

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 | viii |
| Liste des tableaux | x |
| Remerciements | xi |
| 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 | 14 |
| 1.1.3 Les tourbières et les changements globaux | 16 |
| 1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants | 20 |
| 1.2.1 GES et tourbières | 20 |
| 1.2.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières | 22 |
| 1.2.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux | 26 |
| 1.2.4 Bilans de C à l'échelle de l'écosystème | 33 |
| 1.2.5 Méthodologies, mesures et estimation des flux | 36 |
| 1.3 Objectifs du travail | 39 |
| 2 Sites d'études et méthodologies employées | 41 |
| 2.1 Présentation de la tourbière de La Guette | 42 |
| 2.2 Autres sites du service national d'observation | 47 |
| 2.3 Mesures de flux de gaz | 48 |
| 2.3.1 Les mesures de CO ₂ | 48 |
| 2.3.2 Les mesures de CH ₄ | 50 |
| 2.3.3 Le calcul des flux | 52 |
| 2.4 Facteurs contrôlants | 52 |
| 2.4.1 acquisitions automatisées | 52 |
| 2.4.2 acquisitions manuelles | 53 |

| | |
|---|------------|
| 3 Bilan de C de la tourbière de La Guette | 55 |
| 3.1 Introduction | 56 |
| 3.2 Procédure expérimentale et analytique | 57 |
| 3.2.1 Méthodes de mesures | 57 |
| 3.2.2 Variables élaborées utilisées | 59 |
| 3.2.3 Variabilité saisonnière du bilan de C | 60 |
| 3.2.4 Variabilité spatiale des flux et du bilan de carbone | 64 |
| 3.2.5 Estimation de l'erreur associée aux flux et aux bilans | 66 |
| 3.3 Résultats | 66 |
| 3.3.1 Cinétique des facteurs contrôlant et des flux sur la tourbière de La Guette | 66 |
| 3.3.2 Sélection des modèles | 73 |
| 3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle de l'écosystème | 80 |
| 3.3.4 Variabilité spatiale du bilan | 88 |
| 3.4 Discussion | 92 |
| 3.4.1 Modèles à l'échelle de l'écosystème | 92 |
| 3.4.2 Les flux annuels à l'échelle de la tourbière de La Guette | 95 |
| 3.4.3 Estimations du bilan net de l'écosystème à l'échelle de la tourbière de La Guette | 98 |
| 3.4.4 Variabilité spatiale sur la tourbière de La Guette | 100 |
| 3.4.5 Représentativité locale du modèle | 101 |
| 4 Effets de l'hydrologie sur les flux de GES | 103 |
| 4.1 Introduction | 104 |
| 4.2 Procédure expérimentale | 106 |
| 4.2.1 Expérimentation A | 106 |
| 4.2.2 Expérimentation B | 107 |
| 4.2.3 Analyse des données | 107 |
| 4.3 Résultats | 110 |
| 4.3.1 Expérimentation A | 110 |
| 4.3.2 Expérimentation B | 114 |
| 4.3.3 tendances générales | 117 |
| 4.4 Discussion | 117 |
| 4.4.1 Comparaison aux mesures <i>in-situ</i> | 117 |
| 4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de gaz | 120 |
| 4.4.3 Effet cycles multiples | 121 |
| 5 Variation journalière de la respiration de l'écosystème (article) | 123 |
| 5.1 Introduction | 124 |
| 5.1.1 Study sites | 126 |
| 5.1.2 Data acquisition | 126 |
| 5.1.3 Data synchronisation | 127 |
| 5.1.4 Sensitivity of ER to temperature | 127 |
| 5.1.5 Testing difference between daytime and nighttime ER sensitivity to temperature | 128 |
| 5.1.6 Physico-chemical characterisation of the peat | 128 |
| 5.2 Results | 129 |

| | | |
|-------|---|------------|
| 5.2.1 | Air temperature and ER variability | 129 |
| 5.2.2 | ER and soil temperature synchronisation | 131 |
| 5.2.3 | Model implementation | 132 |
| 5.2.4 | ER and temperature relationship | 132 |
| 5.2.5 | Q_{10} evolution | 134 |
| 5.2.6 | Daytime and nighttime differences | 134 |
| 5.2.7 | Peat characterisation | 138 |
| 5.3 | Discussion | 139 |
| 5.3.1 | ER differences between sites | 139 |
| 5.3.2 | Time-delay between temperature and ER | 140 |
| 5.3.3 | Synchronising ER and temperature improves ER sensitivity to temperature representation | 140 |
| 5.3.4 | Differences between daytime and nighttime ER measurements . | 141 |
| 5.3.5 | Q_{10} sensitivity to temperature depth and synchronisation . . | 141 |
| 5.4 | Conclusions | 142 |
| | Conclusions et perspectives | 145 |
| | Références bibliographiques | 151 |
| | Index | 163 |
| | Annexes | 165 |
| A | Photos supplémentaires | 166 |
| B | protocole végétation | 166 |
| C | Le projet CARBIODIV | 169 |
| D | package m70r | 169 |
| E | Tableau modélisation par groupe de végétation | 170 |

LISTE DES FIGURES

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Global distribution of peatlands | 12 |
| 1.2 | Processus de formation des tourbières, à gauche l'atterrissement et à droite la paludification. Modifié d'après Manneville (1999) | 13 |
| 1.3 | Micro-topographie dans les tourbières. Modifié d'après Rydin et Jeglum (2013b) | 14 |
| 1.4 | Nombre de tourbières nouvellement formées pendant l'holocène. Modifié d'après (MacDonald <i>et al.</i> , 2006). | 19 |
| 1.5 | Projection des changements à l'horizon 2100, des moyennes et extrêmes annuels (sur terre) des températures de l'air et des précipitations : (a) température de surface moyenne par °C de changement global moyen, (b) 90 ^e percentile des températures journalières maximum par °C de changement de température moyenne maximale, (c) précipitations moyenne (en % par °C de changement de température moyenne) et (d) fraction de jours ayant des précipitations dépassant le 95 ^e percentile. Sources : (a) et (c) simulations CMIP5, scénario RCP4.5, (b) et (d) adaptation d'après Orlowsky et Seneviratne (2012)(IPCC2013). | 19 |
| 1.6 | Décroissance de la proportion de CO ₂ de l'atmosphère suite à une émission idéalisée de 100 PgC. les graphes (a) et (b) sont une moyenne de modèles (Joos <i>et al.</i> , 2013), le graphe (c) est une moyenne d'autres modèles (Archer <i>et al.</i> , 2009). Modifié d'après (Ciais <i>et al.</i> , 2014). | 21 |
| 1.7 | schéma des flux de carbone entre une tourbière et l'atmosphère | 22 |
| 1.8 | todo, modifié d'après Long et Hällgren (1993) | 27 |
| 1.9 | Productivités moyennes des espèces de sphagnes en g m ⁻² an ⁻¹ . Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. Le nombre d'observation est indiqué par les nombres à l'intérieur des barres. Les espèces en orange sont celles rencontrées sur le site d'étude. Modifié d'après Gunnarsson (2005) | 29 |
| 1.10 | Vitesse apparente d'accumulation du carbone à long terme durant l'Holocène. Les chiffres entre parenthèses représentent le nombre de mesures. Modifié d'après Yu <i>et al.</i> (2009) | 35 |

| | |
|--|----|
| 1.11 Bilan de C dans différentes tourbières (en gC m ⁻² an ⁻¹), en fonction de la température moyenne annuelle dans la littérature. Les couleurs montrent quels flux sont pris en compte dans le bilan, la ligne de tirets sépare les écosystèmes stockant du carbone (au dessus) de ceux libérant du carbone (en dessous). | 36 |
| 2.1 Site d'études SNOT | 42 |
| 2.2 Carte de la tourbière de La Guette | 44 |
| 2.3 Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure. | 45 |
| 2.4 Évolution du niveau de la pluviométrie, en mm, des années 2011 à 2014 | 46 |
| 2.5 Évolution du niveau de la nappe, en cm par rapport à la surface, des années 2011 à 2014 | 46 |
| 2.6 Évolution de la température de l'air (en °C) des années 2011 à 2014 . . | 46 |
| 2.7 Mesures de CO ₂ | 49 |
| 2.8 SPIRIT | 50 |
| 3.1 Répartition des 20 placettes de mesures suivant un échantillonnage aléatoire stratifié. | 58 |
| 3.2 Cas idéaux de distribution des résidus. Modifié d'après source inconnue, repris de : https://danieljhocking.wordpress.com/2011/07/18/model-validation-interpreting-residual-plots/ | 62 |
| 3.3 Partitionnement des placettes en fonction de leur similarité en termes de composition végétale (pourcentage des strates muscinales, herbacées et arbustives) | 65 |
| 3.4 Évolution du niveau de la nappe moyen des 20 embases mesuré pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015). Les valeurs correspondent à la distance entre le niveau de nappe et la surface du sol. . . | 67 |
| 3.5 Évolution de la végétation à travers l'indice de végétation et les strates qui le compose | 68 |
| 3.6 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 | 68 |
| 3.7 Cinétique de la conductivité (A), du pH (B) et du carbone organique dissout (C) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015) . . | 69 |
| 3.8 Cinétique du niveau de la PPB (A), de la RE (B) et de l'ENE (C) pendant la période de mesure. Moyenne des 20 embases de mars 2013 à février 2015. | 71 |
| 3.9 Évolution des flux de méthane moyen (N ?) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015) | 72 |
| 3.10 Relations entre les flux de gaz et une sélection de facteurs contrôlant . | 73 |
| 3.11 PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.3 | 75 |
| 3.12 PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.5 | 76 |
| 3.13 RE modèles avec Tair | 78 |
| 3.14 RE modèles avec Tair | 78 |

| | | |
|------|--|-----|
| 3.15 | Évolution du R ² de l'équation $F_{CH_4} = a * \exp(b * Température)$ avec la profondeur. La ligne de tirets gris représente la surface du sol. La zone bleu claire représente la gamme des niveau moyen relevés sur le site et la zone bleu foncé le niveau moyen pour l'année 2013 et 2014. | 79 |
| 3.16 | CH4 modèle H | 81 |
| 3.17 | Flux de CO ₂ interpolé à l'heure à partir de PPB-1 (en haut) et PPB-2 (en bas). Les points rouges représentent les moyennes des mesures mensuelles et leur déviation standard | 83 |
| 3.18 | Flux de CO ₂ interpolé à l'heure à partir de RE-1 (en haut), RE-2 (au milieu) et RE-3 (en bas). Les points rouges représentent les moyennes des mesures mensuelles et leur déviation standard | 84 |
| 3.19 | Flux de CO ₂ interpolé à partir de FCH4. Les points violettes représentent les moyennes des mesures mensuelles et leur déviation standard | 85 |
| 3.20 | Recouvrement végétal moyen par strate (en %) des 4 groupes, les groupes sont nommés en fonction de la végétation majoritaire. Les barres d'erreur représente la déviation standard. | 89 |
| 3.21 | Distribution de l'erreur standard (en gris) par placette et des paramètres des modèles RE-1 et RE-3 (en noir) | 90 |
| 3.22 | Distribution de l'erreur standard par placette (en gris) et des paramètres du modèle PPB-2 (en noir) | 91 |
| 3.23 | Relation entre la production primaire brute (PPB) et la température moyenne annuelle (en °C) dans la littérature (en gris) et pour ces travaux. | 95 |
| 3.24 | Relation entre la respiration de l'écosystème (RE) et la température moyenne annuelle (en °C) dans la littérature (en gris) et pour ces travaux. | 96 |
| 3.25 | Relation entre les flux de CH ₄ et la température moyenne annuelle (en °C) dans la littérature (en gris) et pour ces travaux. | 97 |
| 3.26 | Relation entre le bilan de carbone net de l'écosystème (BCNE) et la température moyenne annuelle (en °C) dans la littérature (en gris) et pour ces travaux. La ligne de tirets sépare les écosystèmes stockant du carbone (au dessus) de ceux libérant du carbone (en dessous). | 99 |
| 4.1 | Schéma d'un mésocosme | 107 |
| 4.2 | Prélèvement des mésocosmes (en haut). Mésocosmes installés et protégés de la pluie (en bas). | 109 |
| 4.3 | Relation entre les niveaux de nappe et la teneur en eau du sol pour l'expérimentation A (en haut) et en bas pour l'expérimentation B. Les numéros correspondent à l'ordre des campagnes de mesure et les lignes grises aux déviations standard. | 110 |
| 4.4 | 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. | 112 |
| 4.5 | 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. | 115 |
| 4.6 | Relations entre les flux de GES et le niveau de la nappe | 118 |
| 4.7 | | 119 |

| | | |
|-----|--|-----|
| 5.1 | Ecosystem Respiration (ER), air and peat temperature, in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT) | 130 |
| 5.2 | Time delay between temperature at different depths and ER, in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT) | 131 |
| 5.3 | Profile of R^2 and NRMSE, (RMSE, normalized by the mean), with depth, in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT) using the exponential model. | 135 |
| 5.4 | Profile of Q_{10} with depth for synchronised (white) and non synchronised (black) data and exponential model in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT). | 136 |
| 5.5 | Differences between daytime and nighttime measurements using 3 models : non-synchronised data at -5 cm depth temperature ($T_5 - NS$), synchronised data at -5 cm depth temperature ($T_5 - S$), and non-synchronised data at air temperature (T_{air}). | 137 |
| 5.6 | Comparaison entre les valeurs estimées par les modèle RE-1 (ligne orange), RE-3 (ligne bleue) et les mesures faites à haute fréquence sur le site du 30 juillet au 2 août 2013 (points noirs). Les lignes de pointillés représentent l'erreur (NRMSE) associée aux modèles. La zone grisée correspond à la gamme de valeur de la RE mesurée sur l'ensemble des 20 placettes pendant la campagne du 24-25 juillet 2013. La ligne de tiret correspond à la moyenne de la RE pour cette campagne. | 148 |
| 7 | Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure. | 166 |
| 8 | Calibration de la biomasse en fonction de la hauteur | 167 |
| 9 | Scanne des feuilles | 167 |
| 10 | 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 | 168 |
| 11 | Planche de graphes permettant le diagnostique des mesures de flux de CO_2 | 169 |

LISTE DES TABLEAUX

| | | |
|-----|--|-----|
| 1.1 | Estimations des stocks de C pour différents environnements | 15 |
| 1.2 | Surface de tourbe utilisée selon les usages considérés (tourbières non-tropicale). Modifié d'après Joosten et Clarke (2002). | 18 |
| 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. | 82 |
| 3.2 | Bilan annuel des flux, en $\text{gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, en fonction des modèles utilisés. | 86 |
| 3.3 | Bilan de carbone annuel, en $\text{gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, en fonction des modèles utilisés. Les valeurs entre parenthèses représentent l'erreur associée au bilan | 86 |
| 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. | 87 |
| 3.5 | Bilan des flux de CO_2 en $\text{gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ interpolés par groupe de végétation avec les modèles RE-1 et RE-3 pour la respiration et les modèles PPB-1 et PPB-2 pour la photosynthèse. (Le modèle RE-2, très proche de RE-3 n'a pas été inclus) | 91 |
| 3.6 | Bilan de CO_2 par groupe de végétation (en $\text{gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$) avec différentes combinaison de modèles. La dernière colonne représente de bilan de CO_2 à l'échelle de l'écosystème. | 92 |
| 4.1 | Récapitulatif des différentes phases de dessication/réhumectations pour les deux expérimentations. La colonne code phase correspond à la première lettre de la phase (D pour dessication et R pour réhumectation) suivie d'un numéro représentant l'ordre du cycle | 108 |
| 5.1 | R^2 and NRMSE profile with depth for models using non-synchronised and synchronised data and for the three equations (linear : lin, exponential : exp, arrhenius : arr). | 133 |
| 5.2 | Peat chemical properties as a function of depth in cm : content (%) N, C, H, S, the total, retention and effective porosity, Φ_T , Φ_R , Φ_E respectively in $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, solid peat volumic fraction in $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ and the bulk density (Bd) in g.cm^{-3} | 138 |

| | | |
|---|--|-----|
| 3 | Valeur des paramètres des équations utilisées pour modéliser les flux de RE par groupe de végétation avec se l'erreur standard (en %) et pval la p-value. | 170 |
| 4 | Valeur des paramètres des équations utilisées pour modéliser les flux de PPB par groupe de végétation avec se l'erreur standard (en %) et pval la p-value. | 171 |



REMERCIEMENTS

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

¹

²

INTRODUCTION

3 Contexte général

4 Vers 1610, Jan Baptist Van Helmont, chimiste, physiologiste et médecin, découvre
5 le dioxyde de carbone (CO_2) qu'il nomme « gaz sylvestre » (Philippe de Souabe-
6 Zyriane, 1988). À cette époque pré-industrielle (avant 1800), les concentrations en
7 CO_2 sont généralement estimées à 280 ppm¹ (Siegenthaler et Oeschger, 1987). En
8 1957, Charles David Keeling, scientifique américain, met au point et utilise pour la
9 première fois un analyseur de gaz infra-rouge pour mesurer la concentration de CO_2
10 de l'atmosphère sur l'île d'Hawaii, à Mauna Loa. La précision et la fréquence im-
11 portante de ses mesures lui permirent de voir pour la première fois les variations
12 journalières et saisonnières des concentrations en CO_2 atmosphérique, mais égale-
13 ment à plus long terme leur tendance haussière (Harris, 2010). Depuis l'époque pré-
14 industrielle les concentrations en CO_2 ont en effet légèrement augmenté et sont alors
15 estimées à moins de 320 ppm. Ce constat a probablement joué un rôle dans la prise de
16 conscience, par la communauté scientifique, de l'importance et de l'intérêt de l'étude
17 du changement climatique et plus largement des changements globaux. En 2013, le
18 Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) a publié
19 son 5^e rapport sur le changement climatique qui appuie une nouvelle fois sur l'im-
20 portance des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) sur le climat (Stocker *et al.*,
21 2013). Au printemps 2014, la barre symbolique des 400 ppm a été dépassée dans tout
22 l'hémisphère nord selon un communiqué de l'Organisation Météorologique Mondiale
23 (http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_991_fr.html).

24 À l'échelle globale, l'humanité en brûlant des combustibles fossiles et en produisant
25 du ciment, émet dans l'atmosphère environ $7,8 \text{ PgC an}^{-1}$ ($7,8 \times 10^{15} \text{ gC an}^{-1}$) (Ciais
26 *et al.*, 2014). Les flux « naturels » entre l'atmosphère et la biosphère sont d'un ordre de
27 grandeur supérieur : 98 et 123 PgC an^{-1} pour la respiration (CO_2 et CH_4 principale-
28 ment) et la photosynthèse au sens large (Bond-Lamberty et Thomson, 2010; Beer *et al.*,
29 2010). L'importance de ces flux renforce la nécessité de les comprendre et si possible
30 de les prédire, car une modification de leur dynamique même faible pourrait avoir des

1. Partie par million

31 conséquences importantes. Les écosystèmes naturels, en plus d'en échanger de façon
32 importante avec l'atmosphère, stockent du carbone de façon importante : entre 1500
33 et 2000 PgC pour les sols par rapport aux 750 à 800 PgC stockés dans l'atmosphère.

34 Parmi les écosystèmes terrestres, les tourbières fonctionnent naturellement comme
35 des puits de carbone : elles stockent du carbone grâce des conditions de saturation en
36 eau importante. Elles ne représentent que 2 à 3 % des terres émergées mais contiennent
37 entre 270 et 455 PgC, faisant de ces écosystèmes des stocks importants ([Gorham, 1991](#);
38 [Turunen *et al.*, 2002](#)) : d'abord parce qu'ils sont relativement concentrés en terme
39 de surface, mais également car situés majoritairement dans les hautes latitudes de
40 l'hémisphère nord, là où le réchauffement climatique attendu est le plus important.
41 Ces écosystèmes ont pendant longtemps été considérés comme néfastes et impropre.
42 D'ailleurs une grande partie d'entre eux ont été drainés pour être exploités, que ce
43 soit pour utiliser la tourbe comme combustible ou comme substrat horticole, ou que
44 ce soit pour utiliser les tourbières comme terres agricoles ou sylvicoles. Autrefois étu-
45 diés pour les propriétés de combustible de la tourbe, Les tourbières sont aujourd'hui
46 principalement étudiées vis-à-vis des perturbations qu'elles subissent : perturbations
47 humaines, hausse ou baisse du niveau de la nappe, apports azotés, réhabilitation, ou
48 perturbations climatique, effet de la température, des précipitations. Parmi toutes ces
49 questions, celle du devenir de ce stock de carbone reste incertaine. La variabilité de ces
50 écosystèmes rend la prédiction de leurs comportements délicate et aujourd'hui malgré
51 leur importance ces écosystèmes ne sont pas pris en compte dans les modèles globaux.
52 Le dernier rapport du GIEC note ainsi que si les connaissances ont avancé, de nombreux
53 processus ayant trait à la décomposition du carbone sont toujours absents des modèles
54 notamment en ce qui concerne le carbone des zones humides boréales et tropicales
55 et des tourbières ([Ciais *et al.*, 2014](#)). Mieux comprendre ces écosystèmes, à différentes
56 échelles, est donc nécessaire pour espérer pourvoir un jour estimer leurs comportements
57 face aux changements qu'ils subissent et vont subir.

58 Objectif de la thèse et approche mise en oeuvre

59 Dans ce contexte l'objectif de ces travaux est donc de mieux comprendre la dyna-
60 mique du carbone au sein des tourbières. Tout d'abord en caractérisant la variabilité
61 spatiale et temporelle des flux de carbone à travers l'établissement du bilan de carbone
62 d'une tourbière de Sologne. De déterminer quels facteurs environnementaux contrôlent
63 le fonctionnement comme puits ou source de carbone de cet écosystème.

64 Pour atteindre ces objectifs, nos travaux ont été articulés autour de deux axes
65 principaux : dans un premier temps, l'**observation** régulière des flux de gaz (CO_2
66 et CH_4) ainsi que d'un certain nombre de paramètres environnementaux servant à
67 la caractérisation des variabilités spatiales et temporelles, ainsi qu'à l'étude des fac-
68 teurs contrôlant. Certains facteurs contrôlant sont, dans un second temps, étudiés plus
69 spécifiquement à travers un volet **expérimentation**. Ce dernier doit permettre une
70 meilleure compréhension des processus clés avec notamment l'impact de l'hydrologie.

