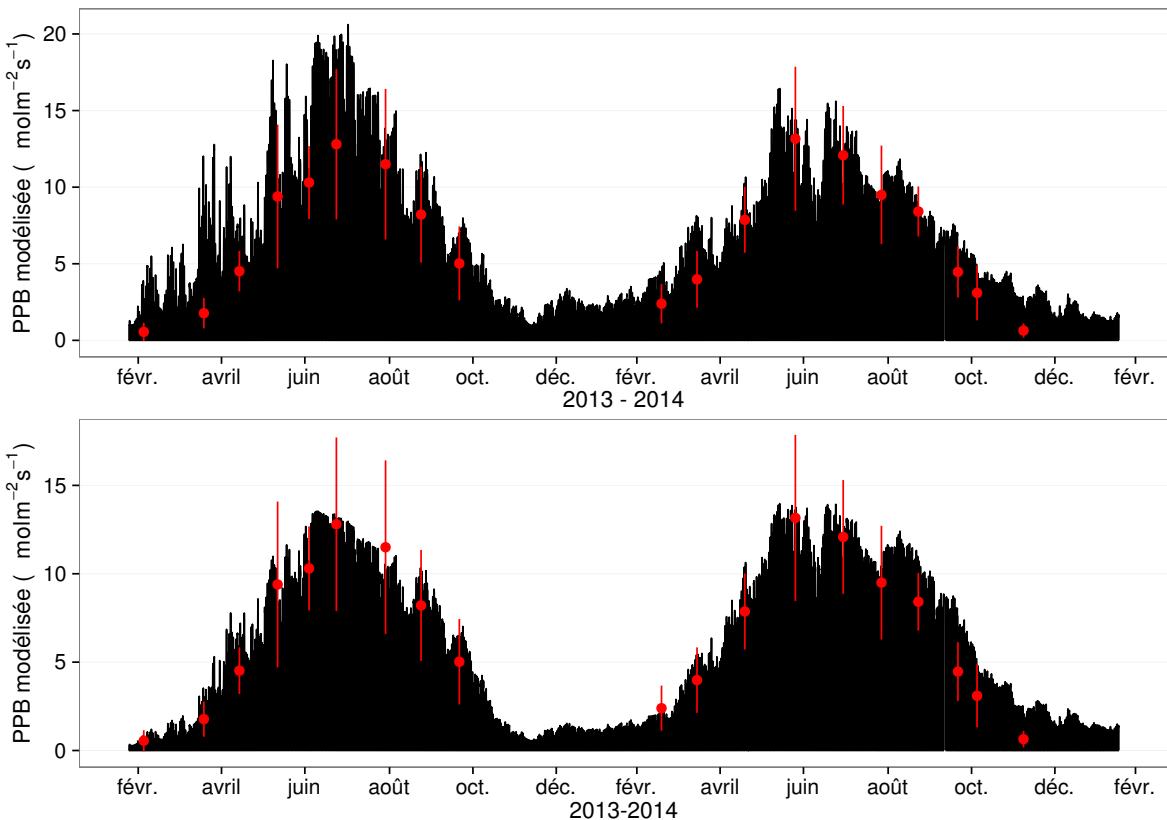
979 L'interpolation des flux de PPB montrent une variabilité saisonnière proche de celle
980 mesurée sur le terrain (Figure 3.16). Les valeurs les plus fortes mesurées ne semblent
981 pas atteinte par le modèle PPB-2 à l'inverse du modèle PPB-1. Dans les deux cas les
982 modèles semblent sur-estimer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

983 Pour la RE, l'interpolation suit également les variations saisonnières mesurées men-
984 suellement (Figure 3.17). Les gammes de valeurs mesurées sont très proche des gammes
985 interpolées. L'interpolation des flux de la RE est très proche quel que soit le modèle
986 (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

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

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

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

991 Les flux interpolés à l'heure puis sommés par années sont présentés dans le ta-
992 bleau 3.2 pour les différents modèles. Sur les deux années, selon le modèle utilisé, la
993 PPB stocke du carbone pour 1070 à 1290 gC m⁻² an⁻¹ pour PPB-2 et PPB-1 respecti-
994 vement. Dans le détail on observe une différence entre les deux modèles : Celui utilisant
995 uniquement la température de l'air (PPB-1) présente un stockage plus important en
996 2013 qu'en 2014. Tandis que le modèle prenant en compte la végétation (PPB-2) stocke
997 moins de carbone en 2013 par rapport à 2014. L'intégration de la végétation minimise
998 également l'erreur standard de l'estimation, la divisant approximativement par deux.

999 La différence de comportement, entre les années de mesures, liée à l'intégration de
1000 la végétation est également visible sur l'estimation de la RE. La prise en compte de la

3.3. Résultats

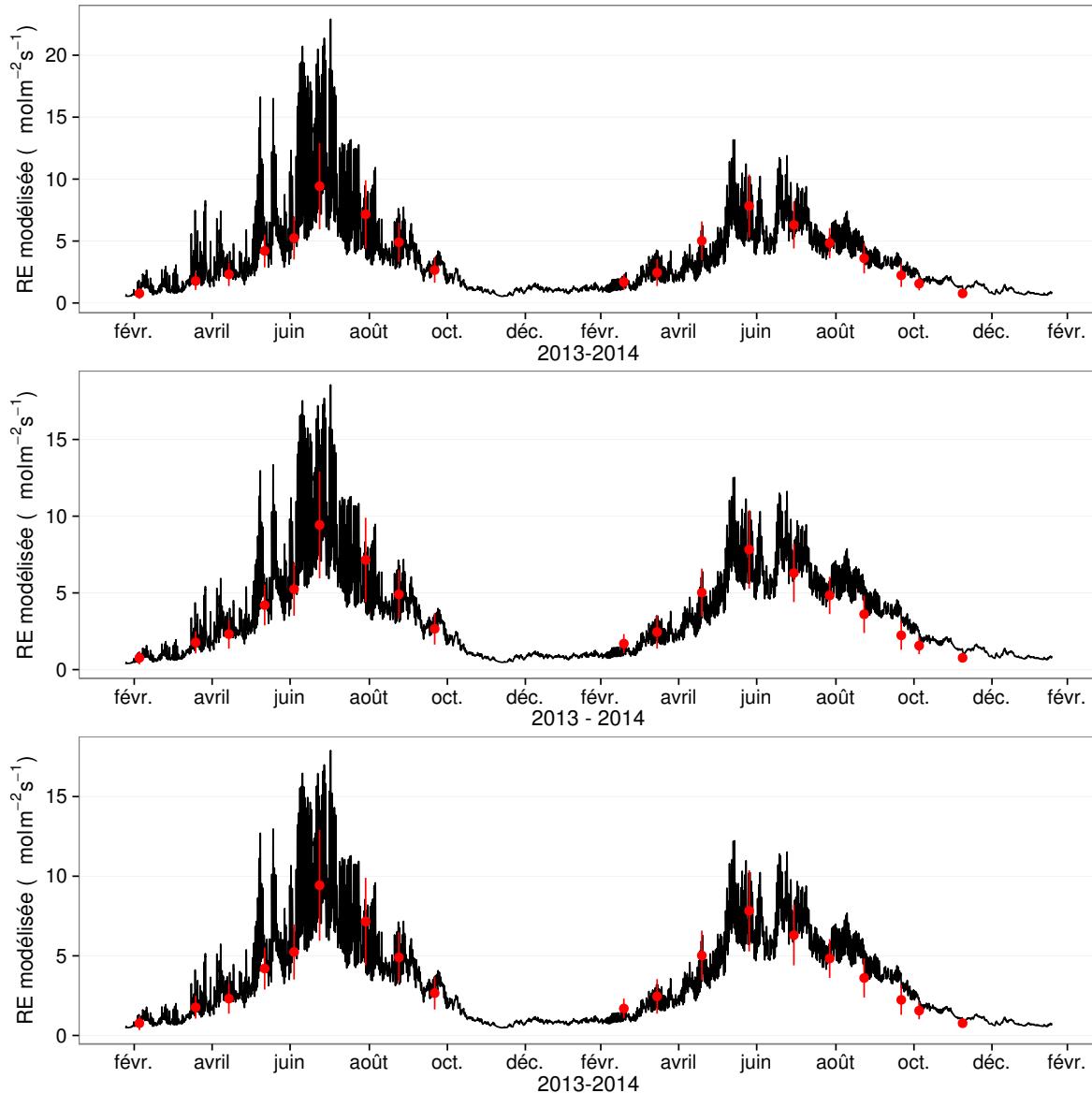


FIGURE 3.17 – Flux de CO₂ interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3

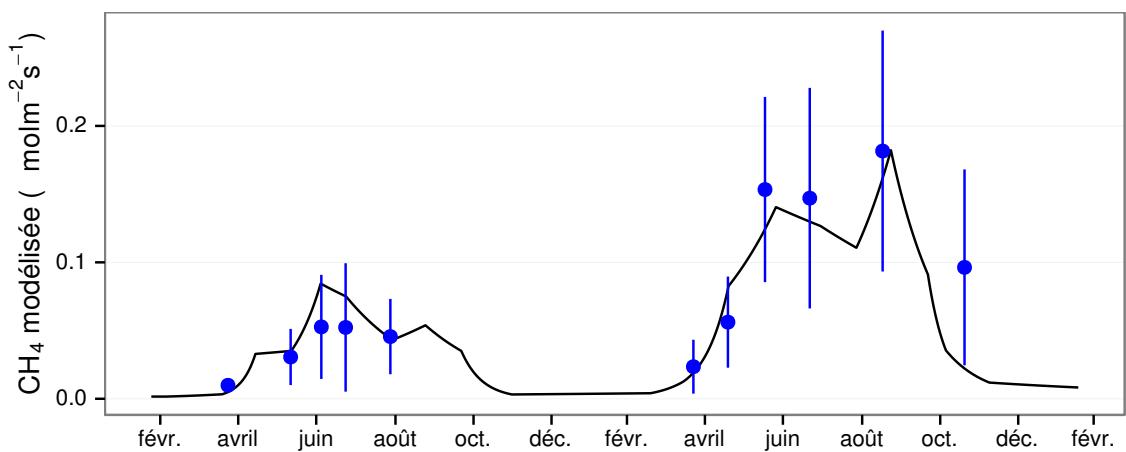


FIGURE 3.18 – Flux de CO₂ interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3

Tableau 3.2 – Bilan des flux en gCm²an⁻¹

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

Tableau 3.3 – Bilan des flux en gCm²an⁻¹

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

1001 végétation (modèles RE-2 et RE-3) conduit à une respiration plus forte en 2014 qu'en
 1002 2013 à l'inverse de RE-1. La différence entre l'estimation de la RE en 2013 et en 2014
 1003 diminue avec l'intégration de la végétation. Elle passe de 102 pour RE-1 à 78 puis
 1004 41 pour RE-2 et RE-3. Malgré ces différences, on observe une grande proximité dans
 1005 les valeurs des flux interpolés sur les 2 années, quel que soit le modèle, avec un écart
 1006 maximum de 25 gC m⁻² an⁻¹.

1007 Les flux de CH₄ entachés d'une erreur importante, sont cependant beaucoup plus
 1008 faible en valeur absolue que ceux de la PPB ou de la RE. On y observe malgré tout un
 1009 flux qui fait plus que doubler en 2014 par rapport à 2013.

1010 Les bilans issus des différentes combinaisons (à l'exception de RE-3, très proche de
 1011 RE-2) de modèles sont présentés dans le tableau 3.3 et varient de -233 gC m⁻² an⁻¹
 1012 à +12 gC m⁻² an⁻¹ stocké dans la tourbière. L'intégration de la végétation dans la
 1013 modélisation de PPB fait baisser les bilans de carbone dans le négatif au-delà de
 1014 -200 gC m⁻² an⁻¹, avec une différence entre les bilans de 220 gC m⁻² an⁻¹ environ.
 1015 Cette différence sur les bilans est bien moindre, environ 26 gC m⁻² an⁻¹ entre les mo-
 1016 dèles de RE qui intègrent et ceux qui n'intègrent pas la végétation.