71 Le document est structuré de la façon suivante :

- 72 — Le premier chapitre pose le contexte dans lequel s'inscrit ce travail. Cette syn-
73 thèse bibliographique se découpe en trois parties ; la première relativement gé-
74 nérale définit les terminologies et les concepts principaux employés par la suite.
75 La seconde précise l'état des connaissances sur les tourbières vis à vis des flux
76 de carbone. Enfin la troisième partie replace ce travail au sein du contexte pré-
77 cédemment établi.
- 78 — Le deuxième chapitre quant à lui décrit d'abord les sites d'études puis les mé-
79 thodes et matériels employés lors des différentes expérimentations.
- 80 — Le troisième chapitre présente l'estimation du bilan de carbone de la tourbière
81 de La Guette, sa variabilité temporelle et spatiale.
- 82 — Le quatrième chapitre décrit l'effet de cycle de dessication/ré-humectation sur
83 les flux de GES de mésocosmes prélevés sur le terrain.
- 84 — Le cinquième chapitre se concentre sur la respiration à une échelle journalière
85 et sur des aspects davantage méthodologiques que sont la prise en compte du

86 temps de latence entre la vague de chaleur et les flux, et la différence entre les
87 mesures faites le jour et la nuit.

88 — Enfin la dernière partie du document est une synthèse des travaux réalisés, de
89 leurs résultats, suivie d'une ouverture vers les perspectives que ce travail apporte.

90 CHAPITRE 1

91 SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

92

| | | |
|-----|--|-----------|
| 93 | 1.1 Les tourbières et le cycle du carbone | 8 |
| 94 | 1.1.1 Zones humides et tourbières : définitions et terminologies | 8 |
| 95 | 1.1.2 Tourbières et fonctions environnementales | 14 |
| 96 | 1.1.3 Les tourbières et les changements globaux | 16 |
| 97 | 1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants | 20 |
| 98 | 1.2.1 GES et tourbières | 20 |
| 99 | 1.2.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières | 22 |
| 100 | 1.2.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux | 26 |
| 101 | 1.2.4 Bilans de C à l'échelle de l'écosystème | 33 |
| 102 | 1.2.5 Méthodologies, mesures et estimation des flux | 36 |
| 103 | 1.3 Objectifs du travail | 39 |
| 104 | | |
| 105 | | |
| 106 | | |

1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

107 La première partie de ce chapitre traite des tourbières de façon générale : Que
108 sont ces écosystèmes ? Quelle terminologie y est associée ? Comment se forment-ils ?
109 Quelle est leur situation dans le monde d'aujourd'hui ? La seconde partie décrit plus
110 spécifiquement les tourbières à travers le prisme des flux de carbone, principalement
111 gazeux : Quels sont les liens entre les tourbières et les flux de carbone ? Quels sont les
112 facteurs qui contrôlent ces flux ? Quels bilans de carbone pour ces écosystèmes ?

113 1.1 Les tourbières et le cycle du carbone

114 Que se soit dans leurs définitions, leurs modes de formation, les tourbières sont des
115 écosystèmes indissociables du cycle du carbone.

116 1.1.1 Zones humides et tourbières : définitions et terminologies

117 Définitions

118 Les tourbières font partie d'un ensemble d'écosystèmes plus large que l'on appelle
119 les zones humides (*wetlands* en anglais). Ces zones humides ne sont ni des écosystèmes
120 terrestres au sens strict, ni des écosystèmes aquatiques. Elles sont à la frontière entre
121 ces deux mondes et sont caractérisées par un niveau de nappe élevé, proche de la surface
122 du sol, voire au dessus. Cette omniprésence de l'eau joue fortement sur l'aération du
123 milieu et constraint, de façon plus ou moins importante, l'accès à l'oxygène. Les zones
124 humides ont été définie en 1971, lors de la convention dite de RAMSAR¹ de la façon
125 suivante :

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

ZONE HUMIDE :

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

(Ramsar, 1987)

Les zones humides regroupent donc des écosystèmes très variés parmi lesquels les marais, les mangroves, les plaines d'inondations et les tourbières. Ces dernières sont des écosystèmes plutôt continentaux (par opposition aux écosystèmes côtiers comme les deltas) et ont comme particularité d'avoir, comme toutes les zones humides, un niveau de nappe élevé et donc une zone anaérobie importante. Ceci induit le développement de communautés microbiennes et végétales spécifiques, adaptées aux milieux fortement humides ou inondés. Les sphaignes sont caractéristiques de ces écosystèmes, ce sont des mousses, des bryophytes de la famille des *Sphagnaceae*.

Les tourbières représentent 50 à 70 % des zones humides Joosten et Clarke (2002). Leur définition est variable selon les régions ((Réf needed), exple). Deux définitions sont régulièrement utilisées :

TOURBIÈRE :

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

Définition traduite d'après Joosten et Clarke (2002)

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

2. Marais tourbeux situé sur une hauteur

1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

TOURBIÈRE ACTIVE :

142 Écosystème dans lequel un processus de tourbification est actif.

Définition traduite d'après Joosten et Clarke (2002)

143 Cette seconde définition correspond au *mire* anglo-saxon et peut être traduite en fran-
144 çais par le terme de tourbière active. Les concepts derrière ces deux définitions se
145 chevauchent mais ne sont pas complètement similaires : une tourbière drainée peut,
146 par exemple, avoir plus de 30 cm de tourbe et ne plus former de tourbe, ne plus être
147 active. À l'inverse il peut exister des zones où l'épaisseur de tourbe est inférieure à
148 30 cm malgré un processus de tourbification actif. Un même écosystème tourbeux peut
149 d'ailleurs contenir à la fois des zones qui correspondent à la première définition et
150 d'autres à la seconde. Les tourbières sont donc, selon la définition utilisée, des éco-
151 systèmes contenant ou des écosystèmes formant de la tourbe. Mais qu'est ce que la
152 tourbe ?

TOURBE :

153 «Accumulation sédentaire³ de matériel composé d'au moins 30 % (matière
sèche) de matières organiques mortes.»

Définition traduite d'après Joosten et Clarke (2002)

154 Le seuil de 30 % est souvent utilisé pour rapprocher sa définition de celle d'un sol
155 organique (histosol) au sens large, dans lesquels sont classés la majorité des sols tour-
156 beux (selon la classification). D'autres définitions existent, faisant la distinction entre
157 sols organiques et tourbes avec un seuil à 75 % (Andrejko *et al.*, 1983) ou 80 % (Landva
158 *et al.*, 1983). Il est également nécessaire de préciser que, au delà de la classification
159 utilisée, ce que les écologues considèrent comme de la tourbe contient généralement
160 80 % de matières organiques au minimum (Rydin et Jeglum, 2013a). Ce processus de
161 formation est appelé la tourbification ou turfogénèse et les matières organiques accumu-
162 lées proviennent majoritairement de la végétation. On définit les matières organiques
163 de la façon suivante :

3. Joosten et Clarke (2002) distinguent sédimentaire de sédentaire dans le sens où dans le premier cas la matière migre (dans la colonne d'eau par exemple) entre la zone où elle est produite et la zone où elle est stockée, ce qui n'est pas le cas pour le second cas où ces zones sont confondues.

MATIÈRES ORGANIQUES :

Matières constituées d'un assemblage de composés ayant une ou plusieurs liaison C–H. Ces matières 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'autres⁴.

164

¹⁶⁵ Distribution des tourbières à l'échelle mondiale

¹⁶⁶ Ces variations de définitions ajoutées aux limites floues qui peuvent exister entre
¹⁶⁷ certains écosystèmes tourbeux et non-tourbeux rendent la cartographie de ces écosys-
¹⁶⁸ tèmes délicate. Les estimations généralement citées évaluent la surface occupée par les
¹⁶⁹ tourbières à environ 4 000 000 km² ([Lappalainen, 1996](#)). Cette surface correspond à 2
¹⁷⁰ à 3 % de l'ensemble des terres émergées du globe. Plus de 85 % d'entre elles sont si-
¹⁷¹ tuées dans l'hémisphère nord, majoritairement dans les zones boréales et sub-boréales
¹⁷² ([Strack, 2008](#)) (Figure 1.1). Ce sont sur ces écosystèmes que sera focalisé ce travail, lais-
¹⁷³ sant de côté les tourbières tropicales dont le fonctionnement est distinct et spécifique
¹⁷⁴ (**Réf needed**).

¹⁷⁵ La formation des tourbières

¹⁷⁶ L'atterrissement et la paludification sont les deux processus principaux permettant
¹⁷⁷ la formation des tourbières (Figure 1.2). Il s'agit pour le premier du comblement pro-
¹⁷⁸ gressif d'une zone d'eau stagnante (Figure 1.2). Ce comblement est généralement lié à
¹⁷⁹ l'action combiné d'apports exogènes et d'une végétation colonisant les eaux en formant
¹⁸⁰ des tremblants⁵. La paludification est la formation de tourbe directement sur un sol
¹⁸¹ minéral, grâce à des conditions d'humidité importante dans des zones peu perméables

4. Cette définition, utile pour définir simplement les matières organiques, est cependant limitée car elle inclut des composés traditionnellement considérés comme minéraux (le graphite) et en exclut d'autres considérés comme organiques (acide oxalique) (Liste de diffusion ResMO (Réseau Matières Organiques http://www6.inra.fr/reseau_matieres_organiques)).

5. Radeau végétal, composé de végétation vivante et de débris qui peut masquer la surface de l'eau



FIGURE 1.1 – Global distribution of peatlands

et topographiquement favorables (dépressions). Ces modes de formation ne sont pas exclusifs, une tourbière pouvant se développer, selon les endroits considérés ou le temps, via des processus différents.

185 **Classifications**

Différentes classifications sont utilisées pour différencier ces écosystèmes. La plus générale et la plus utilisée dans la littérature distingue les tourbières dite hautes, ou de haut-marais, correspondant au *bog* anglais, et les tourbières basses, ou de bas-marais, correspondant au *fen* anglais.

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

Les tourbières de bas-marais ont une épaisseur généralement supérieure à 30 cm



FIGURE 1.2 – Processus de formation des tourbières, à gauche l'atterrissement et à droite la paludification. Modifié d'après Manneville (1999)



FIGURE 1.3 – Micro-topographie dans les tourbières. Modifié d'après Rydin et Jeglum (2013b)

198 avec un niveau de nappe très proche de la surface du sol. De forme concave ou en
 199 pente elles sont généralement alimentées en eau par des sources ou par ruissellement
 200 et sont donc dites minérotrophes. Le pH de leur eaux de surface varie de 4 à 8. Les
 201 végétations dominantes de ces écosystèmes peuvent être des bryophytes, des graminées
 202 ou des arbustes bas (Rydin et Jeglum, 2013b). Au sein de ces écosystèmes la topo-
 203 graphie est fortement variable et fait l'objet d'une terminologie particulière : on parle
 204 de buttes (*hummock* en anglais) pour désigner des sur-élévations topographiques, de
 205 gouille (*hollow* en anglais) pour les dépressions et de replat (*lawn* en anglais) pour les
 206 zones entre les deux (Figure 1.3).

207 1.1.2 Tourbières et fonctions environnementales

208 Puits de carbone

209 Par définition les tourbières stockent ou ont stocké du carbone. Cette fonction puits
 210 de carbone rend ces écosystèmes importants vis-à-vis des changements globaux et ce
 211 malgré la faible surface qu'ils représentent (pour rappel 2 à 3 % des terres émergées).
 212 En effet le carbone stocké dans les tourbières tempérées et boréales est estimé entre

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 | |

²¹³ 270 et 455 Gt C (Tableau 1.1). Cela représente 10 à 25 % du carbone présent dans les
²¹⁴ sols et entre 30 et 60 % du stock de carbone atmosphérique. Ce stock est un héritage
²¹⁵ datant des 10 derniers milliers d'années, l'holocène, période pendant laquelle se sont
²¹⁶ formées la majorité des tourbières (Yu *et al.*, 2010) (Figure 1.4).

²¹⁷ L'accumulation du carbone nécessite donc que davantage de carbone soit assimilé,
²¹⁸ par photosynthèse, qu'émis par l'écosystème. Les tourbières n'assimilent pas le carbone
²¹⁹ à des vitesses supérieures à d'autres écosystèmes. En comparaison avec un sol forestier
²²⁰ la photosynthèse de ces écosystèmes, que l'on appelle généralement la production pri-
²²¹ maire, est même plus faible (**Réf needed**). Ce n'est donc pas en assimilant d'avantage
²²² de carbone que les tourbières l'accumulent. Si les entrées de carbone ne sont pas su-
²²³ périeures à d'autres écosystèmes, il faut donc que les sorties soient plus faibles. C'est
²²⁴ en effet parce que les matières organiques produites par ces écosystèmes sont moins
²²⁵ dégradées que dans d'autres que le carbone s'accumule. Ceci est rendu possible par les
²²⁶ niveaux de nappe élevés de ces écosystèmes, minimisant les processus de dégradation
²²⁷ aérobie en limitant l'accès à l'oxygène. Cet effet est de plus renforcé par la végétation
²²⁸ spécifique de ces écosystèmes, les sphaignes, qui produisent des litières difficilement
²²⁹ dégradables, dite récalcitrantes, par rapport à celles produites par les végétaux vas-
²³⁰ culaires (Hobbie, 1996; Liu *et al.*, 2000). La vitesse de décomposition relative entre
²³¹ les différentes espèces de sphaignes est mal connue (Cornelissen *et al.*, 2007). Des dif-
²³² férences ont été observées entre espèces pour les parties jeunes de la plante, mais la
²³³ différence est moindre pour les parties plus anciennes (Limpens et Berendse, 2003).

234 Biodiversité dans les tourbières

235 Les tourbières sont le siège d'une biodiversité importante et spécifique, avec en
236 premier lieu les sphaignes qui en plus de produire des litières récalcitrantes ont d'autres
237 spécificités : ces bryophytes, ces mousses sont des espèces dites ingénierues, capables
238 de modifier l'environnement dans lequel elles vivent afin de l'adapter à leurs besoins.
239 Les sphaignes sont ainsi capables d'abaisser le pH, de capturer des nutriments et de les
240 séquestrer et ce même quand elles n'en ont pas besoin afin d'empêcher d'autres espèces
241 notamment vasculaires d'en profiter. Plus précisément, le fait que les sphaignes captent
242 les nutriments via leur capitulum leur permet d'intercepter les nutriments avant qu'ils
243 ne soient captés par d'éventuelles racines positionnées plus bas ([Malmer *et al.*, 1994](#);
244 [Svensson, 1995](#)). Ces écosystèmes abritent par ailleurs une grande variété de plantes, de
245 micro-organismes (bactéries et champignons) et d'animaux (insectes, vers, amphibiens,
246 oiseaux...).

247 Autres fonctions environnementales

248 Les tourbières jouent également un rôle important vis-à-vis de la qualité de l'eau,
249 notamment en filtrant les matières en suspension, en dégradant certains micro-polluants
250 organiques. Elles permettent également de tamponner les effets d'une sécheresse ou
251 d'une inondation en fournissant un peu d'eau dans le premier cas et en épongeant une
252 partie des excédents dans le second ([Joosten et Clarke, 2002](#); [Parish *et al.*, 2008](#)).

253 1.1.3 Les tourbières et les changements globaux

254 On définit les changements globaux comme l'ensemble des modifications environ-
255 nementales plus ou moins rapides, ayant lieu à l'échelle mondiale, quelle que soit leur
256 origine. Les deux contraintes développées dans cette partie sont la pression de l'homme :
257 contrainte anthropique, et celle du climat : contrainte climatique.

258 **Les contraintes anthropiques**

259 Les interactions entre les Hommes et les zones humides au sens large et les tourbières
260 en particulier remontent probablement à l'aube de l'humanité. Des chemins de rondins
261 néolithique aux crannogs de l'époque romaine ([Buckland, 1993](#)), de grandes décou-
262 vertes archéologiques ont été faites dans les écosystèmes tourbeux témoins d'époques
263 révolues. L'utilisation de la tourbe et des tourbières a dû commencer relativement tôt,
264 mais c'est à partir du 17^e siècle que le drainage de ces écosystèmes, pour les convertir
265 en terres agricoles, s'est intensifié. Au 19^e siècle, l'apparition de machines permettant
266 une récolte industrialisée de la tourbe a développé son utilisation comme combustible.
267 Enfin depuis le milieu du 20^e une part importante de ces écosystèmes a été drainée
268 pour développer la sylviculture. Aujourd'hui l'exploitation principale de la tourbe est
269 liée à son utilisation comme substrat horticole ([Lappalainen, 1996](#); [Chapman *et al.*, 2003](#)). Ces utilisations les ont fortement perturbés car elles nécessitent généralement
270 de drainer ces écosystèmes, notamment pour pouvoir y faire rouler des engins méca-
271 nisés Aujourd'hui la surface de tourbières altérées est estimée à 500 000 km² environ,
272 principalement du fait de leur reconversion pour l'agriculture et la sylviculture ([Ta-
bleau 1.2](#)). En France, suite à leur utilisation, principalement agricole, la surface des
273 tourbières a été divisée par deux entre 1945 et 1998, passant de 1200 km² à 600 km²
274 ([Lappalainen, 1996](#); [Manneville, 1999](#)).

277 Ces écosystèmes ont donc été et sont encore perturbés par différentes activités
278 humaines. Malgré tout leur importance est connue et elles sont l'objet de nombreuses
279 actions de préservation et/ou de réhabilitation.

280 **Les contraintes climatiques**

281 Comme nous l'avons dit, le stock de C accumulé par les tourbières s'est majori-
282 tairement constitué pendant l'Holocène. À cette époque déjà ces écosystèmes étaient
283 influencés par le climat, et leur développement n'a pas été linéaire sur ces douze der-
284 niers milliers d'années. Il est reconnu que le développement des tourbières est très
285 important au début de cette période ([Smith *et al.*, 2004](#); [MacDonald *et al.*, 2006](#); [Yu](#)

1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

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

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

²⁸⁶ *et al.*, 2009). Plus particulièrement entre il y a 12 000 et 8000 ans, période pendant
²⁸⁷ laquelle on recense la plus grande proportion d'initiation de tourbières (Figure 1.4).
²⁸⁸ Cette période coïncide avec le maximum thermique holocène (HTM), période pendant
²⁸⁹ laquelle le climat était plus chaud qu'aujourd'hui (Kaufman *et al.*, 2004). Ce constat
²⁹⁰ peut sembler paradoxal : en effet, dans la littérature concernant les tourbières et le
²⁹¹ réchauffement climatique actuel, il est craint que ces écosystèmes ne deviennent des
²⁹² sources de carbone. Cependant ces même auteurs qui ont montré cette relation entre
²⁹³ le HTM et le développement important des tourbières, ne préjugent pas de l'effet du
²⁹⁴ réchauffement actuel. Notamment Jones et Yu (2010) expliquent que pendant cette pé-
²⁹⁵ riode de maximum thermique, existe également une saisonnalité très importante, avec
²⁹⁶ des été chauds et des hivers froid, qui a dû en minimisant la respiration hivernale de ces
²⁹⁷ écosystèmes, jouer un rôle important dans leur développement. Cette forte saisonnalité
²⁹⁸ n'est pas attendue lors du réchauffement actuel. L'effet estimé dans les hautes latitudes
²⁹⁹ semble plus important pendant l'hiver et l'automne, et tendrait donc à minimiser cette
³⁰⁰ saisonnalité (Christensen *et al.*, 2007). Les effets directs attendus du réchauffement
³⁰¹ dans les hautes latitudes à l'horizon 2100, sont une augmentation des températures de
³⁰² 2 à 8 °C dans les zones boréales, et de 2 à 6 °C dans les zones tempérées, ainsi qu'une
³⁰³ augmentation probable des précipitations (Figure 1.5). De façon plus indirecte est at-
³⁰⁴ tendue la fonte du permafrost, l'augmentation de l'intensité et de la fréquence de feux
³⁰⁵ et des changements dans les compositions des communautés végétales (Christensen
³⁰⁶ *et al.*, 2013; Frolking *et al.*, 2011).



FIGURE 1.4 – Nombre de tourbières nouvellement formées pendant l’holocène. Modifié d’après ([MacDonald et al., 2006](#)).



FIGURE 1.5 – Projection des changements à l’horizon 2100, des moyennes et extrêmes annuels (sur terre) des températures de l’air et des précipitations : (a) température de surface moyenne par °C de changement global moyen, (b) 90^e percentile des températures journalières maximum par °C de changement de température moyenne maximale, (c) précipitations moyenne (en % par °C de changement de température moyenne) et (d) fraction de jours ayant des précipitations dépassant le 95^e percentile. Sources : (a) et (c) simulations CMIP5, scénario RCP4.5, (b) et (d) adaptation d’après [Orlowsky et Seneviratne \(2012\)](#)[\(IPCC2013\)](#).

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

307 Les tourbières, qui ont accumulées un stock de carbone important, sont donc sou-
308 mises à des contraintes fortes qu'elles soient anthropiques ou climatiques. Afin de mieux
309 cerner le devenir de ce carbone, l'étude de ces écosystèmes, des flux de carbone qu'ils
310 échangent avec l'atmosphère, est une nécessité.

311 1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs 312 contrôlants

313 Cette partie s'attache à décrire les GES et leurs liens avec les tourbières, les flux de
314 carbone et les processus qui y sont liés, puis les facteurs contrôlant ces flux à l'échelle des
315 processus jusqu'aux individus et communautés (nécessaire afin de pouvoir appréhender
316 correctement ces flux à des échelles plus large), les facteurs contrôlant à l'échelle de
317 l'écosystème (colonne de tourbe, site complet) et enfin les bilans de carbone.

318 1.2.1 GES et tourbières

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

321 La concentration en CO_2 dans l'atmosphère fluctuait avant l'ère industrielle entre
322 180 et 290 ppm. En 1750 au début de l'ère industrielle sa concentration était de 280 ppm
323 environ avant d'augmenter pour atteindre 391 ppm aujourd'hui (moyenne annuelle en
324 2011) ([Ciais et al., 2014](#)). Différents processus permettent d'extraire du CO_2 de l'at-
325 mosphère, la photosynthèse, la dissolution du CO_2 dans l'océan et enfin l'altération de
326 silicate et les réactions avec le carbonate de calcium. Ces processus s'effectuent avec des
327 échelles de temps différentes, en conséquence après une émission de CO_2 , il ne reste que
328 40 % de cette émission après 100 ans, mais il reste toujours plus de 20 % après 1000 ans
329 et plus de 10 % après 10 000 ans ([Joos et al., 2013; Ciais et al., 2014](#)) (Figure 1.6).



FIGURE 1.6 – Décroissance de la proportion de CO₂ de l’atmosphère suite à une émission idéalisée de 100 PgC. les graphes (a) et (b) sont une moyenne de modèles (Joos *et al.*, 2013), le graphe (c) est une moyenne d’autres modèles (Archer *et al.*, 2009). Modifié d’après (Ciais *et al.*, 2014).

330 La concentration en méthane de l’atmosphère est estimée à 350 ppb⁶ il y a 18 000 ans
 331 environ lors de la dernière glaciation, à 720 ppb en 1750, et à 1800 ppb aujourd’hui
 332 (ou plutôt en 2011) (Ciais *et al.*, 2014). À l’inverse du CO₂ sa durée de vie dans
 333 l’atmosphère est limitée : moins de 10 ans (Lelieveld *et al.*, 1998; Prather *et al.*, 2012).
 334 Malgré cela son potentiel de réchauffement global⁷ (PRG) est important notamment
 335 à court terme, 72 à 20 ans. À plus long terme son effet relativement au CO₂ diminue
 336 et atteint 25 à l’horizon 100 ans. Les zones humides sont la première source naturelle
 337 de CH₄ atmosphérique avec un flux à l’échelle globale estimé entre 145 et 285 Tg an⁻¹
 338 (Lelieveld *et al.*, 1998; Wuebbles et Hayhoe, 2002; Ciais *et al.*, 2014) (Tableau ?). Les
 339 tourbières de l’hémisphère nord comptent pour 46 Tg an⁻¹ (Gorham, 1991) (**pas de**
 340 **source plus récente ?**).

341 À l’échelle globale, le stockage de C par les tourbières, prenant en compte à la fois
 342 le CO₂ et le CH₄, est estimé à 70 Tg an⁻¹ (Clymo *et al.*, 1998).

6. Partie par milliard (*part per billion* en anglais)

7. indice permettant de comparer le pouvoir de réchauffement des différents GES en donnant une équivalence par rapport au CO₂. Le PRG du CO₂ vaut donc 1 par définition.



FIGURE 1.7 – schéma des flux de carbone entre une tourbière et l'atmosphère

³⁴³ 1.2.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières

³⁴⁴ De l'atmosphère à l'écosystème

³⁴⁵ Avant de stocker et de conserver du carbone, le faut le capturer. Ce transfert du
³⁴⁶ carbone de l'atmosphère à la tourbe se fait sous la forme de CO₂, assimilé lors de la
³⁴⁷ photosynthèse. Principalement par les végétaux supérieurs, et éventuellement, bien que
³⁴⁸ dans de moindre proportions, par des algues, des lichens ou des bactéries photosynthé-
³⁴⁹ tiques ([Girard *et al.*, 2011](#)). On peut écrire la réaction de photosynthèse de la façon
³⁵⁰ suivante :



³⁵¹ Si la photosynthèse est le processus majeur d'assimilation du CO₂, il existe d'autres
³⁵² voies métaboliques permettant la capture du CO₂ de l'atmosphère. Par exemple les

353 micro-organismes chemolithotrophes (**expliquer**) sont capables d'assimiler le CO₂ en
 354 utilisant l'énergie issue de l'oxydation de composés inorganiques, ce que l'on appelle la
 355 chimiosynthèse, mais leur importance est moindre.

356 On définit la **Production Primaire Brute** (PPB), *Gross Primary Production*,
 357 (GPP) en anglais comme :

PRODUCTION PRIMAIRE BRUTE (PPB) :

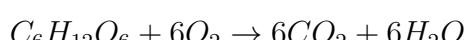
Quantité de carbone extraite de l'atmosphère et transformée en matières
 358 organiques par l'écosystème principalement via la photosynthèse. Ce flux
 est exprimé en quantité de carbone par unité de surface et de temps.

359 Les tourbières sont des écosystèmes dont la production primaire est estimée à envi-
 360 ron 500 gC m⁻² ([Francez, 2000](#)). La strate muscinale pouvant jouer/participer/produire
 361 jusqu'à 80 % de la production primaire ([Francez, 2000](#)). Cette production primaire n'est
 362 pas particulièrement élevée (**Réf needed**) et c'est en fait la faible décomposition des
 363 matières organiques qui permet aux tourbières de stocker du carbone.

364 Il n'y a pas de flux direct de CH₄ de l'atmosphère vers les écosystèmes terrestres.
 365 90 % du CH₄ présent dans l'atmosphère est extrait en réagissant avec des radicaux
 366 hydroxyles, cette réaction à lieu majoritairement dans la troposphère.

367 **De l'écosystème à l'atmosphère**

368 Les sources de carbone émises par les tourbières vers l'atmosphère sont multiples.
 369 D'abord différents gaz peuvent être émis, notamment le CO₂ et le CH₄, éventuellement
 370 du N₂O. Le processus majeur est la production de CO₂ par respiration qui au niveau
 371 cellulaire, peut être écrite sous la forme :



372 Mais certains de ces gaz peuvent être produit par différentes sources, ainsi le CO₂
 373 est produit par différents processus dont la respiration aérobie (le plus gros contribu-
 374 teur), les respirations anaérobies ou fermentations (e.g. du glucose, de l'acétate), ou

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

375 encore l'oxydation du méthane. Les principales sources d'émissions du CO₂ sont re-
376 présentées dans la figure 1.7. À l'échelle macroscopique là, ou plutôt, les respirations
377 sont généralement séparées en deux. D'un côté la respiration végétale, que ce soit celle
378 des feuilles, des tiges, des racines et que l'on appelle la **respiration autotrophe**⁸. De
379 l'autre rassemblé sous le vocable de **respiration hétérotrophe**⁹, la respiration de la
380 rhizosphère, liée à l'émission d'exsudats par les racines, la décomposition des litières
381 et des matières organiques, la respiration de la faune et l'oxydation du CH₄ par les
382 organismes méthanotrophes. L'ensemble de ces respirations est défini comme :

RESPIRATION DE L'ÉCOSYSTÈME (RE) :

Quantité de carbone émise sous forme de CO₂ par l'écosystème dans l'at-
383 mosphère. Elle englobe la respiration autotrophe et hétérotrophe en in-
cluant ses composantes aériennes et souterraines. Ce flux est exprimé en
quantité de carbone par unité de surface et de temps.

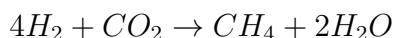
384 On distingue la respiration de l'écosystème de celle du sol en définissant la respiration
385 du sol (RS) comme l'ensemble des respirations de la colonne de sol, à l'exclusion de la
386 partie aérienne ([Luo et Zhou, 2006a](#)). Cependant, dans la littérature la respiration du
387 sol semble parfois être considérée comme équivalente à la respiration de l'écosystème,
388 ou du moins cette terminologie est parfois utilisée de façon synonyme à la respiration
389 de l'écosystème ([Raich et Schlesinger, 1992](#)). Les études discriminant RS et RE montrent
390 ainsi que dans des sols tourbeux RS compte pour plus de 60 % de RE [Lohila et al.](#)
391 ([2003](#)). La production de CO₂ est donc un signal multi-sources intégré sur l'ensemble
392 de la colonne de tourbe. Le transport du CO₂ produit se fait par diffusion suivant le
393 gradient de concentration, fort dans le sol et plus faible dans l'atmosphère. C'est cette
394 multitude de processus qui rend l'estimation de ce flux difficile, en effet chacune des
395 respirations n'aura pas la même sensibilité vis à vis de facteurs contrôlant.

396 Conséquence du niveau de nappe élevé des tourbières, le développement d'une zone
397 anoxique importante dans la colonne de sol favorise la production de CH₄. Il est pro-

8. Production de matières organiques à l'aide de composés minéraux simples.

9. Production de matières organiques à partir de substrats organiques.

398 duit par des Archaea méthanogènes, des organismes anaérobies vivants sous le ni-
 399 veau de la nappe. En moyenne les flux de CH₄ mesurés dans les tourbières s'étendent
 400 de 0 à plus de 0,96 µmol m⁻² s⁻¹, avec généralement des flux compris entre 0,0048 et
 401 0,077 µmol m⁻² s⁻¹ ([Blodau, 2002](#)). Le CH₄ est principalement produit à partir d'acé-
 402 tate (CH₃COOH) ou de dihydrogène (H₂), ces deux composés étant dérivés de la dé-
 403 composition préalable de matières organiques ([Lai, 2009](#)).



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



409 On définit le flux de CH₄ comme :

FLUX DE CH₄ (F_{CH₄}) :

410 Quantité de carbone émise sous forme de CH₄ par l'écosystème dans l'at-
 mosphère, suite au bilan des processus de création et de destruction de la
 molécule. Ce flux est exprimé en quantité de carbone par unité de surface
 et de temps.

411 Cette partie montre donc que si le flux de carbone de l'atmosphère à l'écosystème
 412 a pour source quasiment unique la réaction de photosynthèse des plantes, le flux de
 413 carbone de l'écosystème vers l'atmosphère est multi-source avec un nombre important
 414 de réactions de respirations et de fermentations. La variabilité du premier vient donc
 415 majoritairement de la composition des communautés végétales et de leurs sensibilités
 416 aux conditions environnementales. Celle du second est multiple, liée à la diversité des

réactions et communautés végétales ou animales impliquées, de leur sensibilité aux conditions environnementales.

1.2.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux

Dans cette partie seront décrits les facteurs qui contrôlent les flux de carbone en commençant à une échelle relativement fine pour atteindre celle de l'écosystème qui nous intéresse plus particulièrement. Cette échelle inclut la colonne de tourbe, le mésocosme, en tant que partie d'un ensemble plus vaste, en tant que sous-écosystème. Elle inclut forcément l'écosystème dans son sens général, regroupant les écosystèmes tourbeux mais également l'écosystème au sens plus spécifique de l'entité étudiée.

Les facteurs majeurs qui contrôlent ces flux de carbone sont globalement connus. Comme bon nombre de réactions biochimiques, les vitesses de réactions des processus décrits précédemment sont fonction de la température. Cette relation est connue depuis longtemps. Elle a été mise en évidence par un chimiste suédois en 1889, Svante August Arrhenius, sur la base de travaux réalisés par un autre chimiste, néerlandais, Jacobus Henricus Van't Hoff. Le niveau de la nappe, interface entre un monde oxique et un monde anoxique, et la teneur en eau du sol vont également jouer sur ces flux. Ainsi que la végétation que ce soit de façon directe comme siège de la photosynthèse, ou indirecte en fournissant des nutriments de son vivant à travers les exsudats racinaires, ou à sa mort en devenant litière.

La photosynthèse

À l'échelle d'espèces végétales, la quantité de carbone assimilable par la photosynthèse est fonction de la quantité de lumière reçue (Long et Hällgren, 1993). La quantité de carbone assimilée augmente d'abord de façon linéaire avec le rayonnement, avant d'être limitée par la régénération d'une enzyme, la Rubisco¹⁰, nécessaire à la fixation du CO₂ (Figure 1.8). Les limitations de l'assimilation, que ce soit la pente initiale de la partie linéaire, ou l'assimilation maximale, varient de façon importante en fonction

10. ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase



FIGURE 1.8 – todo, modifié d'après Long et Hällgren (1993)

443 de l'espèce considérée (Wullschleger, 1993). La régénération de la Rubisco, qui limite
 444 la photosynthèse, est contrainte par la capacité de transport des électrons. La vitesse
 445 de ce transport est fonction de la température et est traditionnellement décrite par
 446 une équation d'arrhenius modifiée, relativement complexe, ou par une équation sim-
 447 plifiée (Farquhar *et al.*, 1980; June *et al.*, 2004). À cette échelle le niveau de l'eau va
 448 également influer sur le développement de la végétation en facilitant plus ou moins
 449 leur accès à l'eau. Wagner et Titus (1984) montrent par exemple que deux espèces
 450 de sphaignes ont des tolérances différentes à la dessiccation : l'espèce vivant dans les
 451 gouilles est plus résistante que celle vivant sur les buttes. Dans des conditions expé-
 452 mentales différentes, lors de re-végétalisation de deux tourbières, Robroek *et al.* (2009)
 453 montre que différentes espèces de sphaignes vont se développer de façon optimale à
 454 différents niveaux de nappe selon leurs affinités. Cette variabilité entre espèces d'une
 455 même famille est elle-même mise en évidence par leur variabilité en terme de producti-
 456 vité primaire (Figure 1.9). Cette variabilité de la productivité primaire est également
 457 visible entre différentes communautés végétales. Les bryophytes n'ont pas la même
 458 productivité primaire que les graminées ou que les arbustes (Moore *et al.*, 2002 dans
 459 Rydin et Jeglum, 2013a). Toujours à cette échelle, le niveau de la nappe va également

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

460 contraindre la teneur en eau du sol et la hauteur de la frange capillaire. Cette der-
461 nière atteint généralement la surface tant que le niveau de la nappe ne descend pas
462 en dessous de 30 à 40 cm (Laiho, 2006). La hauteur du niveau d'eau va influer sur le
463 bien-être des différentes communautés végétales. Un niveau d'eau important risque de
464 diminuer l'accès de la végétation vasculaire à l'oxygène par leur racines et aux substrats
465 tandis qu'il sera propice au développement de sphaignes. À l'inverse un niveau d'eau
466 faible risque de faciliter le développement de certains végétaux vasculaires au détriment
467 des bryophytes (**Réf needed**). Cette compétition entre espèces va déterminer, à long
468 terme, l'évolution des communautés et donc jouer sur la PPB. Sur cet aspect Gornall
469 *et al.* (2011) montre que les effets des mousses sur les plantes vasculaires sont en partie
470 positifs et en partie négatifs et que leur «effet net» peu varier, notamment en fonction
471 de l'épaisseur de la strate muscinale. La composition des communautés végétales va
472 donc influer sur le potentiel photosynthétique de l'écosystème. Ce potentiel pouvant
473 varier selon le végétal considéré et les conditions environnementales dans lesquelles il
474 se trouve (Moore *et al.*, 2002).

475 À l'échelle de l'écosystème et sur le terrain ces facteurs – la température, la végéta-
476 tion, le niveau de l'eau – co-varient et rendent la discrimination de leurs effets respec-
477 tifs difficile. L'effet, sur la PPB, d'une variation de température peut selon l'échelle de
478 temps considérée, jouer sur le niveau de nappe et la végétation. Distinguer ces facteurs
479 n'est pas anodin, Munir *et al.* (2015) isolent également l'effet de la température en
480 utilisant des OTC (*Open Top Chamber*). Ces dispositifs ressemblent à des serres ou-
481 vertes et permettent de réchauffer une zone de la tourbière. Ils montrent que dans les
482 zones sans manipulation du niveau de la nappe, le réchauffement des OTC augmente
483 la PPB. Néanmoins la majorité des études réalisées sur le terrain montrent les effets de
484 variation de la température et du niveau de la nappe simultanément. Cai *et al.* (2010)
485 ont par exemple montré que des conditions plus chaudes et sèches pouvaient augmen-
486 ter la PPB. Cependant l'effet du niveau de la nappe peut varier selon le contexte :
487 Dans une étude des effets à long terme de variation du niveau de la nappe, Ballantyne
488 *et al.* (2014) montrent qu'une baisse du niveau de la nappe entraîne une augmentation



FIGURE 1.9 – Productivités moyennes des espèces de sphaignes en $\text{g m}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. Le nombre d'observation est indiqué par les nombres à l'intérieur des barres. Les espèces en orange sont celles rencontrées sur le site d'étude. Modifié d'après [Gunnarsson \(2005\)](#)

489 de la PPB en facilitant l'accès des plantes vasculaires à l'oxygène et aux nutriments.
 490 Paradoxalement, la hausse d'un niveau de nappe, initialement bas et entraînant un
 491 stress hydrique important, conduira également à une augmentation de la PPB ([Strack](#)
 492 [et Zuback, 2013](#)). Pour un gradient de niveau de nappe qui augmente dans une tour-
 493 bière de haut-marais, [Weltzin *et al.* \(2000\)](#) montrent une diminution de la productivité
 494 des arbustes, tandis que celle des graminées n'est pas affectée. À l'inverse, pour un
 495 gradient similaire dans une tourbière de bas-marais, la productivité des arbustes n'est
 496 pas affectée tandis que celle des graminées augmente. Une opposition similaire est éga-
 497 lement relevée concernant les graminées soumises à un traitement infra-rouge afin de
 498 les réchauffer. Ces dernières voient leur productivité diminuer dans la tourbière de
 499 haut-marais et augmenter dans la tourbière de bas-marais. Les effets du niveau de
 500 la nappe peuvent donc être variables selon les communautés végétales et le contexte
 501 (l'écosystème, le niveau initial) dans lequel elles se trouvent.

502 **La RE**

503 La respiration, au sens de la réaction biochimique telle que décrite par l'équa-
504 tion 1.2.2 est catalysée par la température. Cette réaction est limitée par la quantité
505 de substrat et la présence d'oxygène. Dans les tourbières la limitation en substrat n'a
506 de sens que vis-à-vis de communautés spécifiques. Les substrats facilement utilisables,
507 typiquement les sucres peuvent devenir limitant (**Réf needed**). La tourbière n'est
508 qu'un tas de substrat de plus en plus difficile à dégrader avec la profondeur, plus les
509 substrats sont facilement utilisables plus leur utilisation est rapide est plus ils risquent
510 de devenir limitant. Inversement moins les substrats sont dégradables plus leur utili-
511 sation est lente et plus ils s'accumulent. Mais l'accès à l'oxygène rendu difficile par les
512 hauteurs élevées du niveau de la nappe est prépondérant (**Réf needed**). La qualité du
513 substrat (la facilité qu'il aura à être dégradé) va donc jouer sur la vitesse de respiration.
514 Par ailleurs la photosynthèse en libérant des substrat, les exsudats racinaires, influe
515 également sur la respiration.

516 À l'échelle de l'écosystème de nombreuses études ont mis en évidence une corré-
517 lation positive entre la respiration et la température ([Singh et Gupta, 1977](#); [Raich et](#)
[Schlesinger, 1992](#); [Luo et Zhou, 2006b](#)). Cependant la diversité cumulée des processus,
519 communautés et des conditions environnementales qui jouent sur la respiration, font
520 qu'aucune équation ne fait réellement consensus. Malgré tout, la majorité d'entre-elles
521 décrivent une augmentation exponentielle de la respiration avec la température. Ainsi
522 dans les tourbières, des études *in-situ* ont montré que dans des conditions plus chaudes,
523 mais également plus sèches étant donné que ces deux conditions sont difficilement sépa-
524 rables sur le terrain, la RE a tendance à augmenter ([Aurela et al., 2007](#); [Cai et al., 2010](#);
525 [Ward et al., 2013](#)). Des études à base de mésocosmes¹¹ prélevés sur le terrain ont égale-
526 ment montré la relation entre les variation de RE et celle de la température([Updegraff](#)
527 *et al.*, 2001; [Weedon et al., 2013](#)).

528 Le niveau de nappe, conditionnant l'accès à l'oxygène, joue également un rôle im-
529 portant. Un niveau qui diminue se traduit généralement par une hausse de la RE que

11. définition méso

ce soit à long terme (Strack *et al.*, 2006; Ballantyne *et al.*, 2014) ou à plus court terme (Aerts et Ludwig, 1997).

De façon plus indirecte, le type de végétation joue sur la vitesse de décomposition des litières (Hobbie, 1996; Liu *et al.*, 2000). La végétation peut également stimuler la respiration des micro-organismes présent dans la rhizosphère¹² via la libération d'extra-sudats racinaires (Moore *et al.*, 2002).

l'ENE

À l'échelle de l'écosystème et selon les méthodes employées le CO₂ est parfois étudié comme un seul flux, généralement appelé l'échange net de l'écosystème.

L'ÉCHANGE NET DE L'ÉCOSYSTÈME (ENE) :

Bilan de la quantité de CO₂ émise par l'écosystème, calculée comme différence entre la Photosynthèse Primaire Brute et la Respiration de l'écosystème (ENE=PPB-RE). Ce flux est exprimé en quantité de carbone par unité de surface et de temps.

Ce terme correspond, au référentiel près, au *Net Ecosystem Exchange* anglais, qui prend l'atmosphère comme référence¹³ (ENE=-NEE) (Chapin *et al.*, 2006).

Les facteurs contrôlant l'ENE sont donc les mêmes que ceux qui contrôlent la PPB et la RE. Cependant l'effet d'un même facteur de contrôle peut être différent vis à vis de PPB et de RE selon le contexte environnemental, que ce soit par rapport à la nature de l'effet ou son importance. Ainsi une variation de l'ENE peut parfois être contrôlée majoritairement soit par la PPB, soit par la RE, soit par les deux. Par exemple, une baisse du niveau de la nappe est souvent liée dans la littérature à une baisse de l'ENE. Cependant certains attribuent cette baisse de l'ENE à une augmentation de la Respiration (Alm *et al.*, 1999; Ise *et al.*, 2008) quand d'autres l'attribuent à une diminution de la photosynthèse (Sonnenstag *et al.*, 2010; Peichl *et al.*, 2014). Enfin certain observent

12. zone du sol impactée par les racines

13. Attention cependant, certains auteurs changent cette convention

551 un effet à la fois de l'augmentation de la respiration et de la diminution de la pho-
552 tosynthèse (Strack et Zuback, 2013). Lund *et al.* (2012) montrent également que sur
553 un même site une baisse du niveau de la nappe deux années différentes entraînera une
554 baisse de l'ENE dans les deux cas, mais que dans l'un des cas cette baisse est contrôlée
555 par une augmentation de la respiration et que dans l'autre elle est contrôlée par une di-
556 minution de la photosynthèse. Enfin de façon un peu plus isolée Ballantyne *et al.* (2014)
557 ne notent pas d'effet d'une baisse du niveau de la nappe sur l'ENE car l'augmentation
558 de la respiration est compensée par une augmentation de la photosynthèse. La réponse
559 du CO₂ vis-à-vis d'une variation du niveau de la nappe n'est donc pas triviale.

560 Le CH₄

561 La production du CH₄, par des *Archaea* méthanogènes principalement à partir de
562 dihydrogène et d'acétate, est contrôlée par la **disponibilité** de ces **substrats** (Segers,
563 1998). L'ajout de substrats à destination des méthanogènes (acétate, glucose, étha-
564 nol) tend à augmenter les émissions de CH₄ (Coles et Yavitt, 2002). Le **niveau de la**
565 **nappe** est un autre facteur contrôlant les flux de CH₄. Généralement plus le niveau
566 est important plus la zone potentielle de production du CH₄ est importante et plus les
567 émissions sont fortes (Pelletier *et al.*, 2007). Par contre une augmentation du niveau
568 de la nappe au dessus de la surface peut conduire à une diminution des émissions de
569 CH₄ (Bubier, 1995). Pelletier *et al.* (2007) montrent également que les flux sont plus
570 importants lorsque le CH₄ est mesuré dans des zones avec **végétation**, et plus particu-
571 lièrement des carex. Ce lien avec la végétation est la conséquence d'une adaptation de
572 certaines espèces aux conditions de saturations en eau qui peuvent faciliter l'échange
573 de gaz entre l'atmosphère et l'écosystème grâce à un espace intercellulaire agrandi,
574 l'Aerenchyme (Rydin et Jeglum, 2013c). Enfin la **température** joue généralement un
575 rôle important, augmentant la vitesse de production. La sensibilité à la température de
576 la production de CH₄ varie selon le processus considéré et la communauté de métha-
577 nogènes associés (Segers, 1998). La température peut également faciliter le transport
578 du CH₄ par ébullition ou via la végétation (Lai, 2009).