3.3. Résultats

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

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

1017 Évaluation du bilan

1018 L'analyse de sensibilité, consistant à faire varier chaque paramètre des modèles
 1019 de $\pm 10\%$, les combinaisons de modèles PPB-1, PPB-2, RE-1 et RE-3 ont été testé
 1020 (Tableau 3.4). Le modèle RE-2, très proche du modèle RE-3 n'a pas été testé. **Attente**
 1021 **du COD, les valeurs du tableau sont fausse pour le moment**

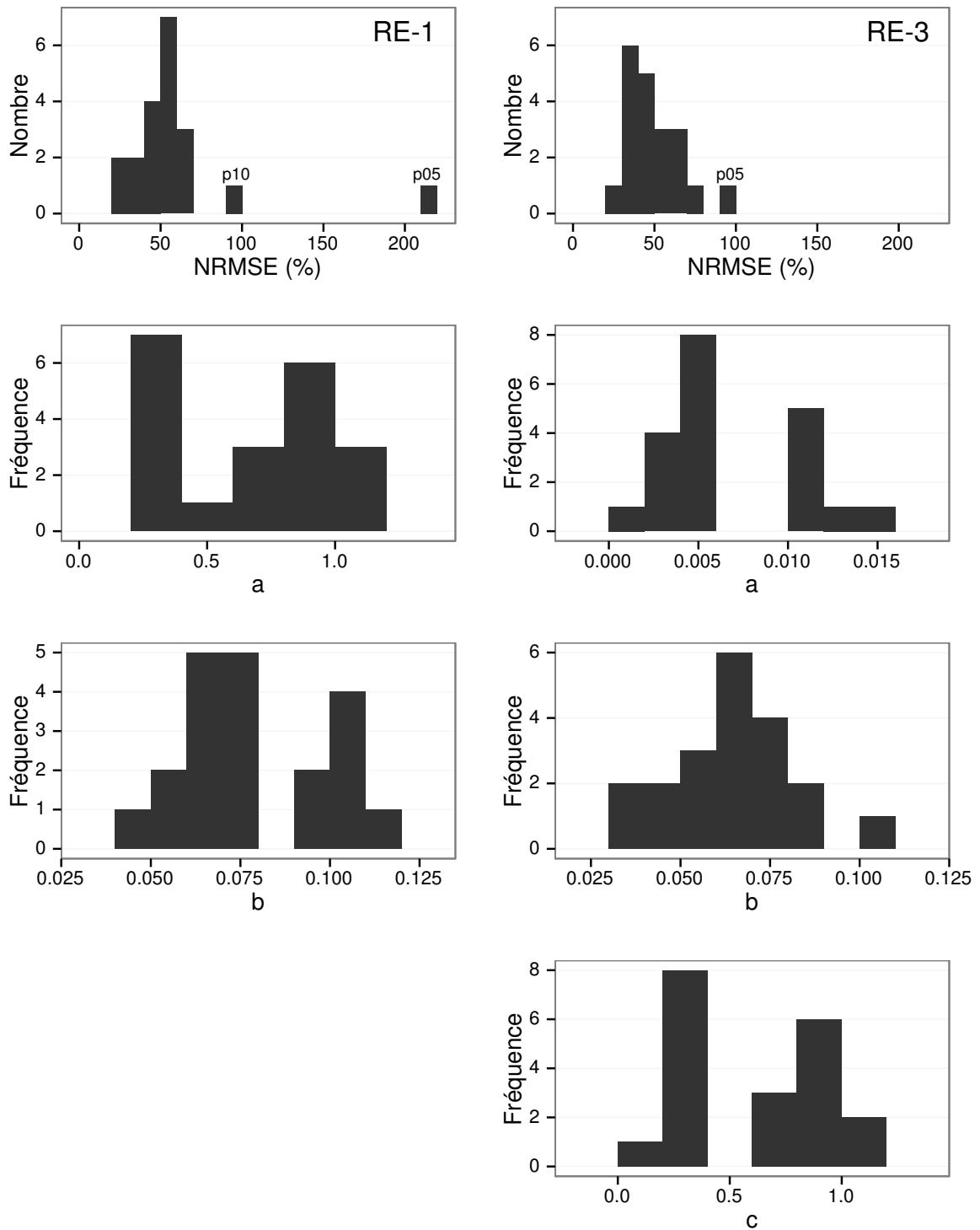


FIGURE 3.19 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres des modèles RE-1 et RE-3

3.3. Résultats

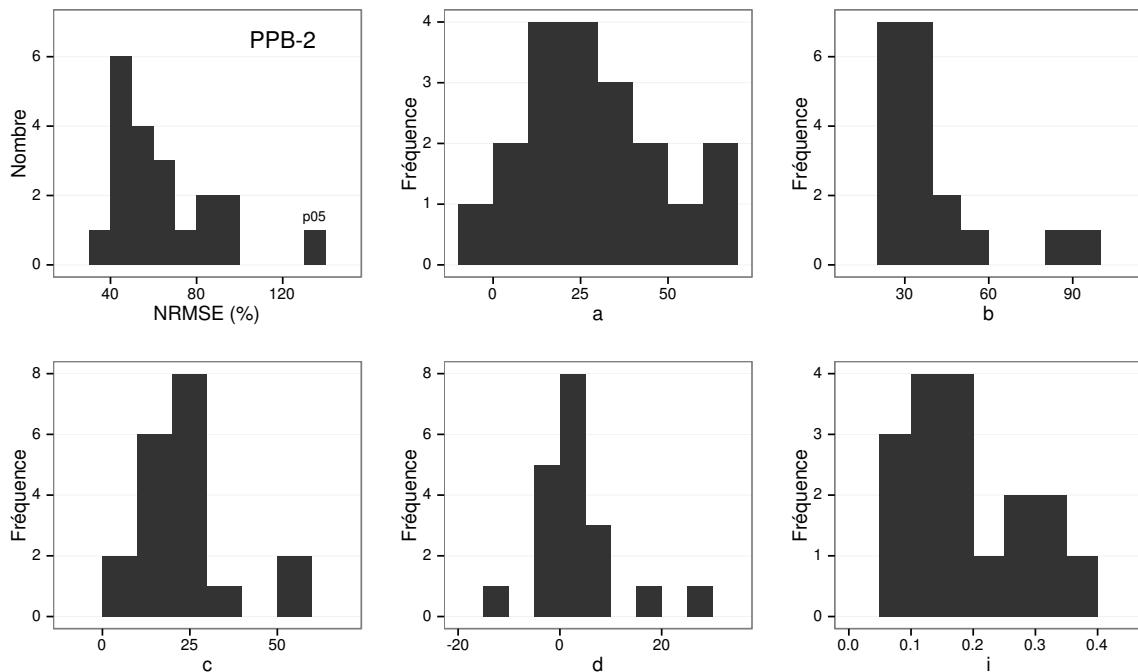


FIGURE 3.20 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2

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-

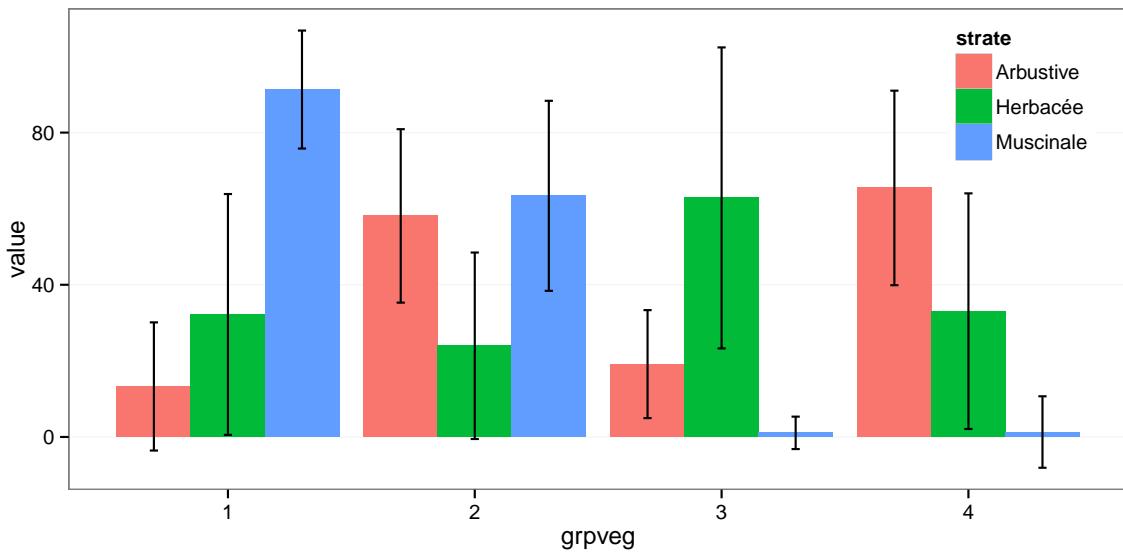


FIGURE 3.21 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2

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

1045 Modélisation par placette

1046 Corrélation avec facteurs contrôlant

1047 3.4 Discussion

1048 3.4.1 Estimations des flux

1049 PPB

1050 L'estimation des flux de PPB, est comprise entre 957 et 1322 gC m⁻² an⁻¹ selon
1051 l'année et le modèle utilisé. Ces valeurs sont très élevées comparées à des tourbières
1052 boréales comme celles étudiées par (Trudeau *et al.*, 2014) ou encore (Peichl *et al.*, 2014)
1053 dont les valeurs de PPB sont respectivement comprise entre 123 et 131 gC m⁻² an⁻¹
1054 et entre 203 et 503 gC m⁻² an⁻¹. Une première hypothèse permettant d'expliquer une
1055 telle différence, est la différence entre les températures moyennes sur les sites. -4,3 °C
1056 et 1,2 °C respectivement pour Trudeau *et al.* (2014) et Peichl *et al.* (2014). Ces tempé-
1057 ratures sont bien plus faible pour les sites des études pré-citées que sur la tourbière de
1058 La Guette. Une seconde hypothèse, qui n'exclue pas la première, serait la composition
1059 végétale de ces sites. La tourbière de La Guette envahie par une végétation vasculaire,
1060 notamment herbacée, est peut-être plus proche d'une prairie tourbeuse. En effet lorsque
1061 la compare à ce type d'écosystèmes les valeurs observées sont plutôt proche. (Jacobs
1062 *et al.*, 2007) estime des valeurs de PPB comprises entre 400 et 2000 gC m⁻² an⁻¹ avec
1063 une moyenne de 1300 gC m⁻² an⁻¹ dans des prairies tourbeuses hollandaises. Sur des
1064 écosystèmes similiaires, au Danemark, (Görres *et al.*, 2014) trouve des valeurs de PPB
1065 plus importantes encore, entre 1555 et 2590 gC m⁻² an⁻¹. Il apparaît cohérent que la
1066 tourbière de La Guette, par sa position géographique, et donc le climat qu'elle subit,
1067 mais également par sa problématique d'envahissement important par une végétation
1068 vasculaire notamment herbacée, s'approche en termes de flux de site tourbeux utilisés
1069 comme prairie.

1070 Le modèle PPB-1 souffre d'une incertitude importante sur l'estimation de ses para-
1071 mètres. L'apport de l'indice de végétation dans l'estimation de la PPB est important
1072 lors de la phase de calibration. Il permet de diminuer fortement l'incertitude sur les
1073 paramètres du modèles, d'augmenter leur significativité et d'améliorer la représentati-
1074 vité des données mesurées. L'intégration de la végétation aux modèles d'estimation de
1075 la PPB est rarement réalisé ([Bortoluzzi et al., 2006; Görres et al., 2014](#)), probablement
1076 à cause de la difficulté à prendre en compte ce signal aux sources multiples. Malgré
1077 cette amélioration lors de la calibration, lorsqu'il est évalué sur un jeu de données indé-
1078 pendante, le modèle PPB-2 à une erreur standard plus importante que celle du modèle
1079 PPB-1. L'apport de cet indice dans l'estimation de la PPB n'est donc pas généralisable.
1080 Bien que rarement faite à cause de la rareté des données, l'évaluation des modèles est
1081 cependant d'un intérêt majeur afin de confirmer ou d'infirmer l'apport de l'ajout d'un
1082 prédicteur à un modèle, particulièrement si l'on souhaite l'extrapoler.

1083 Les différences observées selon la façon d'estimer la PPB peuvent paraître impor-
1084 tante, néanmoins elles sont du même ordre de grandeur que celle rencontré par [Worrall](#)
1085 *et al.* ([2009](#)) qui compare différentes façons de modéliser des flux de gaz avec des équa-
1086 tions différentes (et non pas juste des variations sur un type de modèle). Ces différences
1087 sont également liées à l'importance des flux qui font que, surtout dans le cas de mo-
1088 dèles exponentiels, de faibles variations peuvent avoir des effets importants comme en
1089 témoigne l'analyse de sensibilité des paramètres du modèle (Tableau [3.4](#)).