579 Pour résumer, à l'échelle de l'écosystème un même facteur peut influer sur différents
580 flux mais un facteur peut également influer sur un flux de différentes façons. Parmi ces
581 facteurs, l'effet du niveau de la nappe sur les flux de CO₂ et de CH₄ reste difficile à
582 prédire. Il contrôle la proportion des zones oxiques et anoxiques de la colonne de sol et
583 donc la proportion de CO₂ et de CH₄ produit. Il influe également sur la végétation, que
584 ce soit à court terme (stress hydrique), ou à long terme (changement de communautés
585 végétales). Le niveau de la nappe, s'il monte, peut par exemple augmenter ou diminuer
586 la PPB, selon sa hauteur de départ et la végétation présente sur le site. Pour un même
587 niveau moyen, il semble également que plus la variation du niveau est importante plus
588 les flux seront fort (lesquels (**Réf needed**)). Des effets de chasse ont également été
589 observés après simulation d'événements pluvieux. La question du niveau de la nappe
590 est donc primordiale et sera explorée dans le chapitre 4.

591 1.2.4 Bilans de C à l'échelle de l'écosystème

592 Si l'étude d'un facteur spécifique, comme l'hydrologie, est nécessaire afin de mieux
593 comprendre son fonctionnement spécifique, l'étude d'un écosystème dans son ensemble
594 l'est tout autant si l'on souhaite intégrer toute sa complexité naturelle. Le fonctionne-
595 ment naturel d'une tourbière active tend à piéger du CO₂ atmosphérique dans l'éco-
596 système, dans la tourbe. Ce fonctionnement vient de ce que les entrées de carbone, la
597 PPB, sont plus importantes que les sorties, CO₂, CH₄. Ce déséquilibre entre les flux de
598 carbone, ce bilan, s'il est positif indique que l'écosystème fonctionne comme un puits
599 de carbone, tandis que s'il est négatif il fonctionne comme une source.

600 Par convention, dans ce document les flux (RE, PPB et F_{CH₄}) sont exprimés en
601 valeur absolue afin de faciliter l'étude de leurs variations. Les bilans seront établis
602 en prenant l'écosystème comme référence, le carbone entrant dans l'écosystème est
603 compté positivement et le carbone sortant négativement. Les flux RE et F_{CH₄} seront
604 donc comptés négativement et la PPB positivement. Par la suite l'abréviation PPB et
605 le mot photosynthèse seront employés de façon inter-changeable de même que RE et
606 respiration et se rapportera à ces flux tels que définis dans les encadrés précédents, sauf

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

607 mention contraire.

608 L'étude de ce bilan dans les tourbières est généralement faite soit en étudiant l'ar-
609 chive tourbeuse, pour un bilan à long terme des années passées, soit par l'étude contem-
610 poraine des flux.

611 **Approche archive et temps long**

612 L'approche permettant de calculer le bilan de carbone passé d'une tourbière à
613 l'aide de son archive tourbeuse consiste à estimer des vitesses d'accumulation de la
614 tourbe en datant des colonnes de tourbe et en mesurant la quantité de carbone qu'elles
615 contiennent. Cette méthode permet d'étudier la fonction puits sur des temps longs (der-
616 niers millénaires) et de lier d'éventuels changements dans les vitesses d'accumulation à
617 des facteurs environnementaux. Elle est souvent décrite à l'aide de l'acronyme anglais
618 LORCA, pour vitesse apparente d'accumulation du carbone à long terme (*LOng-term*
619 *apparent Rate of Carbon Accumulation*). Cette approche conduit généralement à des
620 vitesses d'accumulation comprises entre 10 et 30 gC m⁻² an⁻¹ (Figure 1.10). Ces va-
621 leurs, exprimées dans la même unité que les bilans de carbone contemporains, doivent
622 être comparées avec précaution avec ces derniers. En effet elles comprennent, à l'in-
623 verse des bilans contemporains, des milliers d'années de décomposition du carbone en
624 profondeur, et ont donc des vitesses d'accumulation sous-estimées relativement à ces
625 bilans (Yu *et al.*, 2009). Selon l'échelle temporelle considérée, peut-être serait-il plus
626 judicieux de dire que les bilans contemporains sont sur-estimés.

627 **Bilans de carbone contemporains**

628 La seconde approche pour estimer le bilan de carbone d'écosystèmes est d'en esti-
629 mer les flux actuels de carbone entrant et sortant. Les flux principaux dans le bilan de
630 carbone d'une tourbière ont d'ors et déjà été décrits. Il s'agit de la PPB, de la RE et du
631 flux de CH₄. Cependant d'autres flux existent, notamment le flux de carbone organique
632 dissout (COD), de carbone organique particulaire (COP), de carbone inorganique dis-
633 sout (CID), de Composés Organiques Volatiles (COV), et de monoxyde de carbone



FIGURE 1.10 – Vitesse apparente d’accumulation du carbone à long terme durant l’Holocène. Les chiffres entre parenthèses représentent le nombre de mesures. Modifié d’après Yu *et al.* (2009)

634 (CO) ([Chapin *et al.*, 2006](#)). Ils seront considérés comme négligeables, à l’exception du
 635 COD. On définit donc le Bilan de Carbone Net de l’Écosystème comme :

$$BCNE = \frac{dC}{dt} = \overbrace{PPB - RE}^{ENE} - F_{CH_4} - F_{COD} \quad (1.1)$$

636 Avec :

- 637 — ENE : Échange Net de l’Écosystème
- 638 — PPB : Production Primaire Brute
- 639 — RE : Respiration de l’Écosystème
- 640 — F_{CH_4} : Flux de Méthane
- 641 — F_{COD} : Flux de Carbone Organique Dissout

642 Dans les tourbières, les flux de CO_2 sont généralement les plus importants puis les
 643 flux de CH_4 et/ou de COD et enfin les flux de COP ([Worrall *et al.*, 2009; Koehler
 644 *et al.*, 2011](#)). Majoritairement réalisés dans des tourbières de haut-marais, les bilans
 645 de carbone présents dans la littérature montrent généralement des écosystèmes dont
 646 le bilan de carbone est compris entre 100 et $-100\text{ gC m}^{-2}\text{ an}^{-1}$ (Figure 1.11). Si le
 647 stockage de carbone ($NECB > 0$) ne dépasse que peu de ces valeurs, le déstockage
 648 ($NECB < 0$) peut être beaucoup plus important avec des émissions de carbone de
 649 plus de $500\text{ gC m}^{-2}\text{ an}^{-1}$. Peu de bilans de carbone ont été faits dans les tourbières en
 650 dessous de 50° de latitude (le nord de la France approximativement). Le comportement



FIGURE 1.11 – Bilan de C dans différentes tourbières (en $\text{gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$), en fonction de la température moyenne annuelle dans la littérature. Les couleurs montrent quels flux sont pris en compte dans le bilan, la ligne de tirets sépare les écosystèmes stockant du carbone (au dessus) de ceux libérant du carbone (en dessous).

651 de ces tourbières les plus au sud reste peu connu par rapport à celles situées à des
652 latitudes plus hautes (en Europe) ou dans des climats plus froids (au Canada).

653 1.2.5 Méthodologies, mesures et estimation des flux

654 Mesure des flux de gaz

655 Différentes techniques existent pour estimer les flux de gaz nécessaires pour le calcul
656 de ces bilans. Les méthodes les plus utilisées sont les techniques de chambres et les
657 techniques micro-météorologiques.

658 De façon générale les méthodes de chambre consistent à placer une enceinte, que
659 l'on appelle chambre, sur une zone de l'écosystème dont où souhaite mesurer les flux.
660 Ces chambres peuvent être ouvertes, c'est à dire que la mesure se fait lorsque le gaz
661 à l'intérieur de la chambre est à l'équilibre avec celui à l'extérieur, ou fermées, dans
662 ce cas le gaz à l'intérieur de la chambre n'est pas à l'équilibre avec celui à l'extérieur.
663 Elles peuvent également être dynamiques, lorsqu'un système de pompe, permettant
664 notamment de transporter le gaz jusqu'à l'analyseur, est présent. Ou statique si le
665 système est sans flux artificiel. Trois grandes techniques de chambre existent. D'abord

666 les chambres **dynamiques ouvertes** qui se basent sur un état d'équilibre et mesurent
667 une différence de concentration d'un gaz dont une partie passe par la chambre et l'autre
668 non. Cette méthode nécessite un système de pompe et donc le passage d'un flux. Ensuite
669 les chambres **dynamiques fermées** qui mesurent l'évolution de la concentration du
670 gaz au sein de la chambre à l'aide d'un système de pompe permettant l'envoi du
671 gaz dans un analyseur externe. Enfin les chambres **statiques fermées** qui mesurent
672 également l'évolution de la concentration du gaz au sein de la chambre sans qu'un
673 système de pompe ne soit présent. Dans ce cas soit l'analyseur est présent dans la
674 chambre, soit des prélèvements sont faits à intervalles réguliers puis analysés par la
675 suite en chromatographie gazeuse.

676 Il faut noter que les dénominations anglaises de ces méthodes doivent faire l'objet
677 d'une attention particulière. *Closed chamber* par exemple est parfois utilisé pour se
678 référer à l'état ou non d'équilibre, comme défini dans ce document, mais parfois égale-
679 ment pour désigner les méthodes de chambre sans système de flux ce qui peut prêter
680 à confusion (Pumpunen *et al.*, 2004). Souvent utilisées, les dénominations *open/closed*
681 et *dynamic/static* sont décrites dans (Luo et Zhou, 2006c), une autre convention peut
682 être rencontrée : *flow-through/non-flow-through* et *steady state/non-steady state* (Li-
683 vingston et Hutchinson, 1995).

684 Ces différentes méthodes ont divers avantages et inconvénients : les systèmes sans
685 circulation d'air sont généralement plus facile à transporter et à utiliser sur le ter-
686 rain. L'ensemble des méthodes de chambres fermées ont, par principe, une variation
687 des concentrations en gaz qui, si elle est très importante, peut perturber le gradient
688 de diffusion du gaz. Malgré tout ces méthodes sont souvent utilisées car elles ont
689 un coût modeste, et sont très versatiles ce qui permet leur utilisation dans de nom-
690 breuses situations. D'autres méthodes plus globales existent comme les méthodes micro-
691 météorologiques, basées sur l'étude des flux turbulents en analysant à haute fréquence
692 la vitesse et la direction du vent. Ces méthodes sont souvent appelées *Eddy Cova-*
693 *riance* ou *Eddy Correlation*. Elles sont beaucoup plus onéreuses et lourdes à mettre en
694 place mais permettent une acquisition haute fréquence des flux de gaz. Ces méthodes

1.3. Objectifs du travail

695 sont complémentaires des mesures de chambre, en effet les mesures faite par *Eddy Co-*
696 *variance* se font sur une zone plus grande que celles mesurées à l'aide de chambres.
697 La variabilité spatiale est donc intégrée dans la mesure, ce qui peut être un avantage
698 comme un inconvénient. La grande majorité des bilans pluriannuels sont faits à l'aide
699 cette méthode.

700 Estimation des flux

701 Quand ils ne peuvent pas être mesurés avec une haute fréquence, que ce soit à
702 l'aide de tour Eddy-covariance ou de chambres automatiques, les flux sont estimés à
703 partir de mesures ponctuelles. La respiration est généralement estimée en utilisant la
704 température que se soit celle de l'air (Bortoluzzi *et al.*, 2006) ou celle du sol à différentes
705 profondeurs : -5 cm (Görres *et al.*, 2014; Ballantyne *et al.*, 2014), -10 cm Kim et Verma
706 (1992); Zhu *et al.* (2015). Différentes équations reliant la respiration à la température
707 sont utilisées (Fang et Moncrieff, 2001). Le niveau de la nappe est parfois pris en compte
708 (Strack et Zuback, 2013; Munir *et al.*, 2015), plus rarement la végétation (Bortoluzzi
709 *et al.*, 2006; Karki *et al.*, 2015).

710 L'estimation de la PPB est indirecte car très difficile à mesurer de façon directe
711 à l'échelle d'un écosystème. Elle est donc déduite à partir d'autres mesures : Celles
712 de l'ENE pour les méthodes micro-météorologiques qui utilisent l'ENE mesurée la nuit
713 pour estimer la RE et en déduire la PPB. Celles de l'ENE et de la RE pour les méthodes
714 de chambre qui le permettent, ce qui permet là encore de déduire l'ENE.

715 Il existe donc une variabilité importante dans les équations utilisées, dans la nature
716 et le nombre des facteurs pris en compte ainsi que dans la manière dont ils sont pris
717 en compte.

⁷¹⁸ 1.3 Objectifs du travail

⁷¹⁹ Dans ce contexte les objectifs de ce travail sont donc (i) de caractériser la varia-
⁷²⁰ bilité spatio-temporelle des flux et d'établir le bilan de carbone de la tourbière de La
⁷²¹ Guette, (ii) de préciser l'effet du niveau de la nappe sur les émissions lors de cycles
⁷²² de dessiccations réhumectations. Pour ce faire une approche axée sur l'observation et
⁷²³ l'expérimentation a été mise en oeuvre :

- ⁷²⁴ — Dans un premier temps, a été mis en place un suivi sur la tourbière de La
⁷²⁵ Guette permettant d'évaluer les flux et d'étudier leurs variations saisonnières et
⁷²⁶ spatiales sur l'ensemble de l'écosystème. Ces estimations de flux ont ensuite pu
⁷²⁷ être utilisées afin d'estimer le bilan de carbone de la tourbière.
- ⁷²⁸ — Dans un second temps, à travers des expérimentations en mésocosmes et sur le
⁷²⁹ terrain, l'effet du niveau de la nappe sur les flux de GES a été exploré, particu-
⁷³⁰ lièrement lors de cycles de dessiccation-réhumectations.
- ⁷³¹ — Enfin un suivi des flux à haute fréquence sur plusieurs tourbières a été réalisé
⁷³² afin de déterminer les éventuelles différences de sensibilité des émissions de CO₂
⁷³³ entre le jour et la nuit et de tester à cette échelle une méthode d'estimation de
⁷³⁴ la RE basée sur la synchronisation entre les signaux de flux et de température.

735 CHAPITRE 2 _____

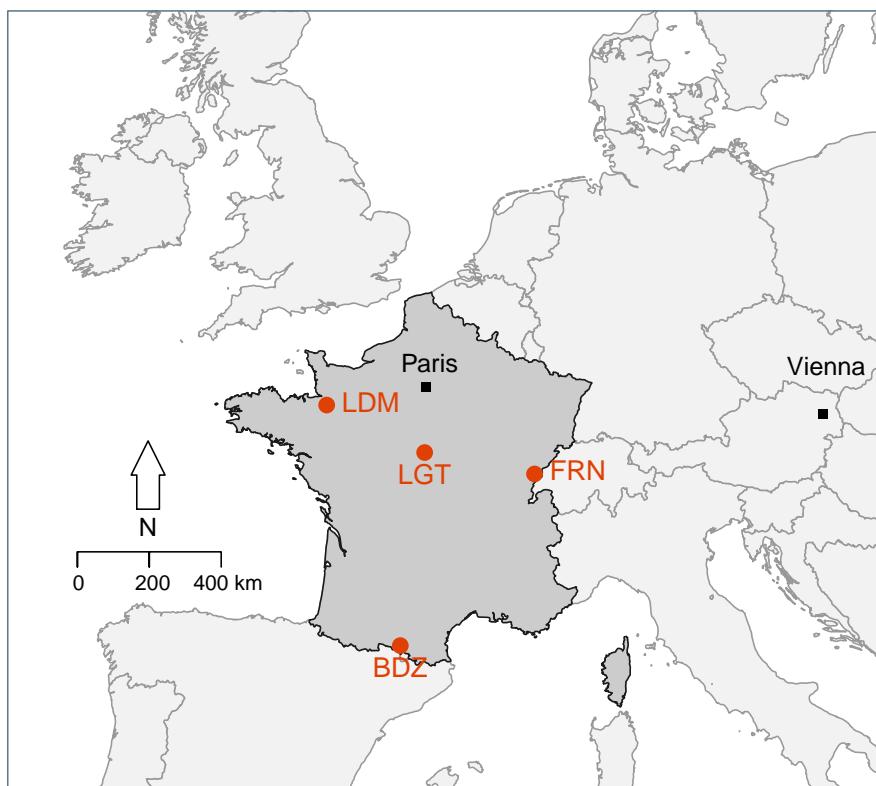
736 SITES D'ÉTUDES ET MÉTHODOLOGIES EMPLOYÉES

737

| | |
|---|----|
| 738 2.1 Présentation de la tourbière de La Guette | 42 |
| 739 2.2 Autres sites du service national d'observation | 47 |
| 740 2.3 Mesures de flux de gaz | 48 |
| 741 2.3.1 Les mesures de CO ₂ | 48 |
| 742 2.3.2 Les mesures de CH ₄ | 50 |
| 743 2.3.3 Le calcul des flux | 52 |
| 744 2.4 Facteurs contrôlants | 52 |
| 745 2.4.1 acquisitions automatisées | 52 |
| 746 2.4.2 acquisitions manuelles | 53 |
| 747 | |
| 748 | |
| 749 | |

750 2.1 Présentation de la tourbière de La Guette

751 Le site d'étude, la tourbière de La Guette, est l'un des quatre sites du service
752 national d'observation des tourbières (SNOT) qui vise à étudier la fonction puits de
753 carbone des tourbières tempérées notamment vis-à-vis des changements globaux (<http://www.sno-tourbières.cnrs.fr/>).
754



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

FIGURE 2.1 – Site d'études SNOT

755 La tourbière de La Guette est située à Neuvy-sur-Barangeon, en Sologne (N 47°19'44'',
756 E 2°17'04''), dans le département du Cher (Figure 2.1). Le site est classé espace natu-
757 rel sensible par le conseil départemental du Cher, c'est également une Zone Naturelle
758 d'Intérêt Écologique Faunistique et Floristique (ZNIEFF) et il est intégré au site Na-
759 tura 2000 « Sologne ». Le site s'étend sur une surface d'une vingtaine d'hectares avec
760 une géométrie relativement allongée (Figure 2.2). Cette surface la classe parmi les plus
761 grandes de Sologne (F. Laggoun, communication personnelle). L'épaisseur moyenne de

762 la tourbe est de 80 cm avec des maximums locaux atteignant 180 cm. La tourbière de
763 La Guette est probablement topogène, formée par l'accumulation d'eau de pluie dans
764 une cuvette imperméabilisée par une couche d'argile issue d'alluvions de la rivière du
765 même nom (La Guette) (**Réf needed**). Les précipitations annuelles moyennes sur le
766 site sont de 880 mm et la température moyenne annuelle de 11 °C. L'eau du site a une
767 conductivité généralement inférieure à $80 \mu\text{S m}^{-2}$ et un pH compris entre 4 et 5. Ces
768 caractéristiques classent la tourbière parmi les tourbières minérotropes pauvres en
769 nutriments (*poor fen*). Les datations effectuées sur le site permettent de dire que les
770 premiers dépôts tourbeux remontent à environ 5 à 6000 ans.

771 Le site a subi un certain nombre de perturbations au cours de son existence. D'abord
772 la construction avant 1945 d'une route, la D 926, qui coupe l'extrémité sud de la
773 tourbière favorisant son drainage. Le site a également subi un incendie en 1976. En
774 1979 des pins noirs (*Pinus nigra*) sont plantés au nord du site. Enfin en 2008 le récurage
775 du fossé de drainage bordant la route semble entraîner une augmentation significative
776 des pertes d'eau du système.

777 Ces perturbations, ou au moins une partie d'entre elles, ont probablement favorisé
778 l'envahissement du site par une végétation vasculaire, notamment arborée et compo-
779 sée de pins (*Pinus sylvestris*) et de bouleaux (*Betula verrucosa* et *pubescens*). **Viel**
780 *et al.* (2015) ont pu calculer, grâce à l'étude de photos aériennes, la vitesse de ferme-
781 ture du site entre 1945 et 2010, estimée à $2020 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$ avant l'incendie de 1976 et
782 à $3469 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$ après. La tourbière est également envahie de façon importante par la
783 molinie bleue (*Molinia caerulea*) de la famille des *Poaceae* (Figure 2.3c), leur présence
784 favorisant la dégradation des matières organiques (?). Sont également présentes sur le
785 site un certain nombre d'espèces caractéristiques des tourbières comme les sphaignes,
786 principalement *Sphagnum cuspidatum* et *Sphagnum rubellum*, qui forment des tapis.
787 Un tapis de sphaignes en cours de formation est visible sur la photo 2.3a. Sur cette
788 même photo sont également visible des Linaigrettes à feuilles étroites (*Eriophorum*
789 *augustifolium*), une plante de la famille des *Cyperaceae* caractéristique des marais et
790 des landes tourbeuses (Rameau *et al.*, 2008). Des bruyères sont également présentes de

2.1. Présentation de la tourbière de La Guette

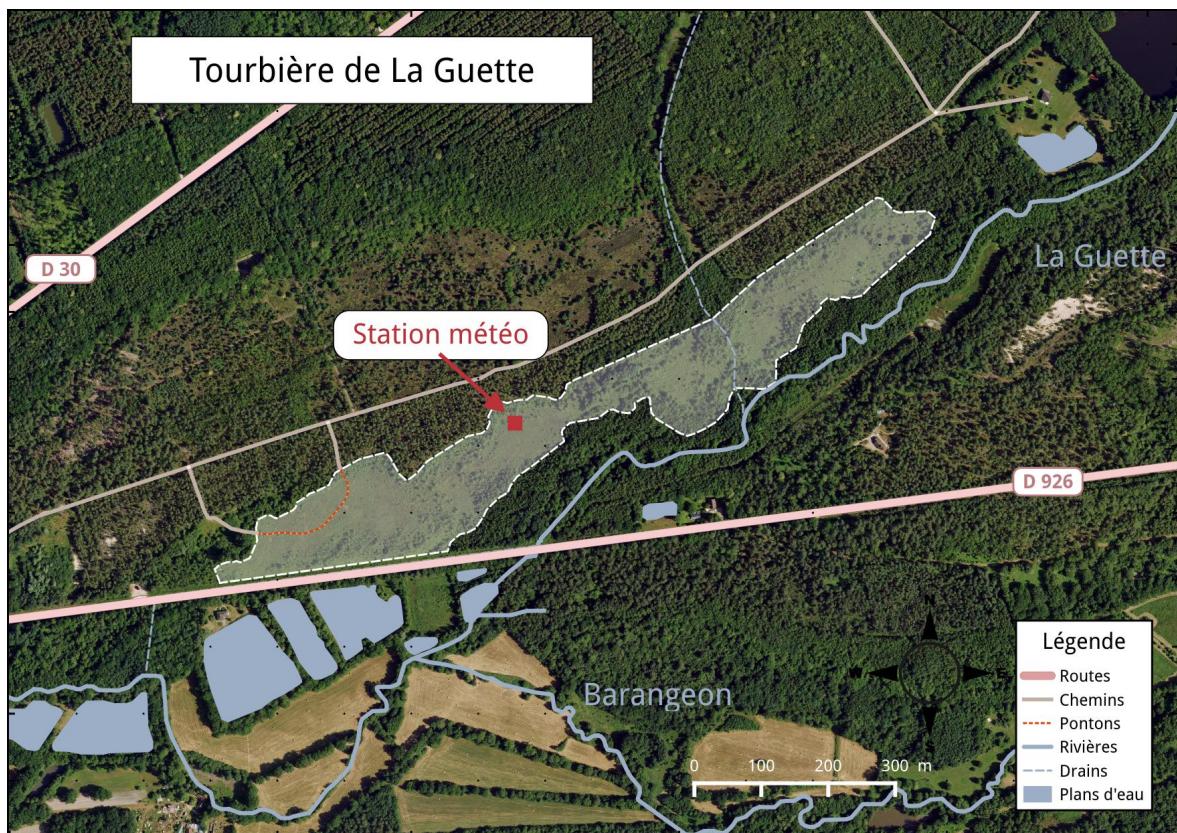


FIGURE 2.2 – Carte de la tourbière de La Guette

791 façon importante sur le site avec notamment *Erica tetralix*, parfois appelée la Bruyère
792 des marais, de la famille des *Ericaceae* (Figure 2.3b). De la même famille est présente
793 sur le site, mais de façon moins omniprésente, la Callune (*Calluna vulgaris*). L'en-
794 semble de ces espèces tendent à préférer les milieux riches en matières organiques et
795 pauvres en nutriment (Rameau *et al.*, 2008). D'autres espèces sont présentes sur ce site,
796 notamment *Rhynchospora alba* de la famille des *Cyperaceae*, *Juncus bulbosus* (image
797 annexe ?) de la famille de *Juncaceae*, et des Droséras, une plante insectivore de la
798 famille des *Droseraceae* (Annexe A, Figure 7a) .

799 Au cours des dernières années, les précipitations sont relativement différentes avec
800 deux années plus sèches que la moyenne avant 2013 et deux années plus humides en
801 2013 et 2014 (Figure 2.4). On observe également cette dualité vis-à-vis du niveau de
802 la nappe. Avant 2013 les étés sont marqués par des étiages importants avec des baisses
803 du niveau de nappe allant jusqu'à -60 cm en 2012 (Figure 2.5). Après 2013, les étiages
804 sont beaucoup moins importants sur le site (Figure 2.6). Les variations inter-annuelles



(a) *Sphagnum – Eriophorum angustifolium*



(b) *Erica tetralix – Molinia caerulea*



(c) *Molinia caerulea*

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

2.1. Présentation de la tourbière de La Guette

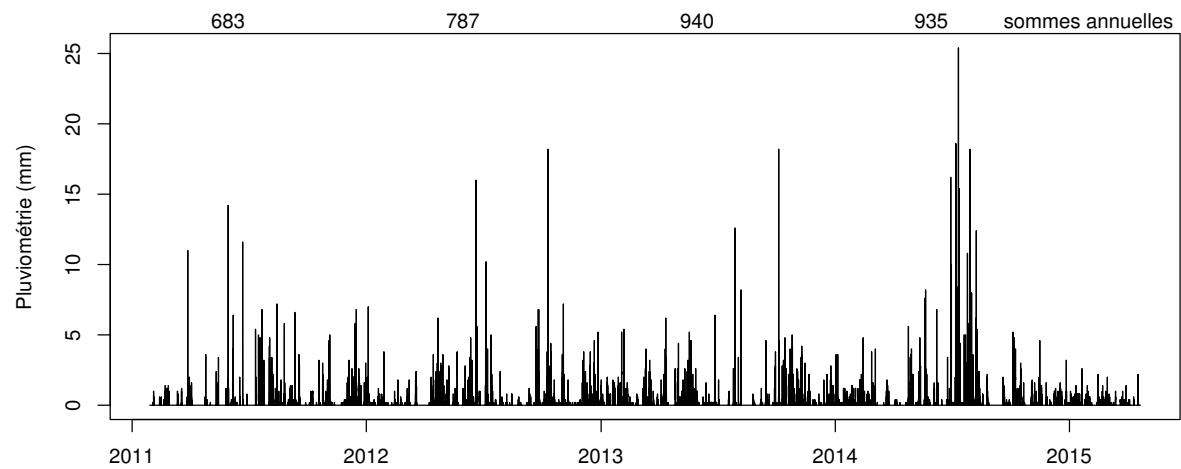


FIGURE 2.4 – Évolution du niveau de la pluviométrie, en mm, des années 2011 à 2014

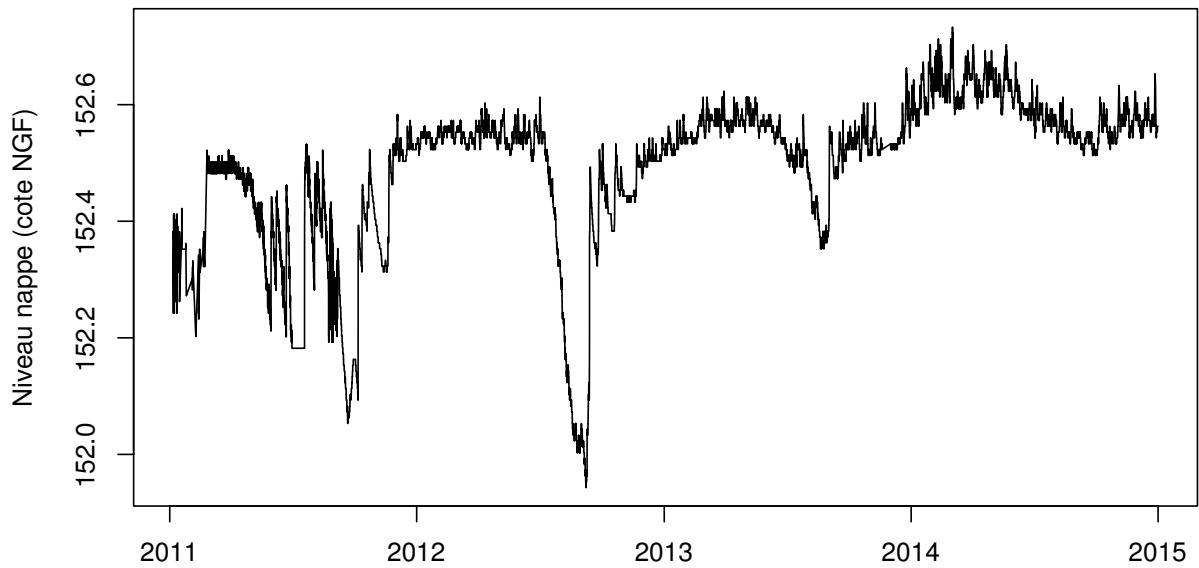


FIGURE 2.5 – Évolution du niveau de la nappe, en cm par rapport à la surface, des années 2011 à 2014

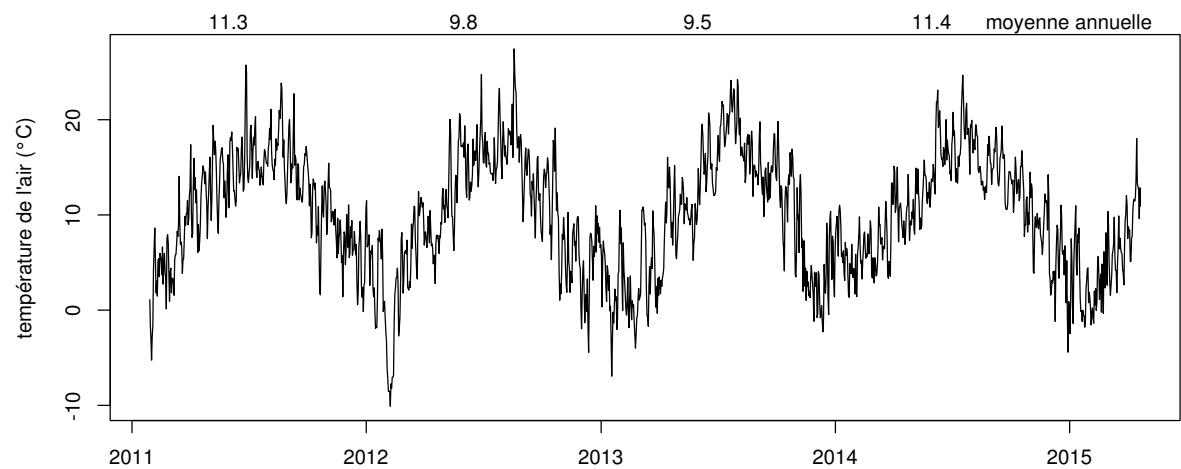


FIGURE 2.6 – Évolution de la température de l'air (en °C) des années 2011 à 2014

805 de la température moyenne de l'air semblent moins marquées. L'année 2011 est très
806 proche de 2014 avec une température moyenne supérieure à 11 °C. De la même façon
807 les années 2012 et 2013 sont très proches avec des températures moyennes inférieures
808 à 10 °C.

809 **2.2 Autres sites du service national d'obser-**
810 **vation**

811 Bien que moins étudiés, les autres sites du SNOT, Bernadouze, Frasne et Landema-
812 rais ont également fait l'objet d'un suivi ponctuel en 2013. La tourbière de Bernadouze
813 est située à 1400 m d'altitude dans les Pyrénées, en Ariège (N 42°48'09", E 1°25'24").
814 Elle est relativement petite avec 3,75 ha seulement. La tourbière de Frasne est située à
815 840 m dans le Doubs et s'étend sur une surface de 98 ha. Enfin la tourbière de Landema-
816 rais est située en Ille-et-villaine, à 154 m et s'étend sur 23 ha. les températures annuelles
817 moyennes sur ces trois sites sont respectivement de 6, 7,5 et 11 °C. les précipitations
818 annuelles étant de 1700, 1400 et 870 mm.

819 Au sein du SNOT et à travers les différentes expérimentations et observations réali-
820 sées sur les sites, de nombreuses mesures ont été effectuées : des mesures de CO₂ et de
821 CH₄ ainsi que d'un certain nombre de facteurs contrôlant. Les méthodologies utilisées
822 de façon transverse aux différentes expérimentations sont décrites ci-après, celles plus
823 spécifiques le seront dans le chapitre qui les concerne.

⁸²⁴ 2.3 Mesures de flux de gaz

⁸²⁵ 2.3.1 Les mesures de CO₂

⁸²⁶ Toutes les mesures de flux de CO₂ présentées par la suite ont été faites avec les
⁸²⁷ mêmes matériels et le même protocole. Les chambres utilisées sont en Plexiglas® et
⁸²⁸ ont été conçue (LPC2E) et fabriquées (ISTO) au CNRS. Ce sont des chambres trans-
⁸²⁹ parentes, cylindriques, de 30 cm de diamètre pour 30 cm de hauteur. Les mesures de
⁸³⁰ concentration en CO₂ à proprement parler ont été faites à l'aide d'une sonde Vaisala
⁸³¹ CARBOCAP® GMP 343. La sonde est directement insérée dans la chambre ainsi
⁸³² qu'une sonde Vaisala HUMICAP® HMP 75 mesurant l'humidité et la température
⁸³³ dans la chambre (Figures 2.7, photographies).

⁸³⁴ Avant toute mesure, des embases sont installées sur le site. Ce sont des cylindres
⁸³⁵ de PVC d'une hauteur de 15 cm pour 30 cm de diamètre, insérés dans le sol sur 8 à
⁸³⁶ 10 cm de profondeur. La partie basale et enterrée de ces cylindres a été préalablement
⁸³⁷ percée d'une quarantaine de trous (1 cm de diamètre) afin de minimiser les impacts de
⁸³⁸ l'embase sur le développement racinaire et permettre les écoulements d'eau.

⁸³⁹ La méthode mise en œuvre est celle de la chambre statique fermée, aucun système
⁸⁴⁰ de pompe n'est donc utilisé. Ceci permet d'avoir un système de mesure relativement
⁸⁴¹ léger, facilement transportable et permettant une mise en œuvre sur l'ensemble du
⁸⁴² site d'étude. Une mesure se déroule de la façon suivante : la chambre est posée sur
⁸⁴³ l'embase, l'analyseur de CO₂ et la sonde humidité/température sont insérées à l'inté-
⁸⁴⁴ rieur. Un ventilateur de faible puissance est également positionné à l'intérieur de la
⁸⁴⁵ chambre au préalable afin d'homogénéiser l'air. 1 à 3 min de stabilisation sont néces-
⁸⁴⁶ saires après la pose de la chambre afin d'éviter les effets pouvant y être liés, le plus
⁸⁴⁷ souvent la perturbation d'un gradient de concentration. L'enregistrement est ensuite
⁸⁴⁸ lancé, les données (concentration en CO₂, température, humidité) sont acquises toutes
⁸⁴⁹ les 5 s pendant 5 min. La mesure se déroule donc sur une période de temps relative-
⁸⁵⁰ ment courte afin de minimiser les perturbations possibles et d'éviter de s'éloigner des


 FIGURE 2.7 – Mesures de CO₂

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

860 De nombreux écueils peuvent rendre une mesure inexploitable. D'abord le placement
 861 de la chambre : cela peut sembler trivial mais positionner la chambre au milieu d'her-
 862 bacées et de bruyères n'est pas toujours évident. Plus anecdotiquement des sphagnes



FIGURE 2.8 – SPIRIT

863 gelées, recouvrant les bords de l'embase rendent la pose de la chambre difficile voire
864 impossible. Enfin selon l'heure de la journée des gradients de concentration peuvent
865 être présents et augmenter localement les concentrations de CO₂ de façon importante
866 allant jusqu'à saturer la sonde.

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

874 2.3.2 Les mesures de CH₄

875 Les mesures de CH₄ ont été réalisées avec une chambre aux caractéristiques simi-
876 laires à celles utilisées pour les mesures de CO₂ à l'exception de l'interface avec l'ana-

877 lyseur. En effet la taille de ce dernier ne permettait pas de l'insérer directement dans
878 la chambre comme l'analyseur de CO₂. La méthode de la chambre dynamique fermée a
879 été utilisée pour réaliser ces mesures, elle diffère donc légèrement de celle utilisée pour
880 le CO₂ puisqu'elle nécessite la mise en oeuvre d'un système de pompe pour transporter
881 le gaz jusqu'à l'analyseur. L'instrument utilisé pour analyser la concentration en CH₄
882 est le SPIRIT (SPectromètre Infra Rouge In-situ Troposphérique) (Figure 2.8).

883 Le SPIRIT est un spectromètre infra-rouge développé par le LPC2E. La spectro-
884 métrie infra-rouge se base sur la mesure de l'absorption d'un rayonnement infrarouge
885 par des molécules. Pour une molécule, cette absorption est variable selon les longueurs
886 d'ondes permettant de la caractériser, son intensité étant fonction de la concentration
887 (Loi de Beer-Lambert). Cet instrument profite de l'expertise acquise par le laboratoire
888 dans le domaine de la métrologie infra-rouge, notamment avec le développement de son
889 ancêtre le SPIRALE (SPectroscopie Infra Rouge par Absorption de Lasers Embarqués).
890 Plus petit et plus léger (100 kg), le SPIRIT a été développé en différentes versions, fonc-
891 tion des usages. Il existe actuellement une version sol et une version avion de l'appa-
892 reil. Les capacités du SPIRIT sont principalement liées à deux éléments. Premièrement
893 l'invention d'une cellule à réflexion multiple par le LPC2E (Robert, 2007), permettant
894 d'adapter facilement la longueur du parcours optique en fonction de la concentration des
895 gaz à mesurer. Deuxièmement l'utilisation de lasers à cascades quantique (QCL), dont
896 la puissance permet d'augmenter le nombre de réflexion et la sensibilité des mesures
897 d'absorption. Les QCL installés émettent séquentiellement dans le moyen infra-rouge
898 (2,5 à 25 μm), dans une gamme spécifique aux espèces que l'on souhaite mesurer. Ce
899 choix est dicté par l'absorbance à ces longueurs d'ondes d'un grand nombre d'espèces
900 d'intérêt et l'intensité importante de leurs raies d'absorption. Après son émission, le
901 laser est divisé en deux : la première partie traverse une cellule de référence, conte-
902 nant un gaz de concentration connue. La seconde partie traverse une cellule de mesure,
903 contenant le gaz à mesurer. Les deux parties du laser débouchent finalement sur les
904 détecteurs. Le spectre d'absorption est divisé par le spectre de référence, ce qui per-
905 met de conserver uniquement le signal lié à l'absorption moléculaire. Ce spectre est

2.4. Facteurs contrôlants

ensuite comparé à un spectre simulé afin de déterminer les concentrations en gaz. Le fonctionnement détaillé du SPIRIT-sol est décrit dans [Guimbaud et al. \(2011\)](#).

2.3.3 Le calcul des flux

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

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

Avec :

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

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

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

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

T : la température dans la chambre en K

V : le volume de la chambre en m³

S : la surface occupée par l'embase en m²

2.4 Facteurs contrôlants

En plus des mesures de flux de gaz, des variables environnementales ont été parallèlement mesurées. La description des techniques et matériels communs aux différentes expérimentations utilisées est développée ci-dessous. Cependant leur mise en œuvre ou caractéristiques spécifiques, comme la fréquence des mesures, sera décrite individuellement au niveau des parties détaillant chacune des expérimentations.

2.4.1 acquisitions automatisées

Un certain nombre de variables environnementales ont été acquises automatiquement à l'aide d'une station d'acquisition Campbell®. Cette station a été installée au

928 centre de la tourbière de La Guette en 2008 (Figure 2.2). Jusqu'au 20 février 2014
929 l'acquisition des variables s'est effectuée à une fréquence horaire. Depuis cette date la
930 fréquence d'acquisition a été augmentée à une demie heure. Les paramètres enregistrés
931 sont la pression atmosphérique, l'humidité relative de l'air, la pluviométrie, l'irradia-
932 tion solaire, la vitesse et la direction du vent. Cette même station a également permis
933 l'acquisition de la température de l'air et de la tourbe à -5, -10, -20 et -40 cm.
934 Installées à la même époque, quatre sondes de mesure du niveau de la nappe d'eau
935 permettent le suivi du niveau de la nappe dans la tourbière.

936 **2.4.2 acquisitions manuelles**

937 Les variables acquises manuellement, spécifiques à chaque expérimentation, seront
938 détaillées dans leurs chapitres respectifs

939 CHAPITRE 3

940 BILAN DE C DE LA TOURBIÈRE DE LA GUETTE

941

| | | |
|-----|--|-----|
| 942 | 3.1 Introduction | 56 |
| 943 | 3.2 Procédure expérimentale et analytique | 57 |
| 944 | 3.2.1 Méthodes de mesures | 57 |
| 945 | 3.2.2 Variables élaborées utilisées | 59 |
| 946 | 3.2.3 Variabilité saisonnière du bilan de C | 60 |
| 947 | 3.2.4 Variabilité spatiale des flux et du bilan de carbone | 64 |
| 948 | 3.2.5 Estimation de l'erreur associée aux flux et aux bilans | 66 |
| 949 | 3.3 Résultats | 66 |
| 950 | 3.3.1 Cinétique des facteurs contrôlant et des flux sur la tourbière | |
| 951 | de La Guette | 66 |
| 952 | 3.3.2 Sélection des modèles | 73 |
| 953 | 3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle | |
| 954 | de l'écosystème | 80 |
| 955 | 3.3.4 Variabilité spatiale du bilan | 88 |
| 956 | 3.4 Discussion | 92 |
| 957 | 3.4.1 Modèles à l'échelle de l'écosystème | 92 |
| 958 | 3.4.2 Les flux annuels à l'échelle de la tourbière de La Guette | 95 |
| 959 | 3.4.3 Estimations du bilan net de l'écosystème à l'échelle de la tour- | |
| 960 | bière de La Guette | 98 |
| 961 | 3.4.4 Variabilité spatiale sur la tourbière de La Guette | 100 |
| 962 | 3.4.5 Représentativité locale du modèle | 101 |
| 963 | | |
| 964 | | |
| 965 | | |

966 3.1 Introduction

967 La majorité des écosystèmes tourbeux pour lesquels un bilan de carbone a été es-
968 timé, se situe sous les hautes latitudes de l'hémisphère nord comme par exemple en
969 Suède ([Waddington et Roulet, 2000; Peichl et al., 2014](#)), en Finlande ([Alm et al., 1997](#)),
970 au Canada ([Trudeau et al., 2014](#)). Les tourbières situées plus au sud ont fait l'objet de
971 rare estimation de bilan (e.g. tourbière du Jura français par [Bortoluzzi et al. \(2006\)](#)).
972 L'étude de ces écosystèmes présent à la limite sud de leur extension est importante car
973 ils expérimentent des conditions plus extrêmes que les autres qui sans être identiques,
974 peuvent se rapprocher de celles que subiront d'autres écosystèmes tourbeux suite au
975 réchauffement climatique. Par ailleurs, concernant la tourbière de La Guette, ce site est
976 représentatif d'une grande partie des tourbières dans les perturbations qu'elle subie :
977 son drainage et son envahissement par une végétation vasculaire (Les caractéristiques
978 du site sont détaillées dans le chapitre [2](#)). Le premier objectif de ce chapitre est donc
979 d'établir le bilan de C de la tourbière de La Guette. Le second objectif est de ca-
980 ractériser la variabilité spatiale de ces flux de GES à travers ce bilan de C. En effet
981 les tourbières sont des écosystèmes avec des conditions environnementales qui peuvent
982 varier dans l'espace. Par exemple le niveau de la nappe, à cause de variation micro-
983 topographique peut être plus ou moins élevé, immerger la surface du sol avec des zones
984 d'eau libre ou au contraire être quelques dizaines de centimètres sous la surface du sol.
985 La conséquence de ces variations, est l'existence de micro-environnements différents
986 qui abritent des communautés végétales et microbiennes différentes. Finalement ces
987 conditions environnementales contrôlant les flux, ceux-ci varient également. Estimer
988 ces variations est donc nécessaire afin de préciser dans quelle mesure elles influent sur
989 le bilan de C.

3.2 Procédure expérimentale et analytique

Les méthodes de chambre étant détaillées dans la partie 2.3, celle-ci contient la description de la stratégie d'échantillonnage et le détail des méthodes de mesure. Elle explicite également le calcul de variables élaborées utilisées par la suite, détaille le principe permettant l'estimation du bilan de carbone du site à l'échelle saisonnière et décrit la stratégie d'étude de la variabilité spatiale. Enfin elle précise comment sont fait les calculs des erreurs associées aux flux et bilans.