1090 **Discussion 2013-2014 ?** Dans le détail l'intégration de l'indice de végétation à un
1091 effet beaucoup plus important en 2013, avec un flux qui diminue de $365 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$,
1092 qu'en 2014 où la baisse n'est que de $74 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

1093 RE

1094 De la même façon que pour la PPB, les flux de la RE sont important si on les
1095 compare à des tourbières boréales et s'approchent davantage des flux mesurés dans
1096 les prairies sur sols tourbeux. La Re sur la tourbière de La Guette, comprise entre
1097 1232 et $1337 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ est plus importante que celle observée par ([Peichl et al.,](#)

3.4. Discussion

1098 2014; Trudeau *et al.*, 2014) (pour reprendre les études citées précédemment) qui s'éta-
1099 blissent respectivement entre 137 et 443 gC m⁻² an⁻¹ et 206 et 234 gC m⁻² an⁻¹. Elles
1100 sont en revanche plus faible que celle mesurées par (Jacobs *et al.*, 2007), entre 500 et
1101 2000 gC m⁻² an⁻¹, ou par (Görres *et al.*, 2014) : entre 2070 et 3500 gC m⁻² an⁻¹.

1102 À l'inverse de la PPB, l'intégration de la végétation pour modéliser la RE n'amé-
1103 liore que peu l'estimation de la RE lors de la phase de calibration : la différence entre
1104 les valeurs d'erreur standard est de 5 %. En revanche lors de la phase d'évaluation,
1105 l'utilisation du recouvrement des herbacées semble améliorer l'estimation de façon plus
1106 importante avec une différence de 11 % entre les valeurs d'erreur standard. Contraî-
1107 rement à la PPB la différence apportée par l'intégration de la végétation (RE-2 ou
1108 RE-3) est du même ordre de grandeur en 2013 et en 2014. Sur les 2 années, l'effet
1109 de l'intégration de la végétation est limité avec une différence de 25 gC m⁻² an⁻¹ au
1110 maximum (entre ER-1 et ER-3), soit moins de 2 % du flux. Encore une fois l'intérêt
1111 de l'évaluation est mis en avant puisqu'il permet de distinguer des modèles très proche
1112 lors de la calibration.

1113 Les incertitudes sur l'estimation des paramètres RE sont beaucoup moins impor-
1114 tante que celle de la PPB. L'estimation des paramètres des modèles, à l'exception du
1115 paramètre c du modèles RE-2, ont une p-value inférieure à 0.05. L'erreur calculée lors
1116 de l'évaluation de ces modèles, si elle augmente par rapport à la calibration, reste faible
1117 particulièrement pour le modèle RE-3 où elle vaut moins de 25 %. La RE semble donc
1118 relativement contrainte, avec une estimation des paramètres fiable et une différence
1119 entre les estimations issues des modèles relativement limitée.

1120 CH₄

1121 Les flux de CH₄ sont faibles comparés aux flux de CO₂. Les valeurs mesurées sont
1122 plus forte que celles mesurés entre 0 et 0,03 μmol m⁻² s⁻¹ par Bortoluzzi *et al.* (2006).
1123 Pour 2013 les valeurs mesurées sont proches de celle mesurée par Long *et al.* (2010).
1124 L'absence d'étiage en 2014 explique peut-être le doublement des flux... (**Réf needed**)

1125 La faible relation observée entre le niveau de la nappe et les flux de méthane va dans

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

COD

3.4.2 Estimations des bilans

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

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

3.4.3 Sensibilité et limitations du bilan

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

3.4. Discussion

1152 tivement bien contrainte, sur les 2 années la différence entre les différentes équations
1153 utilisées ne dépassent pas $25 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

1154 sensibilité du bilan au variation des paramètres

1155 **limitations** Outre ces aspects ce bilan de carbone est aussi limité par sa repré-
1156 sentativité. Ainsi la strate arborée fortement présente dans certaines zones n'est pas
1157 directement prise en compte. De la même manière une partie restreinte de la tourbière
1158 mais néanmoins présente est constitué de touradons dont l'effet n'a pas été pris en
1159 compte.**(Réf needed)(biblio effet microtype)**.

- 1160 — pas de cartographie (pas grave si p7 maj bien représentée par mdl ecos)
1161 — extrapolation sur d'autres site difficile (cf validation)

1162 3.4.4 Représentativité locale du modèle

1163 Distribution des paramètres

1164 Pourquoi certaines placette mieux que d'autres

1165 Concernant la respiration la représentativité locale des modèles calibrés à l'échelle
1166 de l'écosystème semble plus homogène pour le modèle RE-3 que pour le modèle RE-1.

1167 Une telle comparaison entre PPB-1 et PPB-2 n'a pas été possible car vu le faible
1168 nombre de données et la qualité relative des modèles PPB par rapport aux modèles
1169 RE, peu de modèles sont parvenus à converger pour PPB-1 (11 sur 20 placettes) et
1170 pour PPB-2 (17 sur 20 placettes).

1171 3.4.5 Variation du bilan avec la végétation

1172 Le calcul des bilans avec les groupes de végétation permet de mettre en évidence
1173 des comportements différents des flux selon la végétation majoritaire. Ainsi le groupe 3
1174 dans lequel la strate herbacée est la plus importante est celui où la PPB est la plus forte.
1175 Ce point semble en cohérence avec la croissance annuelle importante des herbacées. À
1176 l'inverse le groupe 1 dans lequel la strate muscinale est la plus importante est également
1177 le groupe pour lequel la PPB est la plus faible. **(Réf needed)**

1178 Pour la RE, ce sont les groupes 3 et 4 qui ont les flux estimés les plus importants
1179 avec une différence d'environ $200 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ avec les deux autres groupes. Malgré
1180 leurs différences, le groupe 2 possède une strate muscinale importante alors qu'elle est
1181 absente dans le groupe 3, ils ont en commun d'avoir une strate arbustive importante.

1182 **3.4.6 perspectives**

1183 cartographie ?

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

¹¹⁸⁵

¹¹⁸⁶	4.1 Introduction	⁷⁸
¹¹⁸⁷		
¹¹⁸⁸	4.2 Procédure expérimentale	⁷⁹
¹¹⁸⁹	4.2.1 Expérimentation A	⁸⁰
¹¹⁹⁰	4.2.2 Expérimentation B	⁸⁰
¹¹⁹¹	4.2.3 traitement	⁸¹
¹¹⁹²	4.3 Résultats	⁸²
¹¹⁹³	4.3.1 Expérimentation A	⁸²
¹¹⁹⁴	4.3.2 Expérimentation B	⁸⁵
¹¹⁹⁵	4.3.3 tendances générales	⁸⁸
¹¹⁹⁶	4.4 Discussion	⁸⁸
¹¹⁹⁷	4.4.1 Comparaison aux mesures <i>in-situ</i>	⁸⁸
¹¹⁹⁸	4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de gaz	⁹⁰
¹²⁰⁰	4.4.3 Effet cycles multiples	⁹¹
¹²⁰¹		

1202 4.1 Introduction

1203 Au cours des deux années qu'ont duré les suivis des émissions de flux de CO₂ et
1204 de CH₄ sur la tourbière de La Guette, le niveau de la nappe n'a que très faiblement
1205 varié comparé aux années précédentes bien plus sèches. En conséquence de cette faible
1206 variation peu de variations des flux ont pu y être relié. Malgré tout il est connu que
1207 l'hydrologie est un facteur contrôlant important des flux.

1208 Ainsi de nombreuses études on reliées les émissions de CO₂ au niveau de la nappe
1209 avec, cependant, des résultats et des conclusions variables. La majorité des études
1210 montrent qu'une tourbière dont le niveau de la nappe est abaissé, soit par un drainage,
1211 soit par une sécheresse, aura tendance à avoir un ENE plus faible : Ainsi [Strack et](#)
1212 [Zuback \(2013\)](#) expliquent des valeurs d'ENE plus faibles qu'escompté, par des mesures
1213 faites pendant une période relativement sèche. Une observation similaire est faite par
1214 [Aurela et al. \(2007\)](#) qui mesure un ENE plus faible lors d'une année sèche, sur une
1215 tourbière à Carex du sud de la Finlande. Ils attribuent la variation de l'ENE à une
1216 augmentation de la RE et à une baisse de la PPB, dans des conditions plus chaudes
1217 et plus sèches. [Peichl et al. \(2014\)](#) observent également une baisse de l'ENE lors d'une
1218 année où le niveau de la nappe baisse de façon importante, au delà de -30 cm. Ils
1219 expliquent cette baisse par une baisse de la PPB. Cette observation va dans le même
1220 sens que [Lund et al. \(2012\)](#) qui, lors de l'étude d'une tourbière située au sud de la suède,
1221 observent en 2008 une baisse de l'ENE. Les mesures de RE faites cette année là étant
1222 similaires à celles effectuées les autres années, ils lient cette baisse à une diminution
1223 de la PPB. En 2006, sur la même tourbière, [Lund et al. \(2012\)](#) observent une autre
1224 baisse de l'ENE. Mais cette fois, les mesures de PPB à leur tour similaires à celle
1225 des autres années n'expliquent pas cette baisse. À l'inverse de 2008, cette baisse est
1226 expliqué par une augmentation de la RE Ce paradoxe apparent est interprété grâce
1227 au type de sécheresse : courte et intense pendant la saison de végétation de 2006 et
1228 d'intensité plus faible mais d'une durée plus longue en 2008. Enfin et à l'inverse des

1229 résultats précédemment cités, [Ballantyne et al. \(2014\)](#) dans une étude des effets à long
 1230 terme d'une baisse du niveau de la nappe, n'observe que peu d'effet sur l'ENE tandis
 1231 que les flux de RE et de PPB augmentent tous deux. Toutes ces études montrent que
 1232 si le niveau de la nappe est incontestablement reconnu comme un facteur de contrôle
 1233 des flux de CO₂, il est difficile d'en dégager, avec certitude, un comportement valable
 1234 de façon générale.

1235 Concernant le méthane, une baisse du niveau de la nappe est généralement liée à
 1236 une baisse des émissions de CH₄, et inversement ([Strack et al., 2006; Pelletier et al.,](#)
 1237 [2007; Turetsky et al., 2008](#)). Cependant d'autres études, principalement dans des sites
 1238 où le niveau de la nappe est proche de la surface du sol, montrent une absence de
 1239 relation entre le niveau de la nappe et les émissions de méthane, voire une relation
 1240 inverse, avec des flux plus faibles liés à des niveaux de nappe plus élevés ([Kettunen](#)
 1241 [et al., 1996; Bellisario et al., 1999; Treat et al., 2007](#)). Là encore selon les conditions
 1242 environnementales, la relation entre les flux de CH₄ et le niveau de la nappe n'est pas
 1243 aisément généralisable.

1244 L'objectif de ce chapitre est donc d'explorer plus en avant l'effet du niveau de la
 1245 nappe sur les émissions de GES, effet peu ou pas visible *in-situ*. Plus précisément il
 1246 s'agit de déterminer l'effet de cycles de dessication/ré-humectation sur les émissions de
 1247 CO₂ et de CH₄.

1248 4.2 Procédure expérimentale

1249 L'étude des cycles de dessication/ré-humectation s'est effectué sur des mésocosmes,
 1250 prélevés sur la tourbière de La Guette. L'expérimentation a été testé durant l'été 2013
 1251 avec un seul cycle relativement long, on s'y référera par la suite comme l'expérimenta-
 1252 tion A. Cette expérimentation a été renouvelée l'été 2014 afin d'augmenter à trois le
 1253 nombre de cycles, ceux-ci étant plus court. On appellera cette seconde expérimentation,
 1254 l'expérimentation B (Tableau 4.1).

4.2.1 Expérimentation A

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

4.2.2 Expérimentation B

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



FIGURE 4.1 – Prélèvement des mésocosmes

Tableau 4.1 – Récapitulatif des mesures pour les deux expérimentations

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

¹²⁸² Le deuxième cycle dura du 17 au 28 juillet et du 29 juillet au 3 aout, Enfin le dernier
¹²⁸³ cycle fut mesuré du 4 au 11 aout pour la dessication et du 12 au 14 aout pour la
¹²⁸⁴ réhumectation.

¹²⁸⁵ 4.2.3 traitement

¹²⁸⁶ Les flux sont moyennés par jour de mesure.