3.2.1 Méthodes de mesures

En juin 2011, 20 placettes ont été installées¹ selon un échantillonnage aléatoire stratifié : La surface de la tourbière a été divisée selon une grille de 20 mailles et un point choisi aléatoirement dans chaque maille localise chaque placette (Figure 3.1). La taille de la maille a été ajustée de manière à avoir vingt 20 carrés sur la surface de la tourbière. Cette méthode permet de conserver un échantillonnage aléatoire tout en étant assuré d'avoir une représentativité spatiale du site homogène. Les placettes, délimitées par des piquets, occupaient une surface de 4 m^2 ($2\times 2\text{ m}$). Usuellement les placettes sont séparées en groupes micro-topographiques (Figure 1.3), avec des embases positionnées sur les buttes (*hummock*), les trous (*hollows*) et les zones d'eau libre (*pool*) (Alm *et al.*, 1997; Waddington et Roulet, 2000). Ou encore selon différent traitements, réhabilité/non réhabilité, exploité/non exploité, manipulé/non manipulé (Bortoluzzi *et al.*, 2006; Strack et Zuback, 2013). Ceci a l'avantage de permettre une distinction fine des capacités sources/puits mais a l'inconvénient du placement proche des embases les unes des autres limitant la représentativité spatiale des mesures. Elles peuvent également être séparées en zone dans la tourbière, haut-marais *versus* bas-marais, ou réhabilité *versus* non-réhabilité. Afin de gagner en représentativité spatiale, la taille du site le permettant, il a donc été décidé de positionner des placettes sur l'ensemble du

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

3.2. Procédure expérimentale et analytique



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

site. Sur ces placettes ont été réalisées un certain nombre de mesure de **flux de gaz** et de **facteurs contrôlant**.

Mesures des flux de gaz

Les mesures des flux de CO₂ et de CH₄ ont été effectuées en utilisant les méthodes de chambre décrites dans la partie 2.3. À l'intérieur de chaque placette ont été installé de façon permanente un piézomètre et une embase permettant la mesure des flux de gaz (Les embases sont décrites dans le chapitre 2, partie 2.3.1).

Les flux de CO₂ et de CH₄ ont été mesurés et étudiés. Par contre, suite à des tests effectués sur la tourbière montrant des émissions nulles de N₂O, ce gaz n'a pas été étudié. Les mesures de CO₂ ont été effectuées de mars 2013 à février 2015, avec une fréquence quasiment mensuelle (20 campagnes, pour 24 mois de mesures). Les mesures de CH₄ ont été effectuées avec une fréquence et sur un nombre d'embases inférieur (12 campagnes, 5 embases). Ceci a été déterminé par la difficulté de déploiement *in-situ* de

1028 l'instrument SPIRIT. Il est lourd, difficilement transportable dans un milieu tourbeux
1029 et nécessite entre chaque déplacement un temps de mise en marche/arrêt important :
1030 plus de 30 min. Les mesures se sont donc limitées aux placettes accessibles depuis le
1031 ponton (Figure 3.1).

1032 **Mesures des facteurs contrôlant**

1033 Les facteurs contrôlant mesurés manuellement sont la pression atmosphérique, le
1034 rayonnement photosynthétique actif (*photosynthetically active radiation*, PAR), les tem-
1035 pératures du sol à différentes profondeurs, la végétation (pourcentage de recouvrement),
1036 le niveau de la nappe d'eau. La pression atmosphérique est mesurée au début et à la
1037 fin des mesures de flux. Le PAR est mesuré au début et à la fin des mesures de l'ENE.
1038 Le recouvrement de végétation est estimé à l'œil. Des prélèvements d'eau ont été ef-
1039 fectués chaque mois pour mesurer le pH et la conductivité (mesures effectuées sur le
1040 terrain après les mesures de flux). Les échantillons ont été congelés pour la mesure
1041 ultérieure de la concentration en carbone organique dissout. L'ensemble de ces mesures
1042 nécessitant d'accéder aux placettes régulièrement, des planches de bois ont été utilisées
1043 comme pontons mobiles pour limiter les perturbations. La dispersion des placettes sur
1044 l'ensemble du site a rendu impossible une installation plus permanente.

1045 Les mesures automatiquement acquise via une station météo Campbell® sont la
1046 température de l'air, température de la tourbe à -5, -10, -20 et -40 cm de profondeur,
1047 vitesse et direction du vent, humidité relative de l'air, rayonnement solaire, pression
1048 atmosphérique.

1049 **3.2.2 Variables élaborées utilisées**

1050 Les mesures de recouvrement de la végétation ont été sommées par strate végétale.
1051 On utilisera donc RSM, RSA, RSH pour distinguer les recouvrements respectif de
1052 la strate muscinale (*Sphagnum spp.*), arbustive (*Erica tetralix* et *Calluna vulgaris*),
1053 et herbacée (*Molinia caerulea* et *Eriophorum angustifolium*). Un indice de végétation,
1054 représentant la quantité de végétation présente dans une embase est également calculé

3.2. Procédure expérimentale et analytique

1055 de la façon suivante :

$$IV = \frac{RSM + RSA + RSH}{\sum Rmax} \quad (3.1)$$

1056 Avec :

- 1057 — $\sum R_{max}$ La somme des recouvrements maximum par strates.
 - 1058 — RSM le recouvrement de la strate muscinale
 - 1059 — RSA le recouvrement de la strate arbustive
 - 1060 — RSH le recouvrement le la strate herbacée
- 1061 Le niveau de nappe est composé de deux mesures, l'une du haut du piézomètre
1062 jusqu'au niveau de la nappe et l'autre du haut du pièzomètre jusqu'à la surface du sol.
1063 Par la suite, et en l'absence de précisions, le niveau de nappe se réfère à la différence
1064 entre ces deux mesures et donc à la distance entre la surface du sol et le niveau de la
1065 nappe (Négative sous la surface du sol et inversement).

1066 3.2.3 Variabilité saisonnière du bilan de C

1067 L'estimation du bilan de carbone se fait en trois étapes. La première consiste à éta-
1068 blir des relations empiriques entre les flux et un ou plusieurs facteurs contrôlant. C'est
1069 la phase de **calibration**. La seconde, l'**évaluation/validation**, teste la pertinence de
1070 ces relations sur un jeu de données indépendantes. La troisième étape, l'**interpolation**,
1071 utilise ces relations empiriques pour intégrer dans le temps les mesures ponctuelles sur
1072 l'ensemble des deux années de mesure. La chronique ainsi reconstituée permettant en-
1073 suite d'estimer les quantités de carbone annuelles déplacées via des différents flux et
1074 d'en calculer leur bilan.

1075 Calibration

1076 Pour estimer le bilan de carbone du site il est donc nécessaire d'établir des mo-
1077 dèles reliant des flux mesurés ponctuellement avec des variables explicatives mesurées
1078 à haute fréquence (par exemple entre la respiration de l'écosystème et la température

1079 de l'air). Pour établir ces modèles empiriques les données acquises ont été moyennées
 1080 par campagne de mesure. Ceci permettant, dans un premier temps, de s'affranchir de
 1081 la variabilité spatiale des flux pour se concentrer sur la variabilité temporelle. Les rela-
 1082 tions entre flux et facteurs contrôlant ont ensuite été étudiées deux à deux, notamment
 1083 en réalisant une analyse en composante principale (ACP). Cette analyse permet de
 1084 déterminer quels sont les relations entre les variables et plus particulièrement quelles
 1085 sont celles qui influent le plus sur les flux de GES. Le nombre de données acquises pour
 1086 le CO₂ et le CH₄ étant différent, une ACP a été réalisée pour chacun de ses gaz. Une
 1087 fois le facteur de contrôle prépondérant d'un gaz établi, grâce à l'ACP et à la littéra-
 1088 ture, une relation empirique est établie entre les deux. La forme de cette relation et la
 1089 littérature conditionne ensuite les équations testées. Elles sont évaluées à l'aide du co-
 1090 efficient de détermination (R^2) et de la racine carré de l'erreur quadratique normalisée
 1091 (*Normalised Root Mean Square Error*, NRMSE). Le R^2 est utilisé comme indicateur de
 1092 la proportion de la variabilité des données expliquée par le modèle, sa valeur est com-
 1093 prise entre 0 et 1. La RMSE et sa normalisation par la moyenne NRMSE sont utilisés
 1094 comme indicateur de l'écart entre les données mesurées et les données modélisées. Les
 1095 résidus ² sont également étudiés dans le but d'éviter un biais ou une hétéroscédasticité ³
 1096 dans les données (Figure 3.2).

1097 Puis les résidus de ces modèles de base ont ensuite été étudiés en fonction des fac-
 1098 teurs de contrôle restant. Dans le cas où une tendance est visible avec l'un d'entre eux,
 1099 le facteur est ajouté (**Réf needed**). En plus des indicateurs précédent, la pertinence
 1100 de l'ajout d'un paramètre est évalué à l'aide du critère d'information d'Akaike (*Akaike*
 1101 *Information Criterion*, AIC). L'AIC permet de déterminer la pertinence de l'ajout d'un
 1102 paramètre sur la représentation des données par le modèle.

Remarque : La RE, et l'ENE sont mesurés directement sur le terrain.

1103 Cependant afin d'établir le bilan de carbone tout en gardant une discrimi-
 nation entre les flux entrants et sortants de l'écosystème la RE et la PPB
 (obtenue grâce à l'équation PPB = ENE - RE) ont été estimés séparément.

2. Les résidus sont défini comme la différence entre les valeurs mesurées et estimées.

3. On parle d'homoscédasticité lorsque la variance de l'erreur d'une variable est constante, et l'hétéroscédasticité lorsque qu'elle ne l'est pas

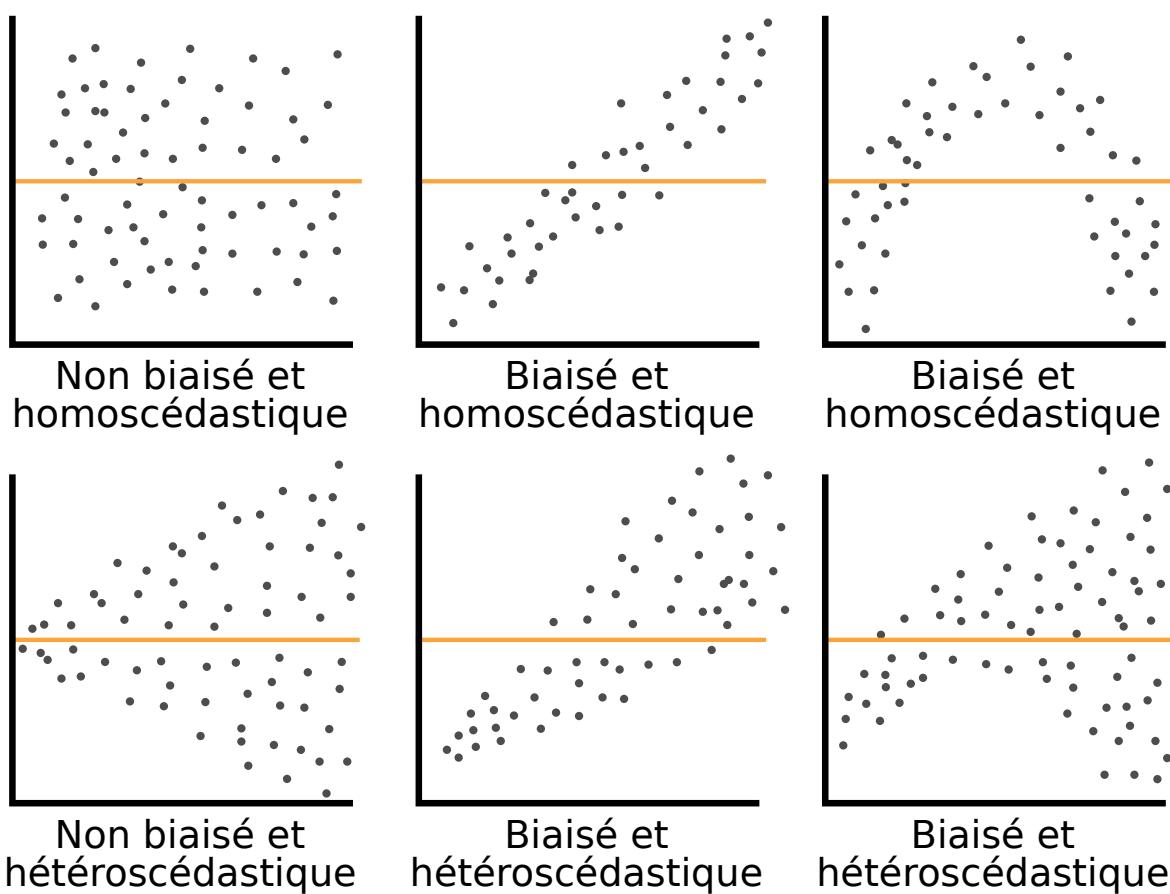


FIGURE 3.2 – Cas idéaux de distribution des résidus. Modifié d'après source inconnue, repris de : <https://danieljhocking.wordpress.com/2011/07/18/model-validation-interpreting-residual-plots/>

1104 La température a été choisie comme base de départ à la construction des modèles
1105 de RE et PPBsat, à la fois car c'est le facteur de contrôle le plus souvent invoqué et à
1106 la fois car les corrélations avec les flux étaient les plus forte. Concernant la respiration
1107 de l'écosystème, les températures utilisées dans la littérature sont variables. La tem-
1108 pérature la plus utilisée est la température du sol à -5 cm (Ballantyne *et al.*, 2014).
1109 La température de l'air et la température du sol à -10 cm sont aussi régulièrement
1110 utilisées (Bortoluzzi *et al.*, 2006; Kim et Verma, 1992). Cette profondeur, -5 cm, est
1111 régulièrement utilisée car c'est dans la tourbe, proche de la surface que la respiration
1112 du sol est la plus importante. (**Réf needed**) C'est également à des profondeurs rela-
1113 tivement faibles que se situent la majorité des racines (**Réf needed**). La respiration
1114 liée aux racines (autotrophe et hétérotrophe stimulée par les exsudats racinaires) peut
1115 contribuer à la respiration de l'écosystème pour 35 à 60 % (Silvola *et al.*, 1996; Crow et
1116 Wieder, 2005). La RE est estimée directement à partir des données acquises moyennées
1117 en partant de la température connue pour contrôler une grande partie de ce flux. Les
1118 modèles les plus fréquemment utilisés (linéaire, exponentiel, arrhénius) ont été testés.

1119 Pas de consensus émerge de la littérature quant aux facteurs contrôlant les émissions
1120 de CH₄. La température, (Alm *et al.*, 1999; Bubier *et al.*, 1995), le niveau de la nappe
1121 (Bubier *et al.*, 1993) et/ou la végétation (Bortoluzzi *et al.*, 2006) peuvent être utilisés
1122 isolément ou conjointement.

1123 Évaluation/validation

1124 Après la phase de calibration, les facteurs de contrôle utilisés dans les modèles
1125 ont été évalués à l'aide de données indépendantes issues d'une autre expérimentation
1126 réalisée sur le même site en 2014. Les méthodes de mesures des flux sont strictement
1127 identiques à celles utilisées pour établir le bilan de carbone. En revanche le position-
1128 nement des placettes est beaucoup plus classique : proches les unes des autres, et avec
1129 différents traitements. Afin de pouvoir les comparer, seule les placettes de contrôles,
1130 (n'ayant donc subie aucune manipulation) de cette expérimentation seront utilisées soit
1131 4 placettes dans une station en amont et 4 en aval de la tourbière de La Guette (plus

3.2. Procédure expérimentale et analytique

de détails dans l'annexe C). Le terme d'évaluation est préféré à celui de validation car le nouveau jeu de données utilisé, bien qu'indépendant de celui utilisé pour la calibration, n'a pas été acquis de manière strictement identique, notamment au niveau de la répartition des embases sur le site.

1136 **Interpolation**

Enfin les facteurs contrôlants ont été interpolés au pas de mesure de la station météo présente sur le site, c'est-à-dire à l'heure. Pour des données dont l'acquisition est manuelle uniquement, comme la végétation, une interpolation linéaire est faite entre les points de mesures. Pour les données acquises à la fois automatiquement par la station météorologique et manuellement, comme la température de l'air ou de la tourbe, l'interpolation est faite à partir de la relation entre les mesures continues et ponctuelles. Les flux sont ensuite recalculés (en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) à l'échelle horaire sur les deux années de mesure puis sommés afin d'estimer les bilans de carbone. Ces bilans sont par la suite exprimés en gC m^{-2} par période de temps (souvent l'année).

1146 **3.2.4 Variabilité spatiale des flux et du bilan de carbone**

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

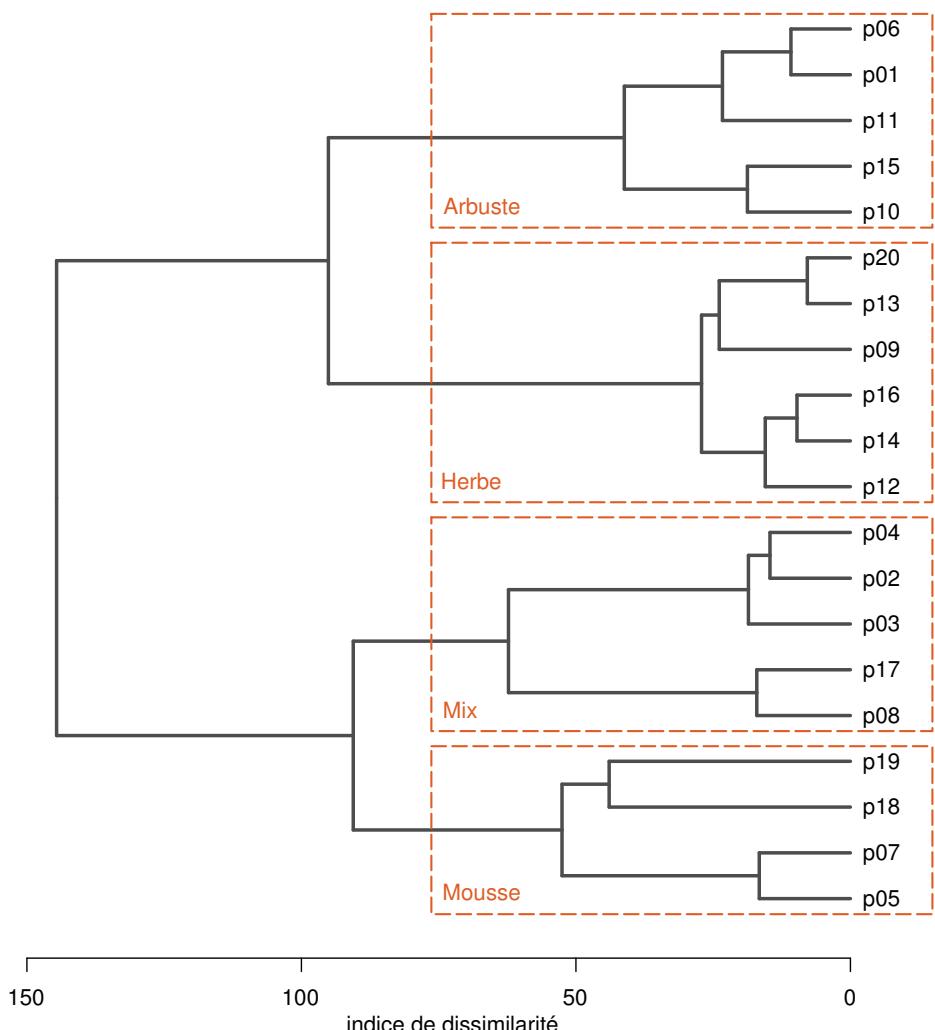


FIGURE 3.3 – Partitionnement des placettes en fonction de leur similarité en termes de composition végétale (pourcentage des strates muscinales, herbacées et arbustives)

classification hiérarchique ascendante. C'est une méthode déterministe qui consiste, à partir de l'ensemble des individus (ici nos différentes placettes de mesure), de les regrouper en classes de plus en plus grande. Les points sont regroupés par similarité, les deux points les plus proches sont fusionnés, puis les deux suivants et ce jusqu'à ce qu'il ne reste qu'une seule classe. Cette classification est généralement représentée par un dendrogramme, elle a été appliquée sur les recouvrements végétaux mesurés et permet de distinguer quatre groupes (Figure 3.3).

3.2.5 Estimation de l'erreur associée aux flux et aux bilans

Pour chaque flux, l'erreur sur le bilan annuel est calculé en multipliant ce flux par l'erreur quadratique normalisée, calculée lors de la calibration. Pour les bilans, l'erreur associée est calculée comme la somme des erreurs associées aux flux composant le bilan. Chacune de ces erreur étant pondérée par leur importance relative par rapport à la somme, en valeur absolue des flux (Waddington et Roulet, 2000).

$$E_{(bilan)} = (\chi_{PPB} \times NRMSE_{PPB}) + (\chi_{RE} \times NRMSE_{RE})(\chi_{F_{CH_4}} \times NRMSE_{F_{CH_4}}) \quad (3.2)$$

Avec :

- $E_{(bilan)}$ l'erreur associée au bilan
- χ_{flux} la fraction du flux par rapport à la somme en valeurs absolue de tous les flux compris dans le bilan
- $NRMSE_{flux}$ l'erreur quadratique associée au flux

Ces erreurs ne sont qu'une part de l'erreur totale qui devrait être associée à ces flux. Elle ne considère par exemple pas les erreurs aléatoires et systématiques liées aux mesures.

3.3 Résultats

3.3.1 Cinétique des facteurs contrôlant et des flux sur la tourbière de La Guette

Les Facteurs contrôlant

L'évolution du niveau de la nappe des 20 placettes est marquée par un étiage d'une vingtaine de centimètres en moyenne en 2013 et l'absence d'un étiage net en 2014 (Figure 3.4). Le niveau de la nappe moyen ne descend pas sous la barre des -10 cm

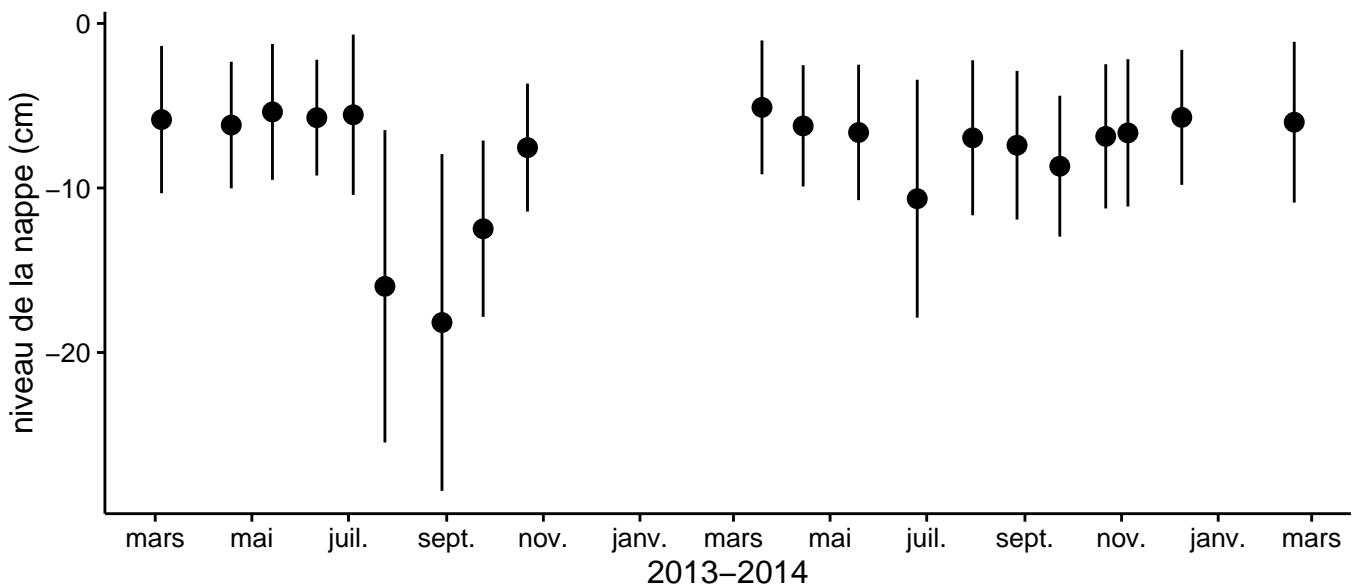


FIGURE 3.4 – Évolution du niveau de la nappe moyen des 20 embases mesuré pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015). Les valeurs correspondent à la distance entre le niveau de nappe et la surface du sol.

1187 avec $-9,2 \pm 7,6$ et $-7,1 \pm 4,8$ cm respectivement pour 2013 et 2014. Ces observations
 1188 sont cohérentes avec les mesures haute fréquence (Figure 2.5), et confirment l'étiage
 1189 particulièrement haut de ces 2 années vis-à-vis des précédentes.

1190 L'évolution saisonnière de la végétation sur la tourbière de La Guette est visible
 1191 (Figure 3.5). Cette variabilité est majoritairement le fait de la strate herbacée qui
 1192 meurt à la fin de la saison de végétation tandis que les arbustes et les mousses résistent.
 1193 la saison de végétation, pour les herbacées, semble avoir commencé un peu plus tôt en
 1194 2014 avec une végétation qui commence à croître en mars tandis qu'il faut attendre
 1195 la campagne d'avril en 2013. L'indice de végétation est également légèrement plus
 1196 important en 2014, probablement sous l'effet de la croissance de la strate herbacée.

1197 La température de l'air mesurée manuellement montre une variabilité saisonnière
 1198 cohérente avec celle mesurées par la station météo. La variabilité saisonnière de la
 1199 température est également visible dans le sol avec cependant un amortissement et une
 1200 diminution de la variabilité avec la profondeur (figure 3.6)

1201 La conductivité moyenne mesurée sur le site varie entre 35 and 55 $\mu\text{S m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (fi-
 1202 gure 3.7–A). En moyenne le pH mesuré sur la tourbière de La Guette est compris entre
 1203 4 et 5 (figure 3.7–B). Ces valeurs sont cohérentes avec la classification en *poor-fen* du

3.3. Résultats

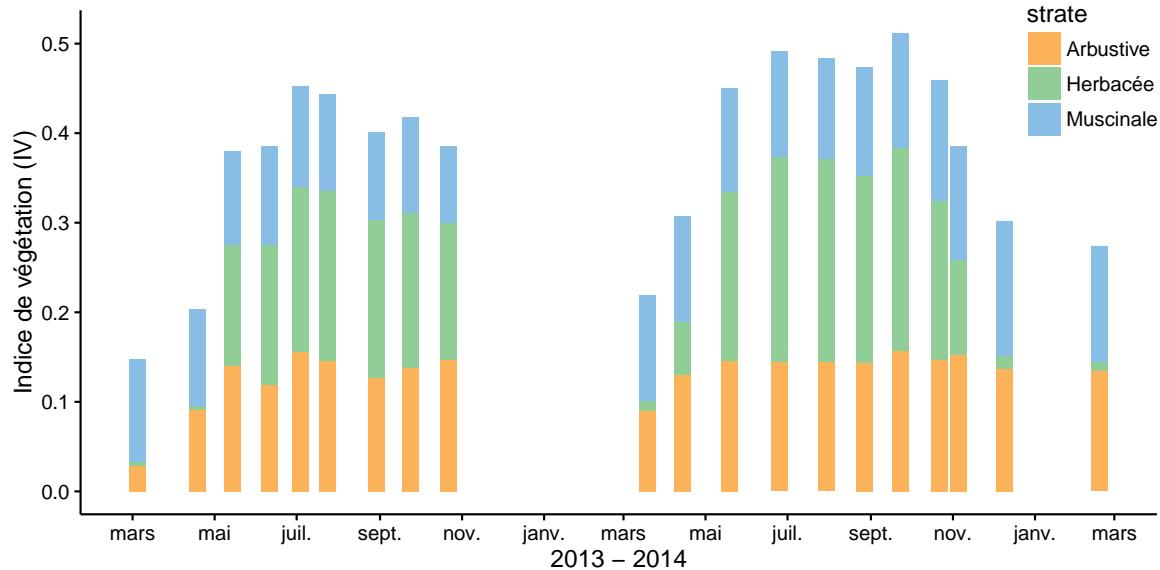


FIGURE 3.5 – Évolution de la végétation à travers l'indice de végétation et les strates qui le compose

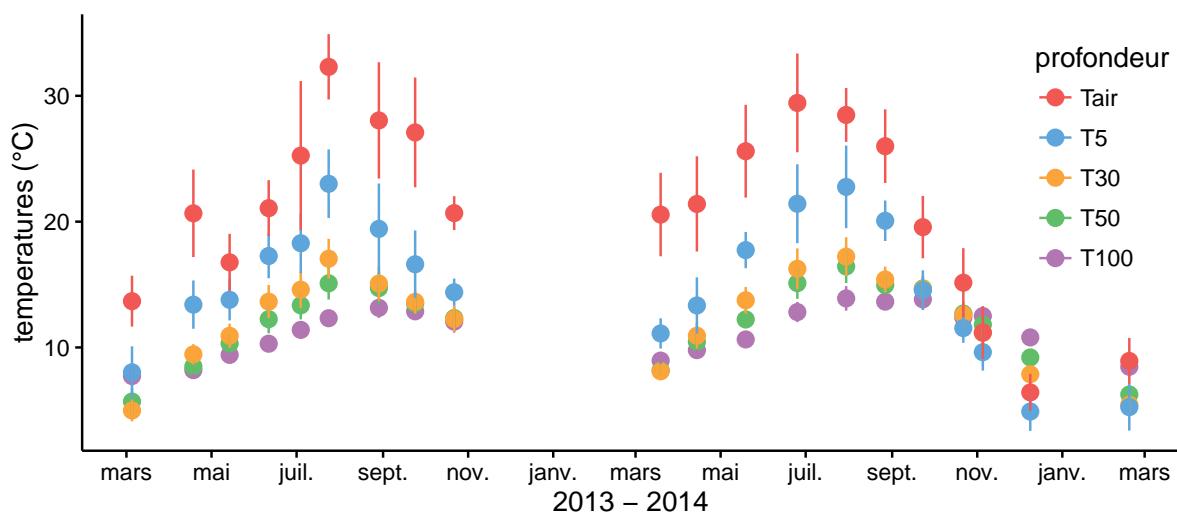


FIGURE 3.6 – Évolution des températures de l'air (Tair) et du sol à -5, -30, -50 et -100 cm (T5, T30, T50 et T100 respectivement) moyenne mesurée lors des campagnes de terrain de mars 2013 à février 2015

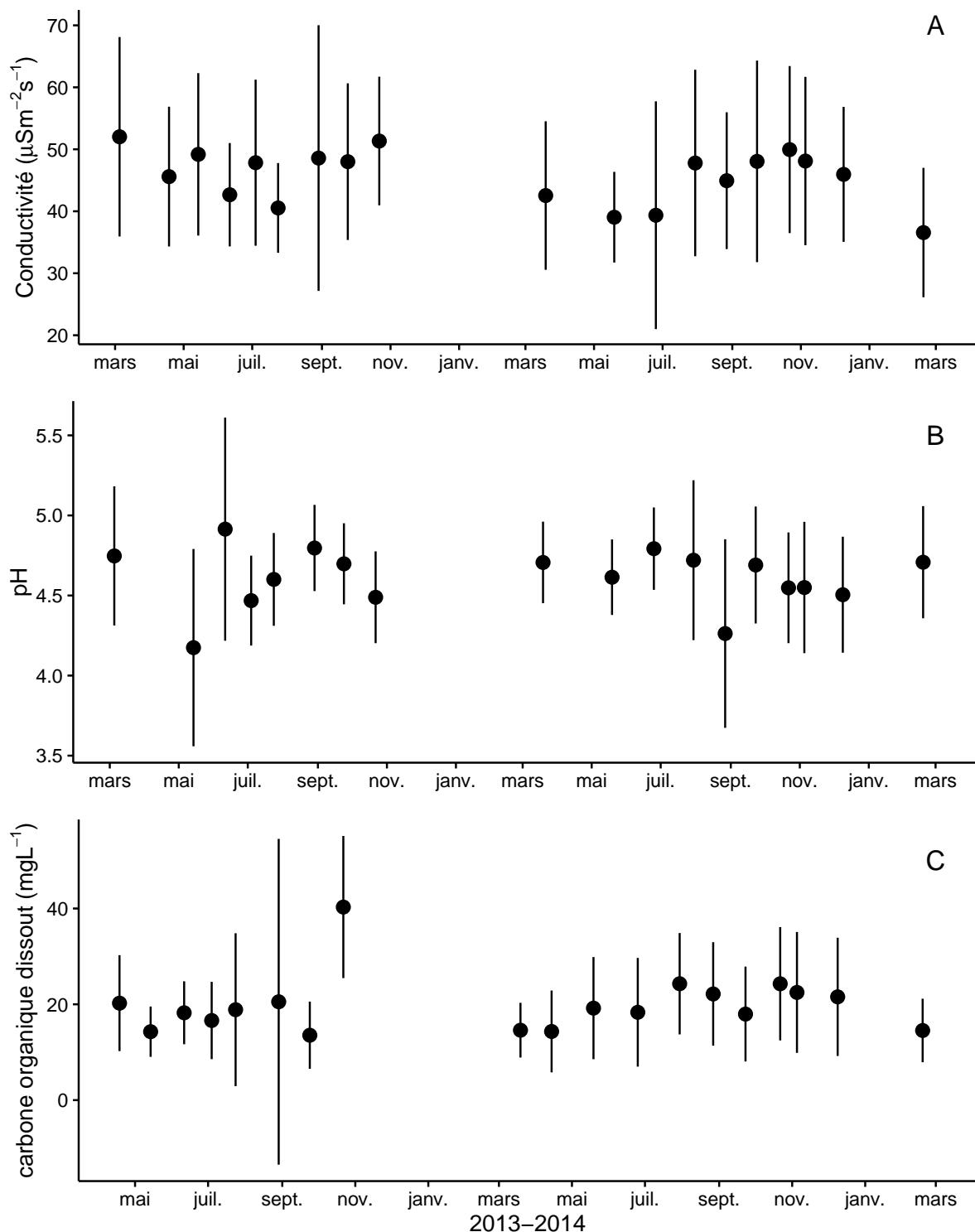


FIGURE 3.7 – Cinétique de la conductivité (A), du pH (B) et du carbone organique dissous (C) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

3.3. Résultats

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

1206 Les flux de carbone

1207 L'ensemble des mesures de CO₂ s'étendent de mars 2013 à février 2015. Cependant
1208 de novembre 2013 à février 2014 les mesures ont été interrompue suite à des problèmes
1209 techniques. Les deux saisons de végétation, ont pu être mesurées dans leur ensemble,
1210 permettant d'avoir un jeu de données représentatif sur le fonctionnement de l'écosys-
1211 tème.

1212 En 2013, les valeurs de la PPB (flux de CO₂ entrant dans l'écosystème) augmentent
1213 au printemps et une partie de l'été avec un maximum de $12,80 \pm 4,91 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
1214 atteint fin juillet, avant de diminuer à partir d'août (Figure 3.8-A). En 2014 la PPB
1215 maximale est atteinte en juin ($13,16 \pm 4,70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), soit environ un mois plus tôt
1216 que l'année précédente. Puis pendant l'été et l'automne les valeurs décroissent jusqu'à
1217 être proche de 0. En moyenne les valeurs de la PPB sont de $7,12 \pm 5,19 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
1218 en 2013 et de $6,56 \pm 4,72 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en 2014 (Figure 3.8-A).

1219 La RE (flux de CO₂ sortant de l'écosystème) en 2013 augmente pendant le prin-
1220 temps et une partie de l'été (Figure 3.8-B). Elle atteint un maximum de $9,43 \pm 3,48 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
1221 en juillet avant de diminuer. En 2014 la RE atteint, comme la PPB, son maximum plus
1222 tôt, en juin à $7,83 \pm 2,55 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ avant de décroître jusqu'en hiver pour approcher
1223 des valeurs nulles. La moyenne annuelle de RE en 2013 est de $4,27 \pm 3,16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,
1224 ce qui est légèrement supérieure à celle de 2014 : $3,63 \pm 2,56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figure 3.8-
1225 B).

1226 Concernant l'ENE (bilan des flux de CO₂ entrant et sortant), elle augmente en 2013
1227 jusque $5,19 \pm 4,51 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, avec un maximum en juin, avant de diminuer jusqu'à
1228 la fin de l'année. Cependant, cette baisse est moins uniforme que celle des deux flux
1229 précédents, avec notamment une augmentation de l'ENE entre juillet et août 2013.
1230 Ceci étant, il faut également noter les valeurs importantes de la déviation standard
1231 particulièrement en juin et en août. En 2014, l'ENE maximum est atteinte en juillet

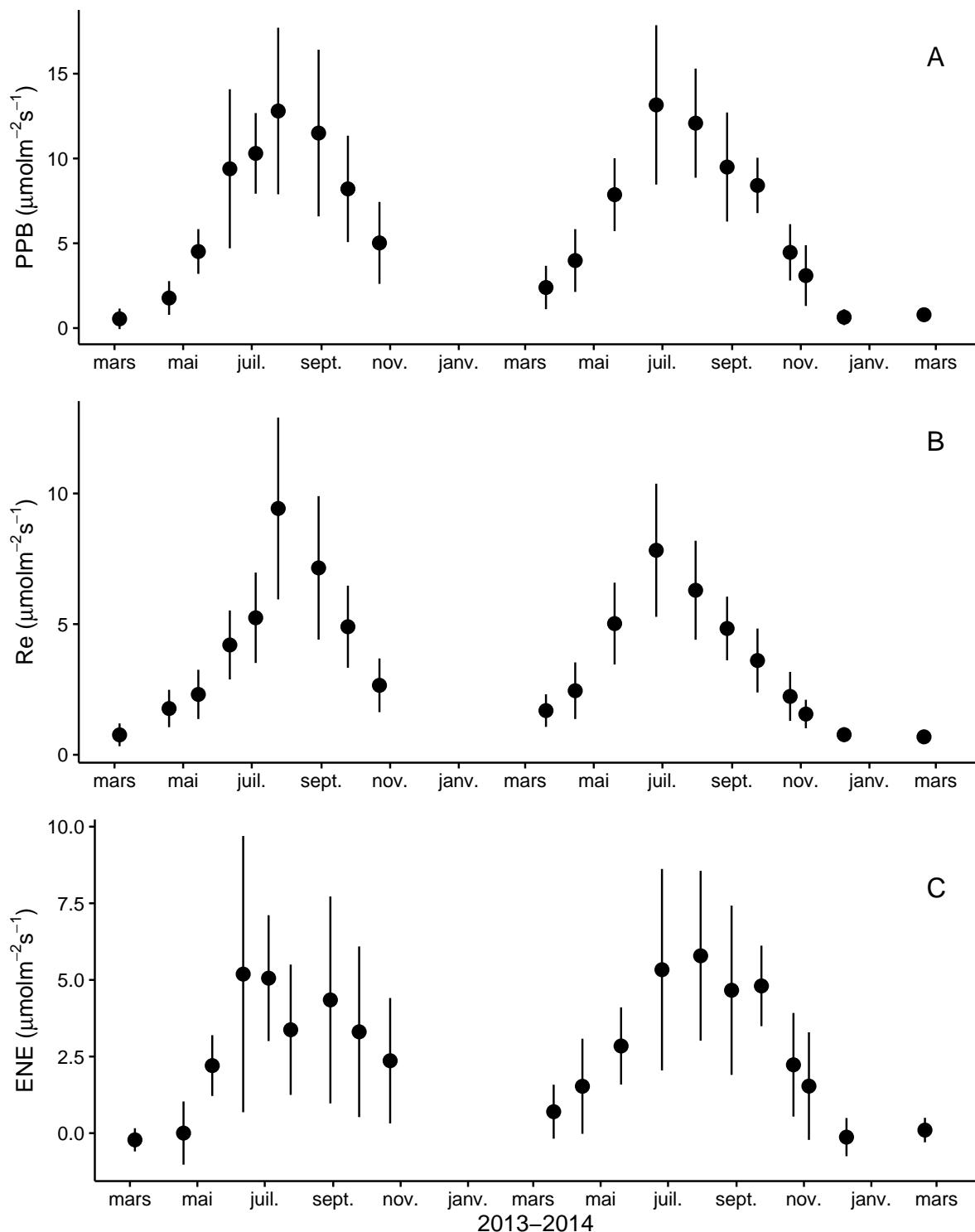


FIGURE 3.8 – Cinétique du niveau de la PPB (A), de la RE (B) et de l'ENE (C) pendant la période de mesure. Moyenne des 20 embases de mars 2013 à février 2015.

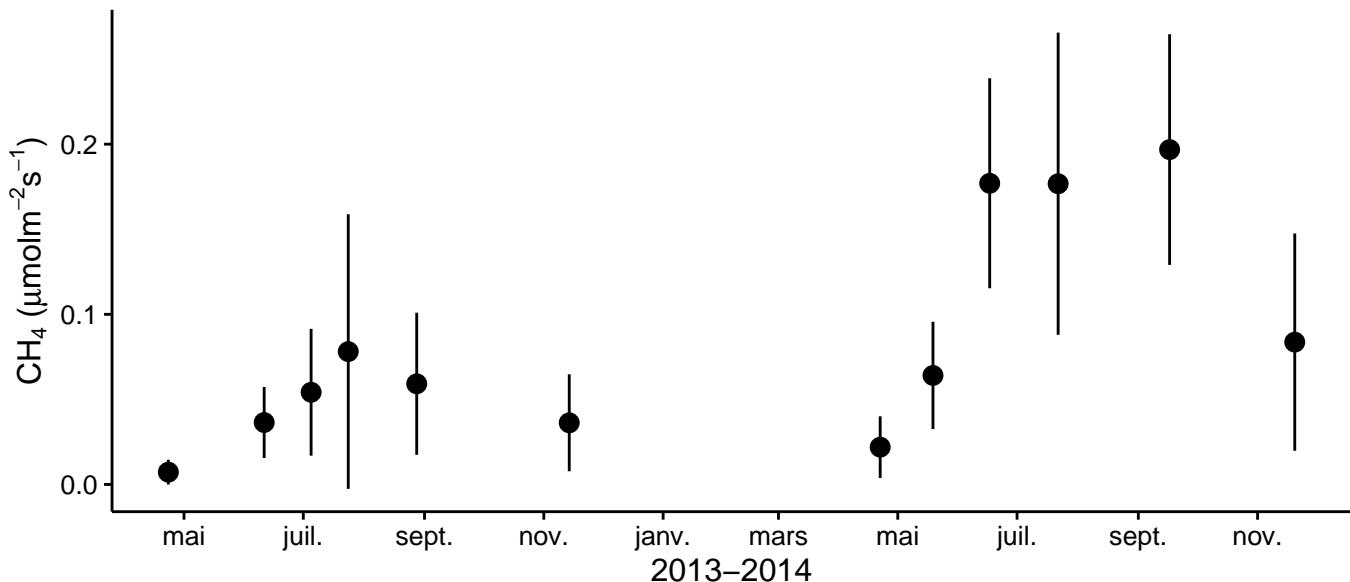


FIGURE 3.9 – Évolution des flux de méthane moyen (N ?) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

1232 avec $5,79 \pm 2,77 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ avant qu'elle ne décroisse. Cette baisse est cependant plus
 1233 homogène qu'en 2013. les moyennes de l'ENE en 2013 et 2014 sont très proche et sont
 1234 respectivement de $2,85 \pm 3,05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ et $2,93 \pm 2,77 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figure 3.8–C).
 1235 À noter également que pour l'ensemble des flux, la déviation standard augmente avec
 1236 les valeurs mesurées.

1237 Les flux de CH_4 comme ceux du CO_2 montre une variabilité saisonnière importante.
 1238 Cependant les flux de CH_4 mesurés sont un ordre de grandeur en dessous de ceux
 1239 mesurés pour le CO_2 (Figure 3.9). À l'inverse de ce dernier, l'importance des flux de
 1240 CH_4 mesurés en 2013 et 2014 est différente. En 2013 les flux sont moins importants
 1241 qu'en 2014 avec $0,04 \pm 0,03$ contre $0,10 \pm 0,08 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ et avec des maximum de
 1242 $0,078$ et $0,196 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivement.