4.3. Résultats

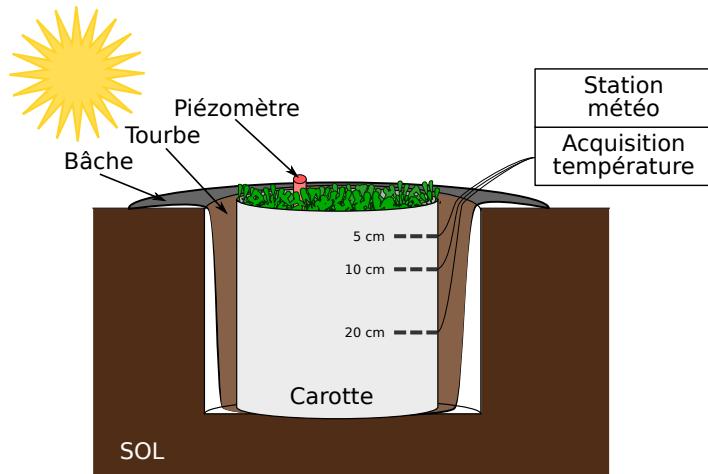


FIGURE 4.2 – Schéma d'un mésocosme

¹²⁸⁷ 4.3 Résultats

¹²⁸⁸ 4.3.1 Expérimentation A

¹²⁸⁹ Pendant la phase de dessication de l'expérimentation A, on observe une baisse du
¹²⁹⁰ niveau de la nappe pour les placettes contrôles comme pour les placettes traitements
¹²⁹¹ (Figure 4.3–A). Malgré tout leur comportement est différent : les placettes contrôles ont
¹²⁹² un niveau de nappe relativement élevé jusqu'au 24 juin puis ce niveau baisse fortement
¹²⁹³ alors que les placettes du groupe traité ont un niveau de nappe qui diminue de façon
¹²⁹⁴ plus continue sur l'ensemble de la phase. La remontée du niveau de la nappe s'effectue
¹²⁹⁵ de façon similaire pour les deux groupes. Enfin après la phase de ré-humectation, le
¹²⁹⁶ niveau de la nappe baisse à nouveau, plus rapidement pour le groupe traitement que
¹²⁹⁷ pour le groupe contrôle.

¹²⁹⁸ Les émissions de CH_4 , s'étendant de 0 et $0,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sont relativement si-
¹²⁹⁹ milaires entre les deux groupes jusqu'au 24 juin 2013, date à partir de laquelle ils
¹³⁰⁰ commencent à diverger (Figure 4.3–B). À cette date les émissions du groupe contrôle
¹³⁰¹ augmentent rapidement pour atteindre $0,55 \pm 0,31 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ tandis que celles du
¹³⁰² groupe traité restent stable. Finalement mi-juillet, à la fin de la phase de dessicca-
¹³⁰³ tion les deux groupes retrouvent des niveaux d'émission similaires compris entre 0,1 et

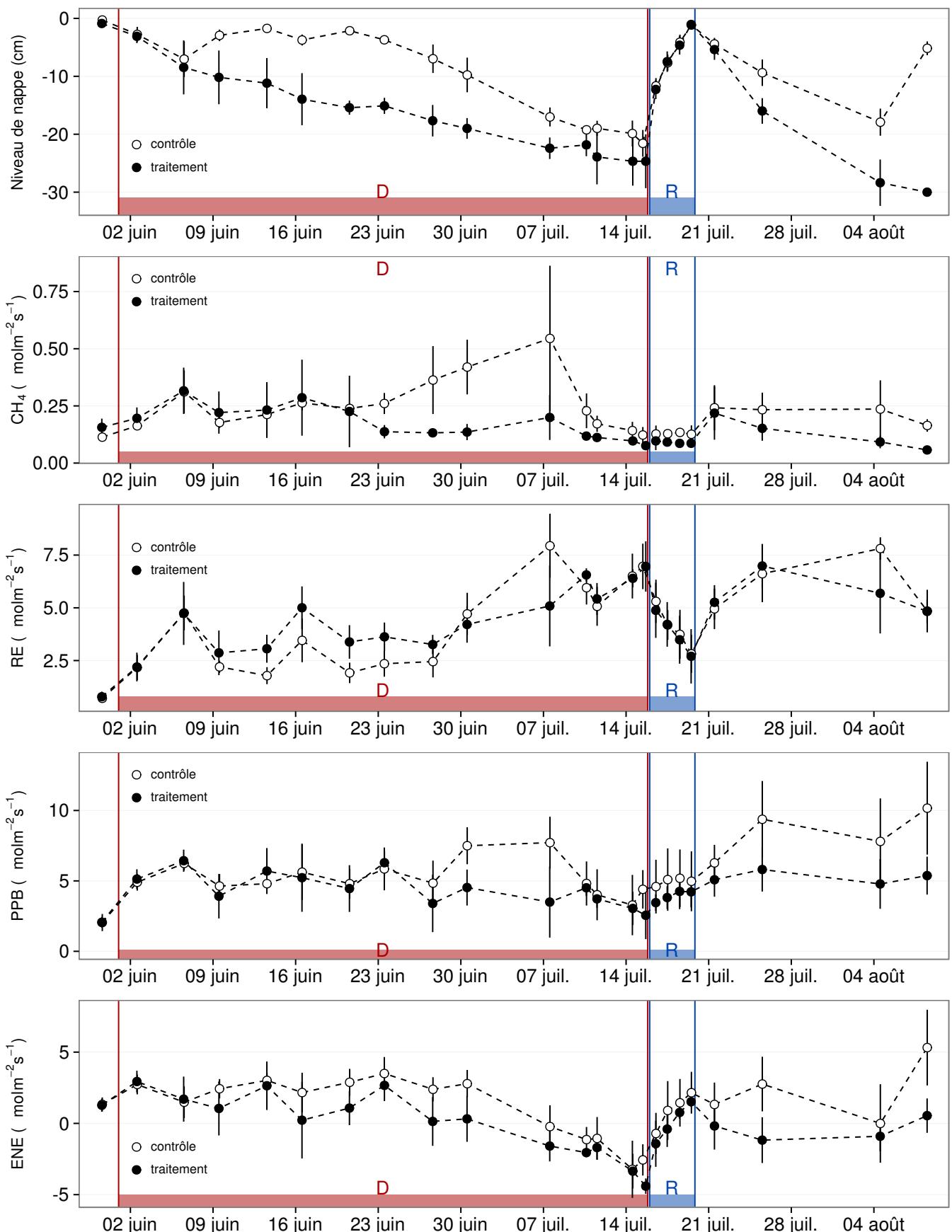


FIGURE 4.3 – Expérimentation A : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH_4 , RE, PPB, ENE en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent à la phase de dessiccation (D) en rouge et à la phase de réhumectation (R) en bleu.

4.3. Résultats

1304 0,2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ces niveaux restent constant pendant toute la phase de réhumecta-
1305 tion, avant d'augmenter légèrement par la suite ; ils ne dépassent pas 0,25 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
1306 mais franchissent la barre des 0,2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

1307 Pendant la phase de dessication, les valeurs de la RE tendent à augmenter quel
1308 que soit le groupe de placettes considéré (Figure 4.3–C). Ces valeurs inférieures à
1309 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
1310 mi-juillet, avant la réhumectation. Dans le détail cependant les deux groupes ne se
1311 comportent pas de la même façon : la RE du groupe traité augmente régulièrement
1312 pendant l'ensemble de cette phase, tandis que les valeurs du groupe de contrôle res-
1313 tent, dans un premier temps, stable jusque fin juin. La RE de ce groupe vaut alors
1314 $2,45 \pm 0,75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ contre $3,26 \pm 0,46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le groupe traité. Cet
1315 écart, pouvant varier dans le temps, étant installé depuis le 9 juin. À partir de dé-
1316 but juillet, les valeurs de RE du groupe de contrôle augmentent fortement dépas-
1317 sant les valeurs du groupe traité. La RE de ce groupe atteint alors un maximum à
1318 $7,93 \pm 1,52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ le 8 juillet avant de retrouver des valeurs proche de celles ob-
1319 servées dans le groupe traité. Cette augmentation brusque correspond temporellement
1320 à celle observé, pour le même groupe, dans les flux de CH₄. Lors de la phase de réhu-
1321 mectation, les flux de RE diminuent de façon très similaire pour les deux groupes ou
1322 ils atteignent un minimum proche de 2,75 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ce minimum reste cependant
1323 plus élevé que les valeurs mesurées initialement. Après la phase de réhumectation, les
1324 flux des deux groupe restent relativement proches pendant le reste des mesures, où ils
1325 remontent à mesure que le niveau de la nappe diminue à nouveau.

1326 Pour les deux groupes, les flux de PPB restent relativement stables pendant la
1327 phase de dessiccation (Figure 4.3–D). Jusqu'au 24 juin, les flux des deux groupes sont
1328 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
1329 moyenne pour les deux groupes). Après cette date, et comme pour le CH₄ et la RE,
1330 les valeurs de la PPB du groupe de contrôle augmentent et s'écartent de celles me-
1331 surées dans le groupe traité, en attendant de les rejoindre avant la fin de cette phase
1332 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

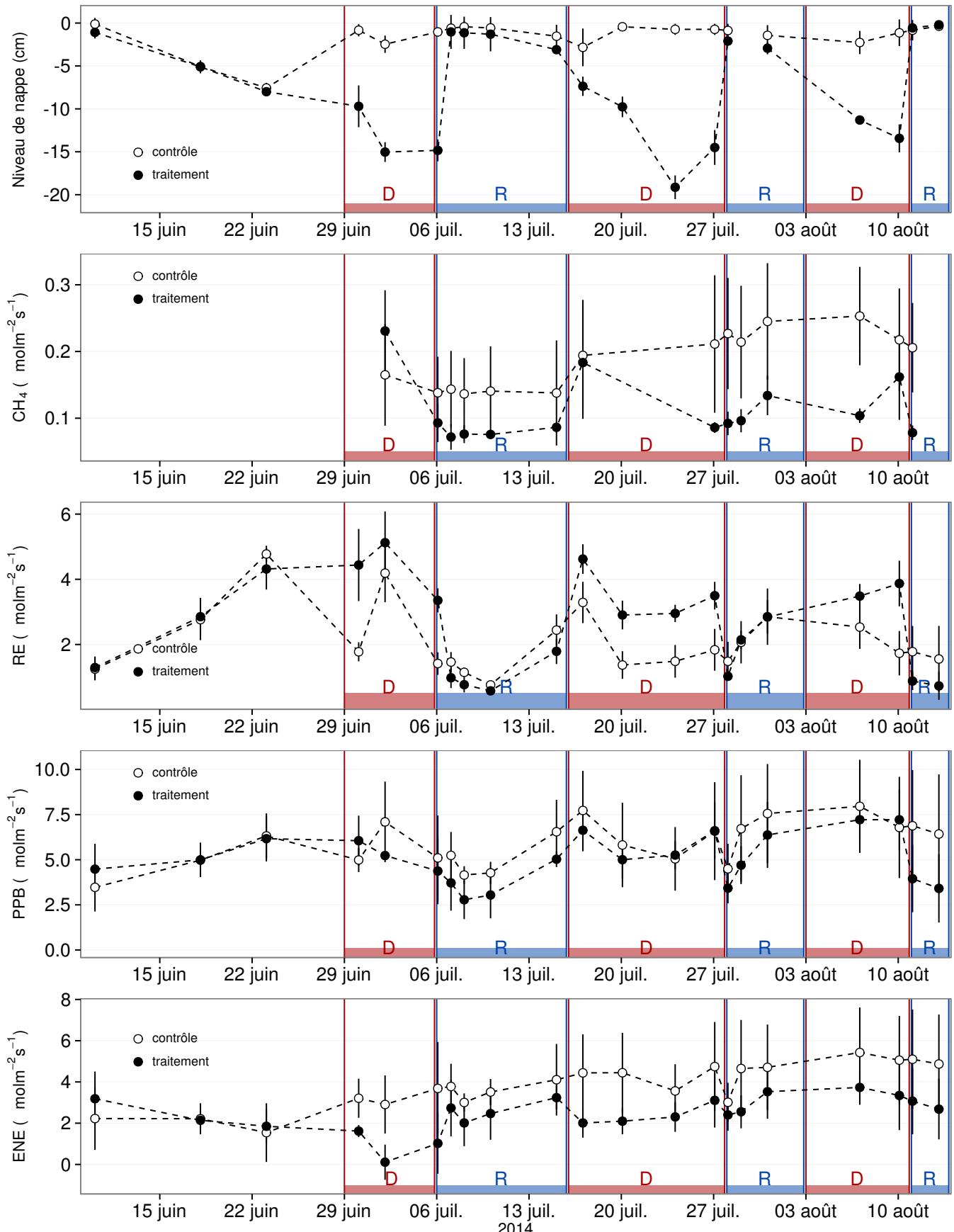


FIGURE 4.4 – Expérimentation B : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH_4 , RE, PPB, ENE en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent aux phases de dessiccation (D) en rouge et aux phases de réhumectation (R) en bleu.

1361 d'une quinzaine de centimètres en moyenne pour chaque cycle (Figure 4.4–A).

1362 Les flux de CH₄ moyen s'étendent de 0,07 à 0,34 µmol m⁻² s⁻¹. Les flux du groupe
1363 de contrôle, à l'exception de la première mesure, sont supérieurs aux flux du groupe
1364 traité, leurs moyennes respectives sur l'ensemble des mesures étant de 0,20 ± 0,06 et
1365 0,11 ± 0,05 µmol m⁻² s⁻¹ respectivement. Les émissions du groupe de contrôle tendent
1366 à augmenter sur la période de mesure. Une tendance similaire, quoique moins mar-
1367 quée, est également visible pour le groupe traité. Concernant les cycles de dessicca-
1368 tion/réhumectation, il est difficile de dégager des comportements communs, même s'il
1369 semble que l'assèchement conduit à une baisse des émissions (Figure 4.4–B) Cette re-
1370 lation, mise en exergue pas un nombre de points très faible, n'apparaît cependant pas
1371 sur l'ensemble des données (Figure 4.5–B) Un pic d'émission de CH₄ est également à
1372 noter pour chaque cycle pendant la phase de dessiccation.

1373 La RE varie pour les deux groupes entre 0,42 et 5,12 µmol m⁻² s⁻¹ (Figure 4.4–C)).
1374 Avant le démarrage des manipulations du niveau de la nappe, les valeurs des deux
1375 groupes sont très proches et augmentent tandis que le niveau de nappe diminue. Pen-
1376 dant les phases de dessiccation, les valeurs du groupe traité sont systématiquement supé-
1377 rieures, de 1,5 à 1,8 µmol m⁻² s⁻¹ en moyenne par phase, par rapport à celle du groupe
1378 de contrôle. À l'inverse pendant les phases de réhumectation les flux entre les deux
1379 groupes sont beaucoup plus proches avec une tendance de la RE du groupe de contrôle
1380 à être au dessus de celle du groupe traité. La RE du groupe traité est systématiquement
1381 plus faible pendant les phases de réhumectations que pendant les phases de dessicca-
1382 tions. En moyenne la RE vaut respectivement 2,28 ± 1,00 et 3,86 ± 0,80 µmol m⁻² s⁻¹
1383 pour les groupes de contrôle et traité pendant les phases de dessiccation et 1,70 ± 0,62
1384 et 1,51 ± 0,98 µmol m⁻² s⁻¹ pendant les phases de réhumectation.

1385 Sur l'ensemble de la période de mesure la PPB est comprise entre 2,78 et 7,96 µmol m⁻² s⁻¹.

1386 Avant le début des traitements les flux des deux groupes sont similaires (Figure 4.4–D).
1387 La première phase de dessiccation fait passer la PPB du groupe de contrôle au dessus
1388 du groupe traité. Pour les deux groupes, la PPB est plus importante lors des phases
1389 de dessiccation comparée aux phase de réhumectation, avec des moyennes respectives

4.4. Discussion

₁₃₉₀ 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
₁₃₉₁ $4,05 \pm 1,60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le groupe traité.

₁₃₉₂ Les valeurs d'ENE mesurées sont comprises entre $0,11$ et $5,42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, elles
₁₃₉₃ ont tendance à augmenter au cours du temps. Passé la période pré-traitements pendant
₁₃₉₄ laquelle les flux de l'ENE sont similaires pour les deux groupes l'ENE du groupe de
₁₃₉₅ contrôle est systématiquement supérieure à celle du groupe de traitement (Figure 4.4–
₁₃₉₆ E). L'évolution des deux groupes reste cependant relativement conjointe pendant la
₁₃₉₇ période de mesure avec pour le groupe traité une diminution récurrente de l'ENE au
₁₃₉₈ début de chaque phase de dessiccation.

4.3.3 tendances générales

₁₄₀₀ Pour les deux expérimentations une relation nette est visible entre le niveau de la
₁₄₀₁ nappe et l'ENE qui diminue lorsque le niveau de nappe augmente (Figure 4.5–G,H).
₁₄₀₂ La relation inverse est visible, pour les deux expérimentations, entre la RE et le niveau
₁₄₀₃ de la nappe (Figure 4.5–C,D). La PPB par contre ne montre aucune tendance claire
₁₄₀₄ quelle que soit l'expérimentation. On peut malgré tout noter que les valeurs de PPB les
₁₄₀₅ plus faibles correspondent aux niveaux de nappe les plus élevés(Figure 4.5–E,F). Pour
₁₄₀₆ le méthane, que ce soit pour l'expérimentation A ou B, aucune tendance ne semble se
₁₄₀₇ dégager vis à vis du niveau de la nappe (Figure 4.5–A,B).

4.4 Discussion

4.4.1 Comparaison aux mesures *in-situ*

₁₄₁₀ Les flux moyen de CH_4 mesurés dans les mésocosmes des deux expérimentations
₁₄₁₁ font partie des valeurs hautes mesurées sur le terrain. Certaines campagnes dépassent
₁₄₁₂ nettement, en faisant plus que doubler, le maximum de $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mesuré en
₁₄₁₃ 2014 sur la tourbière de La Guette.

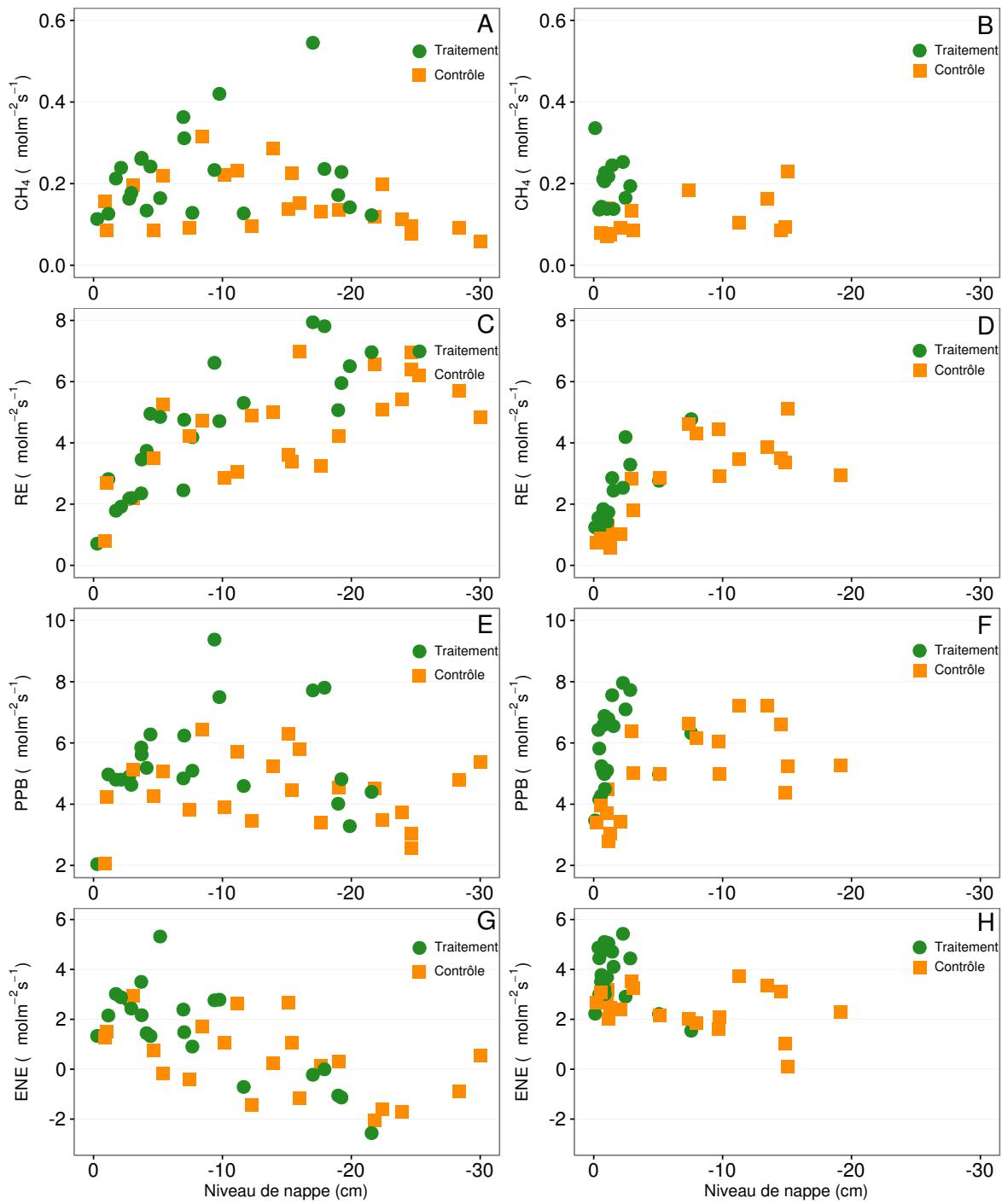


FIGURE 4.5 – Relations entre les flux de GES et le niveau de la nappe

4.4. Discussion

1414 Pour le CO₂ les flux sont généralement dans la gamme des valeurs mesurée sur la
1415 tourbière de La Guette. Pour l'expérimentation A, l'ENE moyen est plus faible que
1416 celui mesuré sur le terrain la même année : 0,81 contre 2,85 µmol m⁻² s⁻¹. Pour l'expé-
1417 rimentation B en revanche l'ENE moyen vaut 0,71 µmol m⁻² s⁻¹ ce qui est relativement
1418 proche de celui mesuré sur le terrain : 2,93 µmol m⁻² s⁻¹. Les flux de RE et de PPB
1419 sont moins fort que les flux mesurés sur le terrain mais restent dans leur gamme de
1420 valeurs. Ces comparaisons sont par ailleurs à relativiser puisque les mesures de flux
1421 n'ont pas nécessairement lieu aux mêmes moment de la journée.

1422 Comme pour la RE, les flux de PPB sont du même ordre de grandeur que ceux me-
1423 surés sur le terrain, mais légèrement plus faible : les maxima moyens mesurés dans les
1424 mésocosmes sont d'environ 7,5 pour des valeurs de 13 µmol m⁻² s⁻¹ mesuré directement
1425 sur la tourbière.

1426 4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de 1427 gaz

1428 Les résultats de ces deux expérimentations montrent clairement une augmentation
1429 de la RE quand le niveau de la nappe diminue. Ceci est en accord avec les résultats
1430 d'autres études que ce soit in-situ (Ballantyne *et al.*, 2014) ou en mésocosmes (Blodau
1431 *et al.*, 2004; Dinsmore *et al.*, 2009). Dans ces deux dernières publications, la baisse
1432 du niveau de la nappe diminue la PPB. Pas de variations claires de la PPB n'est vi-
1433 sible dans les données présentées, même si une légère tendance semble émergée aux
1434 plus fortes profondeur de nappe pour l'expérimentation A, ces observations restent à
1435 confirmer. Cette absence d'effet du niveau de la nappe sur la PPB peut, peut être,
1436 être liée à la profondeur des mésocosmes (30 cm). En effet dans Blodau *et al.* (2004)
1437 et Dinsmore *et al.* (2009), les mésocosmes utilisés sont plus grands, 75 et 41 cm res-
1438 pectivement, ont permis d'abaisser le niveau de l'eau au delà de -30 cm. Cette limite
1439 a été rapportée plusieurs fois comme étant un seuil au delà duquel son observés des
1440 changements importants (Blodau *et al.*, 2004; Peichl *et al.*, 2014). Ce seuil est expliqué
1441 comme étant la limite au delà de laquelle les forces de capillarités ne permettent plus

1442 d'alimenter en eau les sphaignes (Rydin et Jeglum, 2013b; Ketcheson et Price, 2014).
1443 Il résulte des constats précédents qu'une baisse du niveau de nappe, faisant augmenter
1444 la RE et ne changeant pas ou peu la PPB, conduit à une baisse de l'ENE. Cette di-
1445 minution de l'ENE est cohérente avec la littérature, que ce soit des expérimentations
1446 en mésocosmes (Aerts et Ludwig, 1997; Blodau *et al.*, 2004), ou in-situ (Bubier *et al.*,
1447 2003; Sonnentag *et al.*, 2010). Malgré tout l'extrapolation de ses résultats à d'autres
1448 situations n'est pas évidente car fortement fonction du contexte. D'autre études n'ont,
1449 par exemple, pas observé d'influence du niveau de la nappe sur la RE (Updegraff *et al.*,
1450 2001). Par ailleurs Laiho (2006) a montré l'importance du contexte et notamment celui
1451 de l'échelle de temps considéré qui peut impliquer des phénomènes différents et donc
1452 avoir des conséquences différentes.

1453 La dépendance entre les flux de CH₄ et le niveau de la nappe, devant conduire à une
1454 baisse des émissions quand le niveau de la nappe diminue, comme décrite dans Aerts et
1455 Ludwig (1997), Pelletier *et al.* (2007) ou Turetsky *et al.* (2008), n'a pas été clairement
1456 observée. Ce constat rejoins d'autres études dans lesquelles une relation inverse ou un
1457 absence de relation a été trouvé entre le CH₄ et le niveau de la nappe Kettunen *et al.*
1458 (1996); Bellisario *et al.* (1999); Treat *et al.* (2007). L'observation d'un pic de méthane
1459 suivant de quelques jours une phase de hausse du niveau de la nappe, est également
1460 rapportée par Kettunen *et al.* (1996). (**And so what ?**)

1461 4.4.3 Effet cycles multiples

1462 5 Variation journalière de la respiration de
1463 l'écosystème (article)

1464		
1465	5.1 Introduction	95
1466		
1467	5.2 Procédure expérimentale et analytique	95
1468	5.2.1 Synchronisation des données	95
1469	5.2.2 Différence entre mesures de jour et mesures de nuit	95
1470	5.2.3 Caractérisation physico-chimique	95
1471	5.3 Résultats	95
1472	5.3.1 Température de l'air et variabilité de RE	95
1473	5.3.2 Synchronisation RE et température du sol	95
1474	5.3.3 Équations utilisées	95
1475	5.3.4 Relation entre RE et la température	95
1476	5.3.5 Évolution du Q10	95
1477	5.3.6 Différence entre mesures de jour et de nuit	95
1478	5.3.7 Caractérisation de la tourbe	95
1479	5.4 Discussion	95
1480	5.4.1 Différence de RE entre les différents sites	95
1481	5.4.2 Temps de latence entre température et RE	95
1482	5.4.3 La synchronisation entre RE et la température améliore la	
1483	représentation de la sensibilité de RE à la température	95
1484	5.4.4 Différence entre mesure de RE faite le jour et la nuit	95
1485	5.4.5 La sensibilité du Q10 à la profondeur de la température et à	
1486	la synchronisation	95
1488		

5.4. Discussion

₁₄₈₉ 5.1 Introduction

₁₄₉₀ 5.2 Procédure expérimentale et analytique

₁₄₉₁ 5.2.1 Synchronisation des données

₁₄₉₂ 5.2.2 Différence entre mesures de jour et mesures de nuit

₁₄₉₃ 5.2.3 Caractérisation physico-chimique

₁₄₉₄ 5.3 Résultats

₁₄₉₅ 5.3.1 Température de l'air et variabilité de RE

₁₄₉₆ 5.3.2 Synchronisation RE et température du sol

₁₄₉₇ 5.3.3 Équations utilisées

₁₄₉₈ 5.3.4 Relation entre RE et la température

₁₄₉₉ 5.3.5 Évolution du Q10

₁₅₀₀ 5.3.6 Différence entre mesures de jour et de nuit

₁₅₀₁ 5.3.7 Caractérisation de la tourbe

₁₅₀₂ 5.4 Discussion

₁₅₀₃ 5.4.1 Différence de RE entre les différents sites

₁₅₀₄ 5.4.2 Temps de latence entre température et RE

₁₅₀₅ 5.4.3 La synchronisation entre RE et la température améliore

₁₅₁₀ Conclusions et perspectives

₁₅₁₁ 5.5 Bilan du bilan (de C) ?

₁₅₁₂ Flux fort

₁₅₁₃ sensibilité param forte

₁₅₁₄ Modèles multi annuel et pr ise en compte de la végétation

₁₅₁₅ Quid des variations journalières dans un bilan annuel ?

₁₅₁₆ Les prendre en compte améliorerait-il les modèles

₁₅₁₇ modèles globaux ? **limitations deséquations** : Plus généralement, la majorité des

₁₅₁₈ tourbières sont sous la neige une partie de l'année, ce qui n'arrive que rarement sur

₁₅₁₉ la tourbière de La Guette et une partie possède également des zones d'eau libre, qui

₁₅₂₀ n'existent pas sur ce site.

₁₅₂₁ modèles globaux et profondeur de tourbe

₁₅₂₂ 5.6 Résilience de la tourbe par rapport aux

₁₅₂₃ 2 années sèches qui précèdent le BdC

₁₅₂₄ (lien chap 3 et 4)

₁₅₂₅ 5.7 Ouverture vers d'autre méthodes de me-

₁₅₂₆ sures

₁₅₂₇ — chambre automatique (lien chap 5, et chap 3?)

₁₅₂₈ — tour eddy covariance (lien chap 5 et chap 3?)

₁₅₂₉ Bibliographie

- ₁₅₃₀ AERTS, R. et LUDWIG, F. (1997). Water-table changes and nutritional status affect
₁₅₃₁ trace gas emissions from laboratory columns of peatland soils. *Soil Biology and*
₁₅₃₂ *Biochemistry*, 29(11–12):1691–1698.
- ₁₅₃₃ ALM, J., SAARNIO, S., NYKÄNEN, H., SILVOLA, J. et MARTIKAINEN, P. (1999). Winter
₁₅₃₄ CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeo-*
₁₅₃₅ *chemistry*, 44(2):163–186.
- ₁₅₃₆ ALM, J., TALANOV, A., SAARNIO, S., SILVOLA, J., IKKONEN, E., AALTONEN, H.,
₁₅₃₇ NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1997). Reconstruction of the carbon balance
₁₅₃₈ for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland. *Oecologia*, 110:423–431.
- ₁₅₃₉ ANDREJKO, M. J., FIENE, F. et COHEN, A. D. (1983). Comparison of ashing techniques
₁₅₄₀ for determination of the inorganic content of peats. In *Testing of Peats and Organic*
₁₅₄₁ *Soils : A Symposium*, volume 820, pages 5–10. ASTM International.
- ₁₅₄₂ AURELA, M., RIUTTA, T., LAURILA, T., TUOVINEN, J.-P., VESALA, T., TUITILA,
₁₅₄₃ E.-S., RINNE, J., HAAPANALA, S. et LAINE, J. (2007). CO₂ exchange of a sedge fen
₁₅₄₄ in southern Finland—the impact of a drought period. *Tellus B*, 59(5):826–837.
- ₁₅₄₅ BALLANTYNE, D. M., HRIBLJAN, J. A., PYPKER, T. G. et CHIMNER, R. A. (2014).
₁₅₄₆ Long-term water table manipulations alter peatland gaseous carbon fluxes in nor-
₁₅₄₇ thern Michigan. *Wetlands Ecol. Manage.*, 22(1):35–47.
- ₁₅₄₈ BEER, C., REICHSTEIN, M., TOMELLERI, E., CIAIS, P., JUNG, M., CARVALHAIS, N.,
₁₅₄₉ RÖDENBECK, C., ARAIN, M. A., BALDOCCHI, D., BONAN, G. B., BONDEAU, A.,
₁₅₅₀ CESCATTI, A., LASSLOP, G., LINDROTH, A., LOMAS, M., LUSSAERT, S., MARGO-
₁₅₅₁ LIS, H., OLESON, K. W., ROUPSARD, O., VEENENDAAL, E., VIOVY, N., WILLIAMS,
₁₅₅₂ C., WOODWARD, F. I. et PAPALE, D. (2010). Terrestrial Gross Carbon Dioxide Up-
₁₅₅₃ take : Global Distribution and Covariation with Climate. *Science*, 329(5993):834–838.
- ₁₅₅₄ BELLISARIO, L. M., BUBIER, J. L., MOORE, T. R. et CHANTON, J. P. (1999). Controls
₁₅₅₅ on CH₄ emissions from a northern peatland. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(1):81–
₁₅₅₆ 91.
- ₁₅₅₇ BLODAU, C., BASILIKO, N. et MOORE, T. R. (2004). Carbon turnover in peatland
₁₅₅₈ mesocosms exposed to different water table levels. *Biogeochemistry*, 67(3):331–351.
- ₁₅₅₉ BOND-LAMBERTY, B. et THOMSON, A. (2010). Temperature-associated increases in
₁₅₆₀ the global soil respiration record. *Nature*, 464(7288):579–582.
- ₁₅₆₁ BORTOLUZZI, E., EPRON, D., SIEGENTHALER, A., GILBERT, D. et BUTTLER, A.
₁₅₆₂ (2006). Carbon balance of a European mountain bog at contrasting stages of re-
₁₅₆₃ generation. *New Phytol.*, 172(4):708–718.

- 1564 BUBIER, J., COSTELLO, A., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et SAVAGE, K. (1993).
1565 Microtopography and methane flux in boreal peatlands, northern Ontario, Canada.
1566 *Canadian Journal of Botany*, 71(8):1056–1063.
- 1567 BUBIER, J. L., BHATIA, G., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et LAFLEUR, P. M. (2003).
1568 Spatial and Temporal Variability in Growing-Season Net Ecosystem Carbon Dioxide
1569 Exchange at a Large Peatland in Ontario, Canada. *Ecosystems*, 6:353–367.
- 1570 BUBIER, J. L., CRILL, P. M., MOORE, T. R., SAVAGE, K. et VARNER, R. K. (1998).
1571 Seasonal patterns and controls on net ecosystem CO₂ exchange in a boreal peatland
1572 complex. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(4):703–714.
- 1573 BUBIER, J. L., MOORE, T. R., BELLISARIO, L., COMER, N. T. et CRILL, P. M. (1995).
1574 Ecological controls on methane emissions from a Northern Peatland Complex in the
1575 zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada. *Global Biogeochemical Cycles*,
1576 9(4):455–470.
- 1577 BUCKLAND, P. C. (1993). Peatland archaeology : a conservation resource on the edge
1578 of extinction. *Biodivers. Conserv.*, 2(5):513–527.
- 1579 CHAPMAN, S., BUTTLER, A., FRANCEZ, A.-J., LAGGOUN-DÉFARGE, F., VASANDER,
1580 H., SCHLOTER, M., COMBE, J., GROSVERNIER, P., HARMS, H., EPRON, D. et
1581 OTHERS (2003). Exploitation of northern peatlands and biodiversity maintenance :
1582 a conflict between economy and ecology. *Front. Ecol. Environ.*, 1(10):525–532.
- 1583 CHRISTENSEN, J. H., HEWITSON, B., BUSUIOC, A., CHEN, A., GAO, X., HELD, R.,
1584 JONES, R., KOLLI, R. K., KWON, W. K., LAPRISE, R. et OTHERS (2007). Regional
1585 climate projections. *Clim. Change 2007 Phys. Sci. Basis Contrib. Work. Group*
1586 *Fourth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Change Univ. Press Camb. Chapter 11*,
1587 pages 847–940.
- 1588 CHRISTENSEN, J. H., KANIKICHLARLA, K. K., MARSHALL, G. et TURNER, J. (2013).
1589 Climate phenomena and their relevance for future regional climate change.
- 1590 CIAIS, P., SABINE, C., BALA, G., BOPP, L., BROVKIN, V., CANADELL, J., CHHABRA,
1591 A., DEFRIES, R., GALLOWAY, J., HEIMANN, M. et OTHERS (2014). Carbon and
1592 other biogeochemical cycles. In *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis.*
1593 *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 465–570. Cambridge University Press.
- 1595 CROW, S. E. et WIEDER, R. K. (2005). Sources of CO₂ emission from a northern
1596 peatland : root respiration, exudation, and decomposition. *Ecology*, 86(7):1825–1834.
- 1597 DINSMORE, K. J., SKIBA, U. M., BILLETT, M. F. et REES, R. M. (2009). Effect
1598 of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms. *Plant Soil*,
1599 318(1-2):229–242.
- 1600 ESWARAN, H., VAN DEN BERG, E. et REICH, P. (1993). Organic carbon in soils of
1601 the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57(1):192–194.
- 1602 FARQUHAR, G. D., VON CAEMMERER, S. et BERRY, J. A. (1980). A biochemical model
1603 of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C3 species. *Planta*, 149(1):78–90.

- 1604 FRANCEZ, A.-J. (2000). La dynamique du carbone dans les tourbières à Sphagnum,
1605 de la sphaine à l'effet de serre. *L'Année Biologique*, 39:205–270.
- 1606 FROLKING, S., TALBOT, J., JONES, M. C., TREAT, C. C., KAUFFMAN, J. B., TUIT-
1607 TILA, E.-S. et ROULET, N. (2011). Peatlands in the Earth's 21st century climate
1608 system. *Environ. Rev.*, 19(NA):371–396.
- 1609 GIRARD, M. C., WALTER, C., REMY, J. C., BERTHELIN, J. et MOREL, J. L. (2011).
1610 *Sols et Environnement, (2e édn)*, volume 28 de *Sciences Sup*. Editions Dunod : Paris,
1611 Vottem, Belgique, 2nd édition édition.
- 1612 GOGO, S., GUIMBAUD, C., LAGGOUN-DÉFARGE, F., CATOIRE, V. et ROBERT, C.
1613 (2011). In situ quantification of CH₄ bubbling events from a peat soil using a new
1614 infrared laser spectrometer. *Journal of Soils and Sediments*, 11:545–551.
- 1615 GORHAM, E. (1991). Northern Peatlands : Role in the Carbon Cycle and Probable
1616 Responses to Climatic Warming. *Ecol. Appl.*, 1(2):182–195.
- 1617 GÖRRES, C. M., KUTZBACH, L. et ELSGAARD, L. (2014). Comparative modeling of
1618 annual CO₂ flux of temperate peat soils under permanent grassland management.
1619 *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 186:64–76.
- 1620 GUIMBAUD, C., CATOIRE, V., GOGO, S., ROBERT, C., CHARTIER, M., LAGGOUN-
1621 DÉFARGE, F., GROSSEL, A., ALBÉRIC, P., POMATHIOD, L., NICOUILLAUD, B. et
1622 RICHARD, G. (2011). A portable infrared laser spectrometer for flux measurements
1623 of trace gases at the geosphere-atmosphere interface. *Measurement Science & Tech-*
1624 *nology*, 22(7):1–17.
- 1625 HARRIS, D. C. (2010). Charles David Keeling and the Story of Atmospheric CO₂
1626 Measurements†. *Anal. Chem.*, 82(19):7865–7870.
- 1627 JACOBS, C. M. J., JACOBS, A. F. G., BOSVELD, F. C., HENDRIKS, D. M. D., HENSEN,
1628 A., KROON, P. S., MOORS, E. J., NOL, L., SCHRIER-UIJL, A. et VEENENDAAL, E. M.
1629 (2007). Variability of annual CO₂ exchange from Dutch grasslands. *Biogeosciences*,
1630 4(5):803–816.
- 1631 JONES, M. C. et YU, Z. (2010). Rapid deglacial and early Holocene expansion of
1632 peatlands in Alaska. *PNAS*, 107(16):7347–7352.
- 1633 JOOSTEN, H. et CLARKE, D. (2002). *Wise use of mires and peatlands*. International
1634 mire conservation group.
- 1635 JUNE, T., EVANS, J. R. et FARQUHAR, G. D. (2004). A simple new equation for the
1636 reversible temperature dependence of photosynthetic electron transport : a study on
1637 soybean leaf. *Funct. Plant Biol.*, 31(3):275–283. WOS :000220831200008.
- 1638 KAUFMAN, D. S., AGER, T. A., ANDERSON, N. J., ANDERSON, P. M., ANDREWS,
1639 J. T., BARTLEIN, P. J., BRUBAKER, L. B., COATS, L. L., CWYNAR, L. C., DUVAL, M. L.,
1640 DYKE, A. S., EDWARDS, M. E., EISNER, W. R., GAJEWSKI, K., GEIRSDÓT-TIR, A., HU, F. S.,
1641 JENNINGS, A. E., KAPLAN, M. R., KERWIN, M. W., LOZHKN, A. V., MACDONALD, G. M., MILLER,
1642 G. H., MOCK, C. J., OSWALD, W. W., OTTO-BLIESNER, B. L., PORINCHU, D. F., RÜHLAND, K.,
1643 SMOL, J. P., STEIG, E. J. et

- 1644 WOLFE, B. B. (2004). Holocene thermal maximum in the western Arctic (0–180°W).
1645 *Quaternary Science Reviews*, 23(5–6):529–560.
- 1646 KETCHESON, S. J. et PRICE, J. S. (2014). Characterization of the fluxes and stores of
1647 water within newly formed Sphagnum moss cushions and their environment. *Ecohydrology*,
1648 7(2):771–782.
- 1649 KETTUNEN, A., KAITALA, V., ALM, J., SILVOLA, J., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN,
1650 P. J. (1996). Cross-correlation analysis of the dynamics of methane emissions from
1651 a boreal peatland. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 10(3):457–471.
- 1652 KIM, J. et VERMA, S. B. (1992). Soil surface CO₂ flux in a Minnesota peatland.
1653 *Biogeochemistry*, 18(1):37–51.
- 1654 LAIHO, R. (2006). Decomposition in peatlands : Reconciling seemingly contrasting
1655 results on the impacts of lowered water levels. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8):
1656 2011–2024.
- 1657 LANDVA, A. O., KORPIJAAKKO, E. O. et PHEENEY, P. E. (1983). Geotechnical clas-
1658 sification of peats and organic soils. In *Testing of peats and organic soils*, volume
1659 820, pages 37–51.
- 1660 LAPPALAINEN, E. (1996). *Global peat resources*, volume 4. International Peat Society
1661 Jyskä.
- 1662 LIVINGSTON, G. P. et HUTCHINSON, G. L. (1995). Enclosure-based measurement of
1663 trace gas exchange : applications and sources of error. *Biog. Trace Gases Meas.*
1664 *Emiss. Soil Water*, pages 14–51.
- 1665 LONG, K. D., FLANAGAN, L. B. et CAI, T. (2010). Diurnal and seasonal variation in
1666 methane emissions in a northern Canadian peatland measured by eddy covariance.
1667 *Global Change Biology*, 16(9):2420–2435.
- 1668 LUND, M., CHRISTENSEN, T. R., LINDROTH, A. et SCHUBERT, P. (2012). Effects
1669 of drought conditions on the carbon dioxide dynamics in a temperate peatland.
1670 *Environ. Res. Lett.*, 7(4):045704.
- 1671 LUO, Y. et ZHOU, X. (2006). Chapter 8 - Methods of measurements and estimations.
1672 In LUO, Y. et ZHOU, X., éditeurs : *Soil Respiration and the Environment*, pages 161
1673 – 185. Academic Press, Burlington.
- 1674 MACDONALD, G. M., BEILMAN, D. W., KREMENETSKI, K. V., SHENG, Y., SMITH,
1675 L. C. et VELICHKO, A. A. (2006). Rapid early development of circumarctic peatlands
1676 and atmospheric CH₄ and CO₂ variations. *Science*, 314(5797):285–288.
- 1677 MANNEVILLE, O. (1999). *Le monde des tourbières et des marais : France, Suisse,*
1678 *Belgique et Luxembourg*. Delachaux & Niestle.
- 1679 NATIONAL WETLANDS WORKING GROUP (1997). *The Canadian wetland classifica-*
1680 *tion system*. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 2nd edition édition.
- 1681 ORLOWSKY, B. et SENEVIRATNE, S. I. (2012). Global changes in extreme events :
1682 regional and seasonal dimension. *Clim. Change*, 110(3–4):669–696.

- 1683 PEICHL, M., ÖQUIST, M., LÖFVENIUS, M. O., ILSTEDT, U., SAGERFORS, J., GRELLE,
 1684 A., LINDROTH, A. et NILSSON, M. B. (2014). A 12-year record reveals pre-growing
 1685 season temperature and water table level threshold effects on the net carbon dioxide
 1686 exchange in a boreal fen. *Environ. Res. Lett.*, 9(5):055006.
- 1687 PELLETIER, L., MOORE, T. R., ROULET, N. T., GARNEAU, M. et BEAULIEU-AUDY,
 1688 V. (2007). Methane fluxes from three peatlands in the La Grande Riviere watershed,
 1689 James Bay lowland, Canada. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).
- 1690 POST, W. M., EMANUEL, W. R., ZINKE, P. J. et STANGENBERGER, A. G. (1982). Soil
 1691 carbon pools and world life zones. *Nature*, 298:156–159.
- 1692 PUMPANEN, J., KOLARI, P., ILVESNIEMI, H., MINKKINEN, K., VESALA, T., NIINISTÖ,
 1693 S., LOHILA, A., LARMOLA, T., MORERO, M., PIHLATIE, M., JANSSENS, I., YUSTE,
 1694 J. C., GRÜNZWEIG, J. M., RETH, S., SUBKE, J.-A., SAVAGE, K., KUTSCH, W., ØS-
 1695 TRENG, G., ZIEGLER, W., ANTHONI, P., LINDROTH, A. et HARI, P. (2004). Com-
 1696 parison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agric. For.
 1697 Meteorol.*, 123(3–4):159–176.
- 1698 RAMEAU, J.-C., MANSION, D. et DUMÉ, G. (2008). *Flore forestière française : Plaines
 1699 et collines*. Forêt privée française.
- 1700 RAMSAR, C. (1987). *Convention relative aux zones humides d'importance internatio-
 1701 nale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau, (Ramsar, Iran, 1971) telle
 1702 qu'amendée en 1982 et 1987.*
- 1703 ROBERT, C. (2007). Simple, stable, and compact multiple-reflection optical cell for
 1704 very long optical paths. *Appl. Opt.*, 46(22):5408.
- 1705 ROBERT, M. et SAUGIER, B. (2003). Contribution des écosystèmes continentaux à la
 1706 séquestration du carbone. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(6–7):577–595.
- 1707 RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013a). Peat and organic soil. In *The biology of Peatlands*,
 1708 pages 85–107. Oxford University Press.
- 1709 RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013b). Sphagnum - the builder of boreal peatlands. In
 1710 *The biology of Peatlands*, pages 65–84. Oxford University Press.
- 1711 SIEGENTHALER, U. et OESCHGER, H. (1987). Biospheric CO₂ emissions during the
 1712 past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus B*, 39B(1–
 1713 2):140–154.
- 1714 SILVOLA, J., ALM, J., AHLHOLM, U., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1996).
 1715 The contribution of plant roots to CO₂ fluxes from organic soils. *Biol Fertil Soils*,
 1716 23(2):126–131.
- 1717 SMITH, L. C., MACDONALD, G. M., VELICHKO, A. A., BEILMAN, D. W., BORISOVA,
 1718 O. K., FREY, K. E., KREMENETSKI, K. V. et SHENG, Y. (2004). Siberian Peatlands
 1719 a Net Carbon Sink and Global Methane Source Since the Early Holocene. *Science*,
 1720 303(5656):353–356.

- 1721 SONNENTAG, O., VAN DER KAMP, G., BARR, A. G. et CHEN, J. M. (2010). On the
1722 relationship between water table depth and water vapor and carbon dioxide fluxes
1723 in a minerotrophic fen. *Glob. Change Biol.*, 16(6):1762–1776.
- 1724 STRACK, M. (2008). *Peatlands and climate change*. IPS, International Peat Society,
1725 Jyväskylä, Finland.
- 1726 STRACK, M., WALLER, M. F. et WADDINGTON, J. M. (2006). Sedge succession and
1727 peatland methane dynamics : A potential feedback to climate change. *Ecosystems*,
1728 9(2):278–287.
- 1729 STRACK, M. et ZUBACK, Y. C. A. (2013). Annual carbon balance of a peatland 10 yr
1730 following restoration. *Biogeosciences*, 10(5):2885–2896.
- 1731 TREAT, C. C., BUBIER, J. L., VARNER, R. K. et CRILL, P. M. (2007). Timescale
1732 dependence of environmental and plant-mediated controls on CH₄ flux in a temperate
1733 fen. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).
- 1734 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2012). Methane fluxes from a
1735 patterned fen of the northeastern part of the La Grande river watershed, James Bay,
1736 Canada. *Biogeochemistry*, 113(1-3):409–422.
- 1737 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2014). Interannual variability in
1738 the CO₂ balance of a boreal patterned fen, James Bay, Canada. *Biogeochemistry*,
1739 118(1-3):371–387.
- 1740 TURETSKY, M. R., TREAT, C. C., WALDROP, M. P., WADDINGTON, J. M., HAR-
1741 DEN, J. W. et MCGUIRE, A. D. (2008). Short-term response of methane fluxes and
1742 methanogen activity to water table and soil warming manipulations in an Alaskan
1743 peatland. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 113(G3).
- 1744 TURUNEN, J., TOMPOPO, E., TOLONEN, K. et REINIKAINEN, A. (2002). Estimating
1745 carbon accumulation rates of undrained mires in Finland—application to boreal and
1746 subarctic regions. *The Holocene*, 12(1):69–80.
- 1747 UPDEGRAFF, K., BRIDGHAM, S. D., PASTOR, J., WEISHAMPEL, P. et HARTH, C.
1748 (2001). Response of CO₂ and CH₄ emissions from peatlands to warming and water
1749 table manipulation. *Ecol. Appl.*, 11(2):311–326.
- 1750 VIEL, E., BINET, S., GOGO, S. et LAGGOUN-DÉFARGE, F. (2015). Tree invasion
1751 controls the drainage pattern in La Guette peatland (France) : impact on the water
1752 storage capacity of the peat. *Journal of Hydrology (submitted)*.
- 1753 WADDINGTON, J. M. et ROULET, N. T. (2000). Carbon balance of a boreal patterned
1754 peatland. *Global Change Biology*, 6(1):87–97.
- 1755 WORRALL, F., BURT, T., ROWSON, J., WARBURTON, J. et ADAMSON, J. (2009).
1756 The multi-annual carbon budget of a peat-covered catchment. *Science of The Total
1757 Environment*, 407(13):4084–4094.

- 1758 YU, Z., BEILMAN, D. W. et JONES, M. C. (2009). Sensitivity of northern peatland car-
1759 bon dynamics to Holocene climate change. In *Carbon cycling in northern peatlands*,
1760 volume 184, pages 55–69. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Se-
1761 ries Washington, DC.
- 1762 YU, Z., LOISEL, J., BROSSEAU, D. P., BEILMAN, D. W. et HUNT, S. J. (2010). Global
1763 peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophys. Res. Lett.*, 37(13).

Index

A

1764 atterrissage 11

C

1766 carbone

1768 stock 12

1769 changements globaux 2, 14

E

1771 échange net de l'écosystème

1772 contrôle 21

P

1774 paludification 11

1775 photosynthèse 17

1776 production primaire brute

1777 contrôle 21

R

1779 respiration 18

1780 de l'écosystème 18

1781 contrôle 20

1782 du sol 18

S

1784 services écologiques 3

T

1786 tourbières 8–16

1787 distribution 11

1788 formation 11

1789 surface 10

1790 utilisation 14

1791 tourbification 10

Z

1792 zone humide 8

¹⁷⁹⁴ Annexes

₁₇₉₅ A Photos supplémentaires



(a) droséra

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

₁₇₉₆ B protocole végétation

₁₇₉₇ Le suivi non-destructif d'une végétation n'est pas triviale et nécessite la mise en
₁₇₉₈ place de protocoles particuliers en fonction du type de végétation. L'objectif est de
₁₇₉₉ pouvoir estimer une biomasse produite en impactant au minimum la végétation en
₁₈₀₀ place. Pour l'ensemble des espèces végétales présentes dans les embases servant à la
₁₈₀₁ mesure des flux un recouvrement à été estimé, à l'œil.

₁₈₀₂ **La strate arbustive**

₁₈₀₃ Pour la strate arbustive des mesures de hauteur moyenne ont été effectuées, en
₁₈₀₄ mesurant depuis le niveau du sol, ou le toit des sphaignes, si elles étaient présentes,
₁₈₀₅ jusqu'au sommet de l'individu.

₁₈₀₆ **La strate herbacée**

₁₈₀₇ Pour la strate herbacée, en 2013, 5 individus des deux espèces majoritaires (*Eriophorum vaginatum* ? *augustifolium* ?, *Molinia Caerulea*) ont été marqués afin de pourvoir
₁₈₀₈ les mesurer plusieurs fois au cours de la saison. Cependant les difficultés à retrouver
₁₈₀₉ les individus marqués couplés à la mort d'un nombre important d'entre eux n'ont pas
₁₈₁₀ permis d'acquérir de résultats significatifs. En conséquence en 2014 ces deux espèces
₁₈₁₁ ont fait l'objet de comptage exhaustif et de mesure de hauteur moyenne.

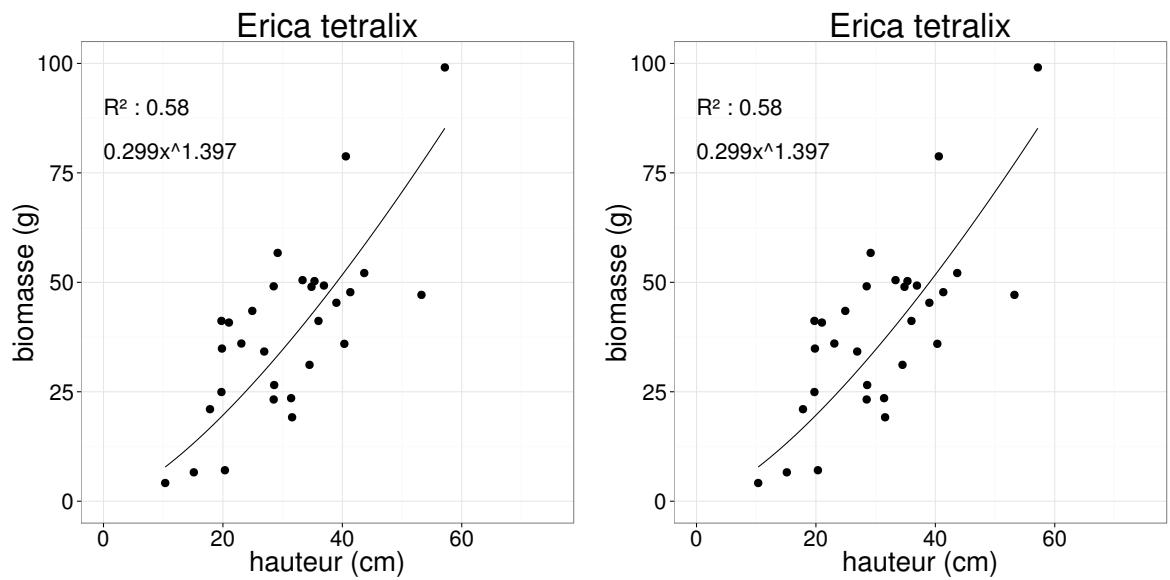


FIGURE 2 – Calibration de la biomasse en fonction de la hauteur

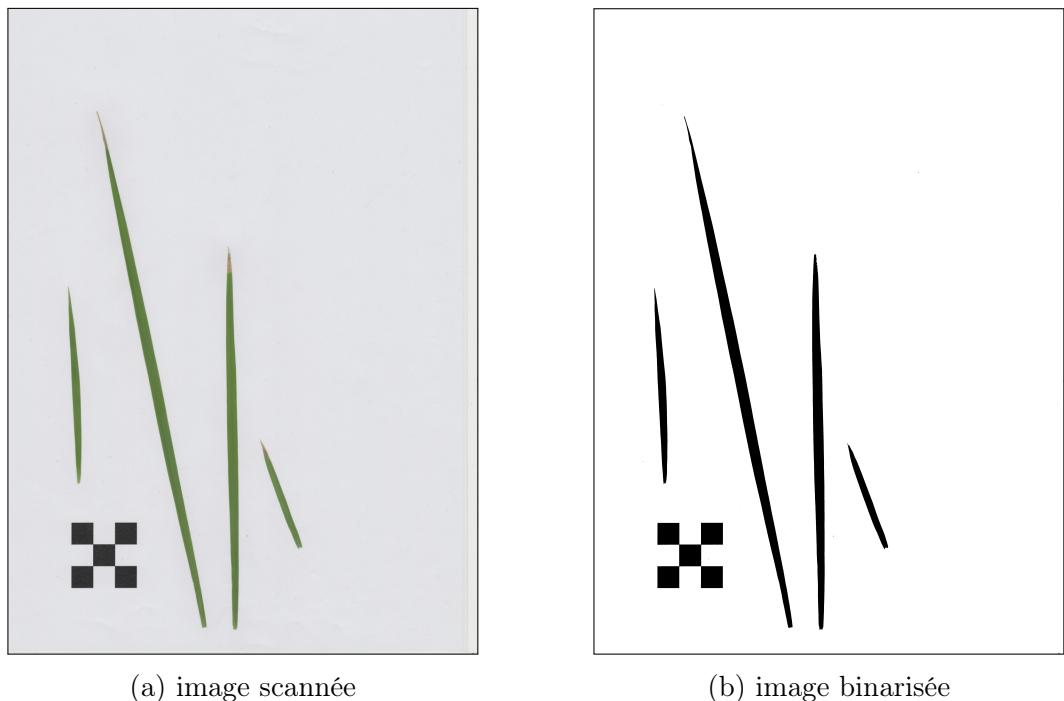


FIGURE 3 – Scanne des feuilles

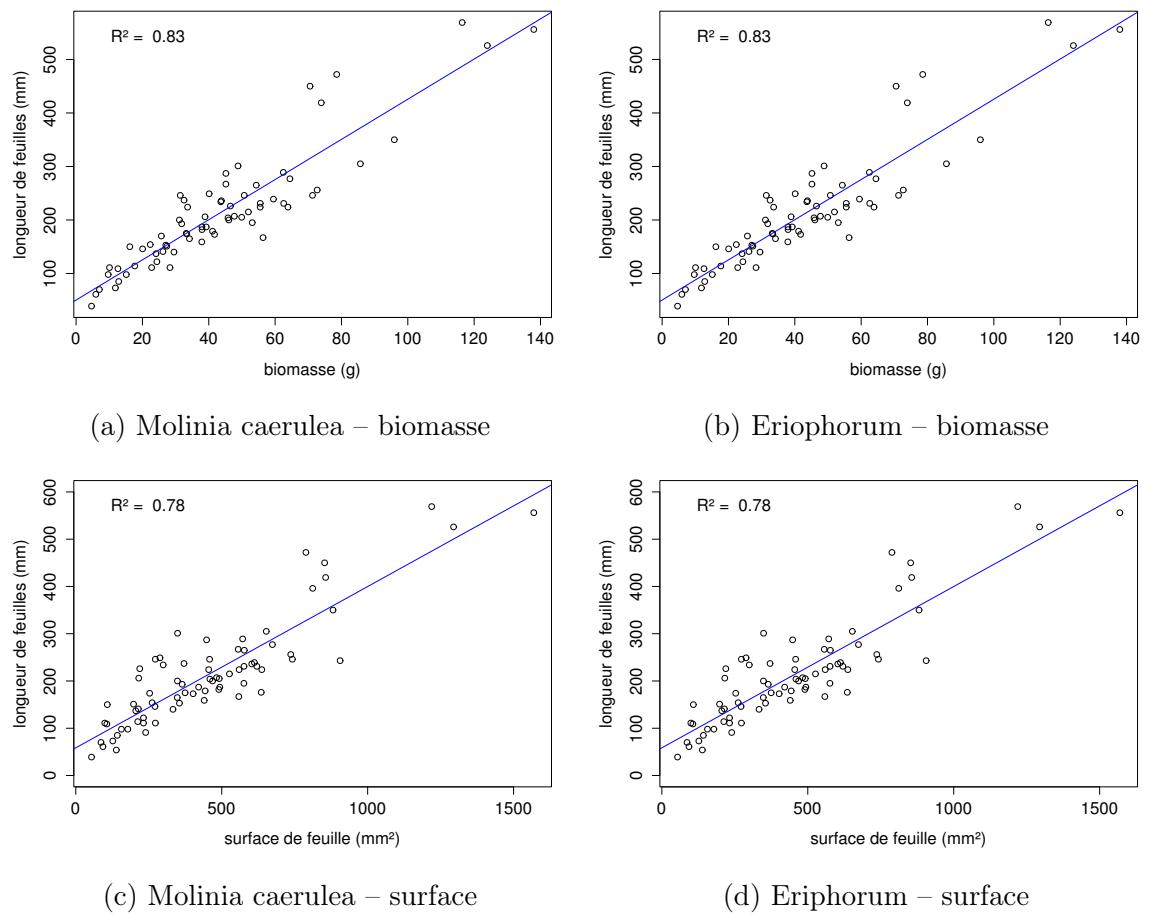


FIGURE 4 – Calibration de la biomasse herbacées pour *Molinia Caerulea* (a), pour *Eriophorum* (b) et de la surface de feuille pour *Molinia Caerulea* (c), pour *Eriophorum* (d) en fonction de la hauteur

₁₈₁₃ C CARBIODIV

₁₈₁₄ 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, ...