1243 Les relations flux gazeux et facteurs contrôlant

1244 Comme précisé précédemment, le niveau de la nappe n'a que peu varié pendant les
 1245 deux années de mesures. De ce fait aucune relation claire ne se distingue entre les flux
 1246 et le niveau de la nappe que ce soit pour le CO_2 (PPB et RE) ou le CH_4 (Figure 3.10).
 1247 La PPB et la RE présentent cependant des relations avec la température de l'air,
 1248 et l'indice de végétation, même si pour ce dernier les tendances sont moins claires,

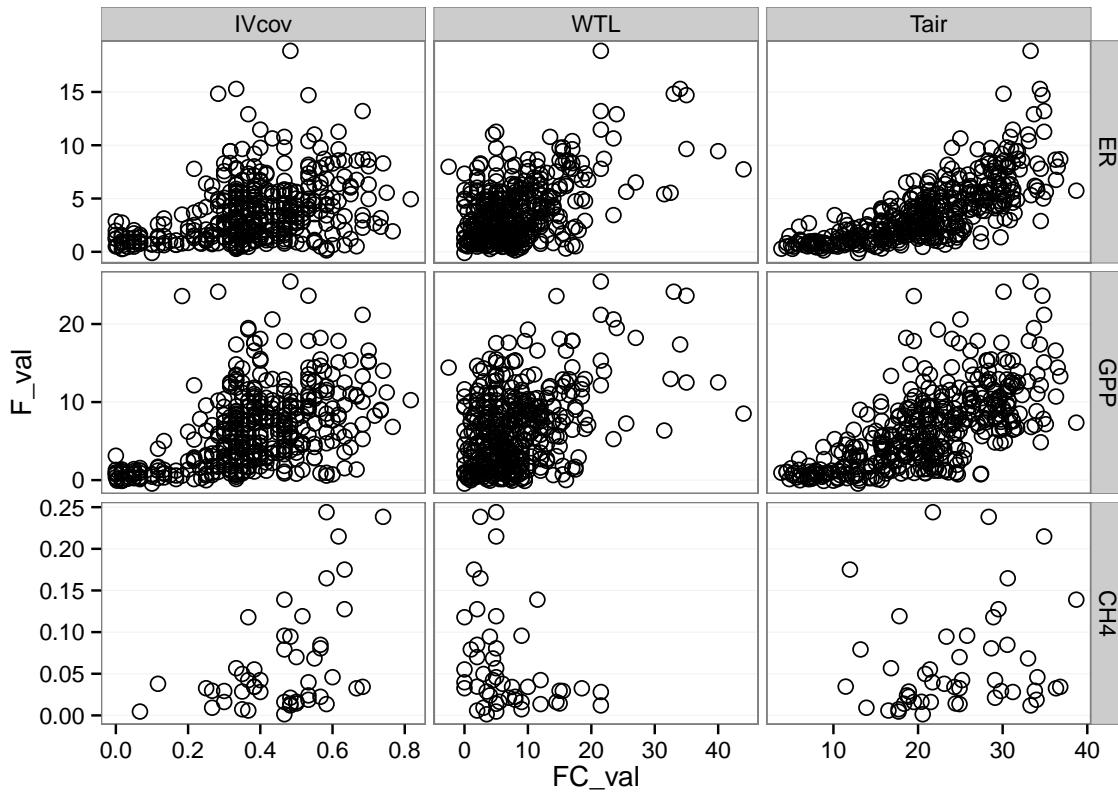


FIGURE 3.10 – Relations entre les flux de gaz et une sélection de facteurs contrôlant

¹²⁴⁹ particulièrement pour la RE (Figure 3.10). Le CH₄ quant à lui ne présente pas de
¹²⁵⁰ relation avec la température de l'air, mais une tendance exponentielle est visible vis-à-
¹²⁵¹ vis de l'indice de végétation (Figure 3.10). (**CH₄ et Température dans la tourbe ?**)

¹²⁵² 3.3.2 Sélection des modèles

¹²⁵³ La Production Primaire Brute

¹²⁵⁴ L'estimation de la PPB se fait en deux étapes. Dans un premier temps on estime le
¹²⁵⁵ potentiel maximum de photosynthèse à un instant donné dans des conditions de lumière
¹²⁵⁶ saturante (PPBsat). Ce potentiel peut varier avec les conditions environnementales et
¹²⁵⁷ a été déterminé en utilisant l'équation de (June *et al.*, 2004) qui relie la vitesse de
¹²⁵⁸ transport des électrons photosynthétiques à lumière saturante à la température :

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

3.3. Résultats

- 1259 Avec :
- 1260 — a la vitesse de transport des électrons photosynthétique à lumière saturante
- 1261 — b la température optimale pour ce transport
- 1262 — c la différence de température à laquelle à laquelle PPBsat vaut e^{-1} de sa valeur
- 1263 à la température optimale

1264 À partir de ce potentiel à lumière saturante, la PPB est estimée en prenant en

1265 compte la luminosité. On utilise l'équation 3.4 proposée par (Bubier *et al.*, 1998) et

1266 régulièrement et majoritairement utilisée (Bortoluzzi *et al.*, 2006; Worrall *et al.*, 2009) :

$$PPB = \frac{PPBsat * a * PAR}{PPBsat + a * PAR} \quad (3.4)$$

1267 L'utilisation de l'équation de June seule, avec la température de l'air comme variable

1268 explicative de la PPBsat, permet d'expliquer 66 % des variations observées avec une

1269 erreur standard de l'estimation de 32 % (Figure 3.11-a). Les résidus de ce modèle se ré-

1270 partissent de façon relativement homogène et non biaisée (Figure 3.11-b). Corrélés avec

1271 l'indice de végétation IV, ils présentent une tendance linéaire croissante (Figure 3.11-

1272 c). On observe la même tendance avec le recouvrement de la strate herbacée avec une

1273 dispersion des points plus importante (Figure 3.11-d). Par contre aucune tendance par-

1274 ticulière n'est visible vis-à-vis du niveau de la nappe (Figure 3.11-e). Le recouvrement

1275 des sphaignes (non présenté) ne montre également, aucune tendance avec les résidus

1276 de cette équation. La PPB calculée à partir de l'équation 3.3 montre une erreur stan-

1277 dard de 31 %, du même ordre de grandeur que celle de PPBsat (Figure 3.11-f) et les

1278 résidus se répartissent de façon relativement homogène et non biaisée (Figure 3.11-g).

1279 Cependant l'évaluation du modèle sur les données de tests montre une erreur stan-

1280 dard de l'estimation plus forte qui atteint 47 % (Figure 3.11-h). Par ailleurs une forte

1281 incertitude est présente concernant l'estimation des paramètres qui ont tous une erreur

1282 standard importante, parfois plus importante que la valeur du paramètre, et une faible

1283 significativité (Tableau 3.1). Afin de prendre en compte la tendance linéaire entre les

1284 résidus et l'indice de végétation (IV) le modèle est adapté pour y intégré une fonction

1285 linéaire de la végétation :

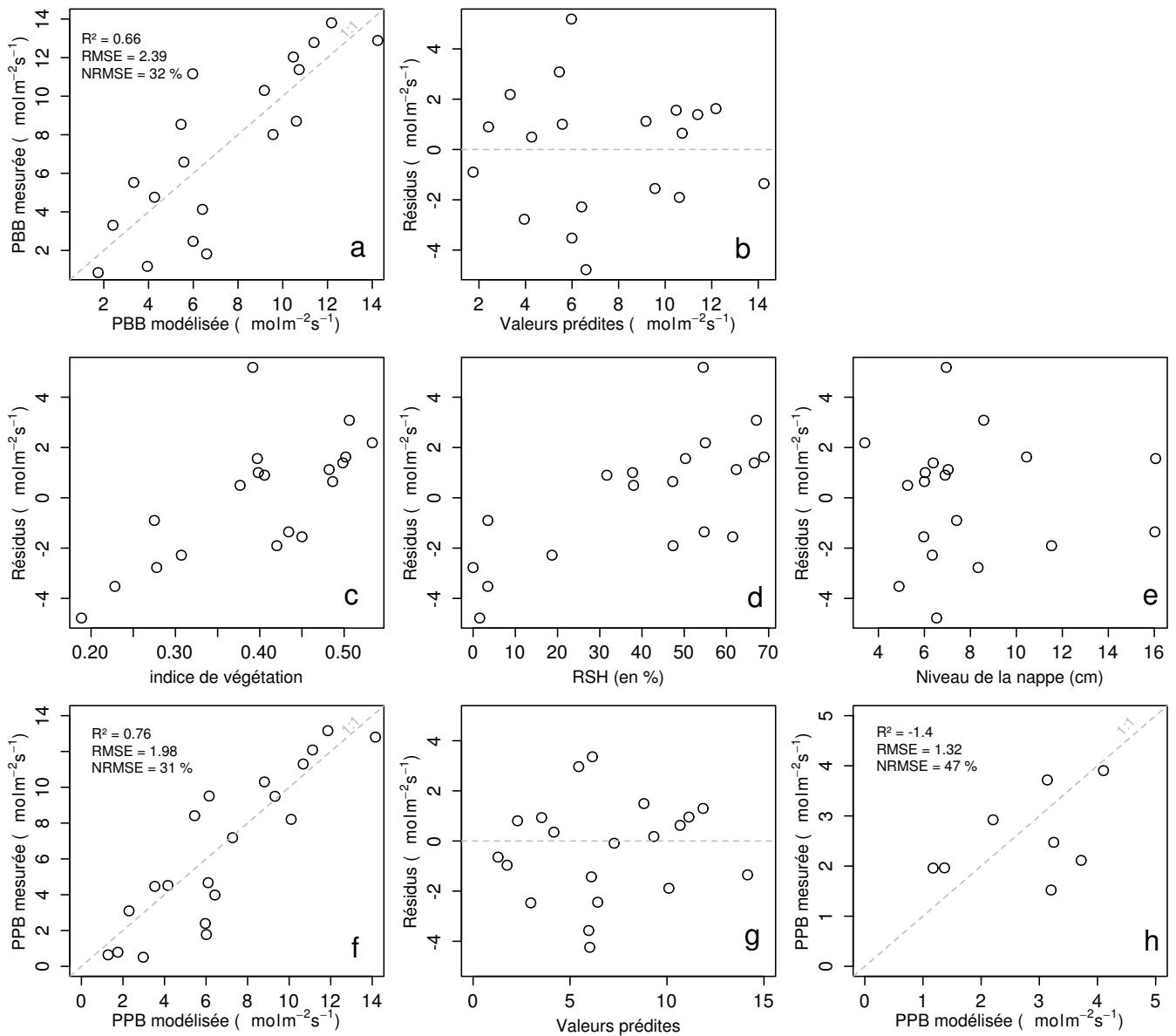


FIGURE 3.11 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.3

3.3. Résultats

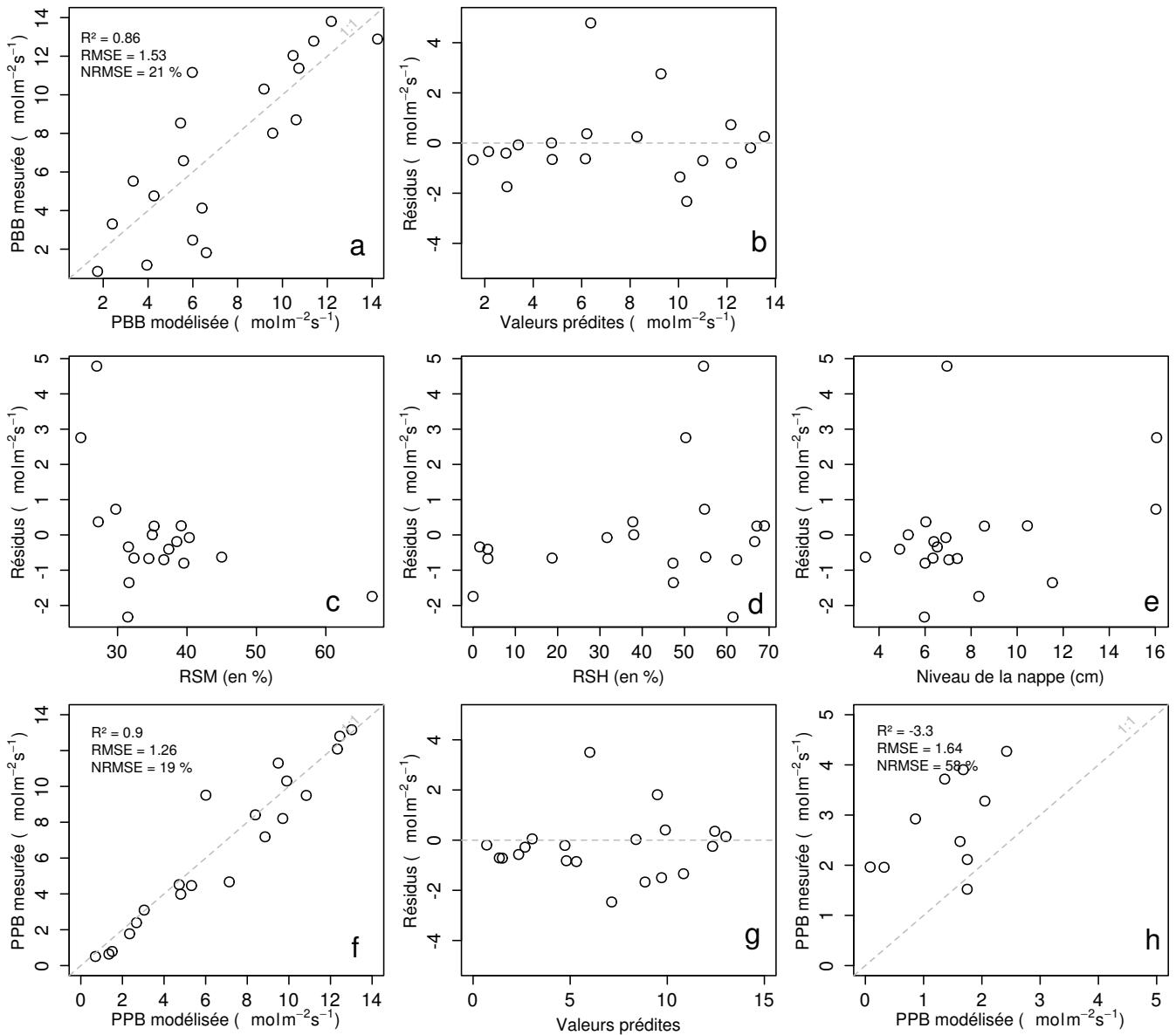


FIGURE 3.12 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.5

$$PPBsat = (a * IV + d) * \exp\left(\frac{T - b}{c}\right)^2 \quad (3.5)$$

1286 Cette nouvelle équation permet d'expliquer une part plus importante des varia-
 1287 tions de PPBsat ($R^2 = 0,85$) et augmente la proximité entre les données mesurées et
 1288 les données modélisées : l'erreur standard diminue à 21 %. (Figure 3.12-a). Les résidus
 1289 de cette équation semblent répartis de façon moins homogène que précédemment. On
 1290 observe notamment un resserrement des points autour de zéro à l'exception d'un point
 1291 de valeur supérieur à 4. Le biais reste malgré tout léger au regard de l'amélioration ap-

portée. Aucune tendance claire ne se dégage des résidus lorsqu'ils sont mis en relation avec des facteurs contrôlant tel que les recouvrements végétaux (sphagnes, herbacées), 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 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 3.3 et 3.4 sera nommé PPB-1 et celui utilisant les équations 3.5 et 3.4 sera nommée PPB-2.

La Respiration de l'Écosystème

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

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

La température de l'air utilisée dans un modèle exponentiel permet d'expliquer 90 % des variations de la respiration de l'écosystème avec une erreur standard de 18 % (Figure 3.13-a). Les résidus de cette équation semblent répartis de façon non-biaisée, pas de tendance dans le nuage de point (Figure 3.13-b). L'évaluation de ce modèle montre une erreur standard de 35 % avec une tendance à sous-estimer les valeurs mesurées. Une légère tendance, moins claire que pour la PPBsat, est visible entre les résidus et l'indice de végétation ainsi qu'avec le recouvrement de la strate herbacée. Très souvent utilisée, la température à -5 cm donne des résultats proche mais moins bons notamment avec une hétérosécédasticité des résidus (**Fig Annexe ? nope : M&M**). On adapte l'équation 3.6 pour intégrer le signal de végétation :

3.3. Résultats

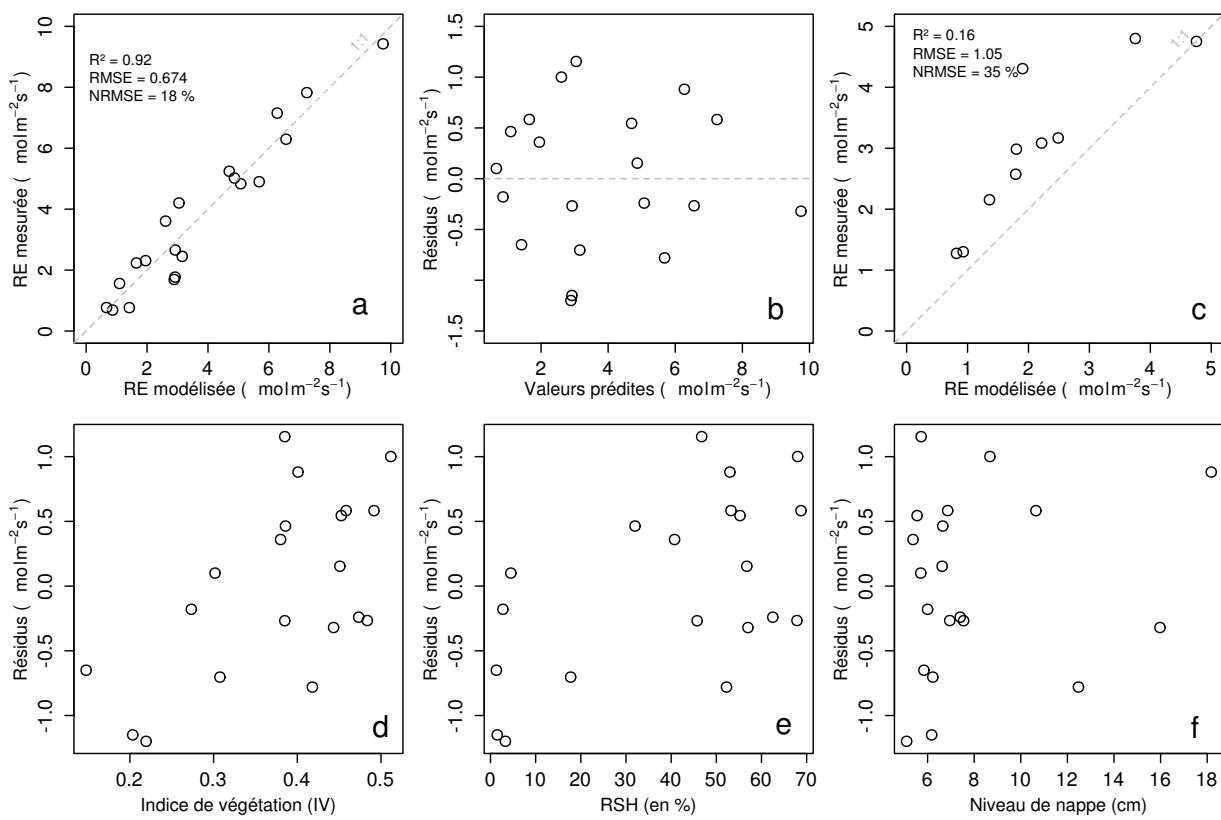


FIGURE 3.13 – RE modèles avec Tair

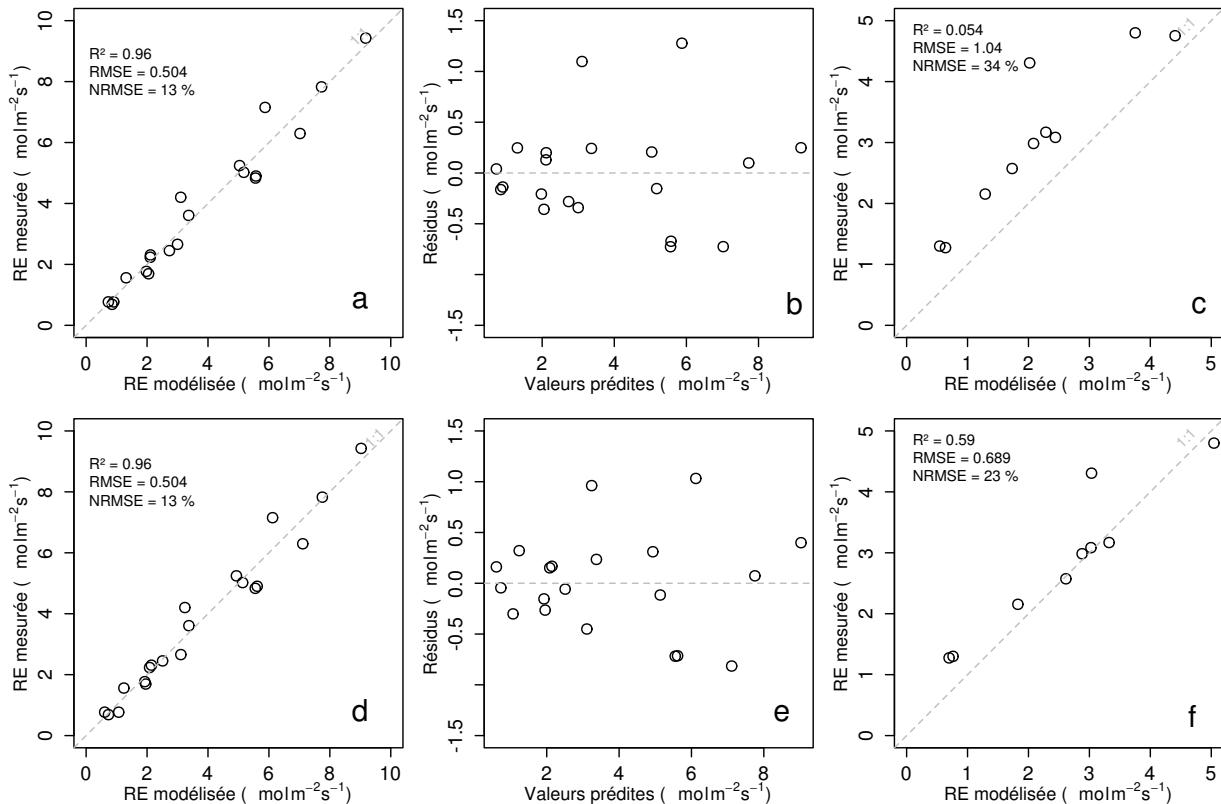


FIGURE 3.14 – RE modèles avec Tair

$$RE = (a * IV + c) * \exp(b * T) \quad (3.7)$$

$$RE = (a * H + c) * \exp(b * T) \quad (3.8)$$

1317 Les calibrations de ces nouvelles équations sont présentées dans la figure 3.13-a,b et
 1318 3.13-d,e respectivement. Dans les deux cas, l'erreur diminue pour avoisiner 13 %, avec
 1319 des résidus qui se répartissent de façon non-biaisée. L'évaluation de ces deux équations
 1320 montre cependant des différences : D'un côté l'équation 3.7 ne permet pas de diminuer
 1321 l'erreur standard qui vaut 34 %, et est donc très proche des 35 % calculé pour l'évalua-
 1322 tion du modèle n'intégrant pas la végétation. De l'autre l'évaluation de l'équation 3.8
 1323 montre une erreur standard plus faible s'établissant à 23 %. Les paramètres des diffé-
 1324 rentes équations sont présentés dans le tableau 3.1, les modèles RE-1, RE-2, et RE-3
 1325 correspondent respectivement aux équations 3.6, 3.7 et 3.8. À l'inverse de la PPB les
 1326 paramètres des modèles de la RE ont, à l'exception du paramètre c du modèle RE-2,
 1327 une significativité importante et une erreur standard faible.

1328 Le flux de CH₄

1329 Les relations entre les facteurs contrô-
 1330 lant mesurés et le CH₄ sont moins claires
 1331 que celles concernant le CO₂. La corréla-
 1332 tion la plus importante est liée à la végé-
 1333 tation (Figure 3.10). Le CH₄ ne montre pas
 1334 de tendance à augmenter de façon exponen-
 1335 tielle avec la température de l'air. Cepen-
 1336 dant cette relation se renforce d'autant plus
 1337 que l'on utilise des températures mesurées
 1338 à forte profondeur (Figure 3.15). Souvent
 1339 utilisée les températures proches du niveau

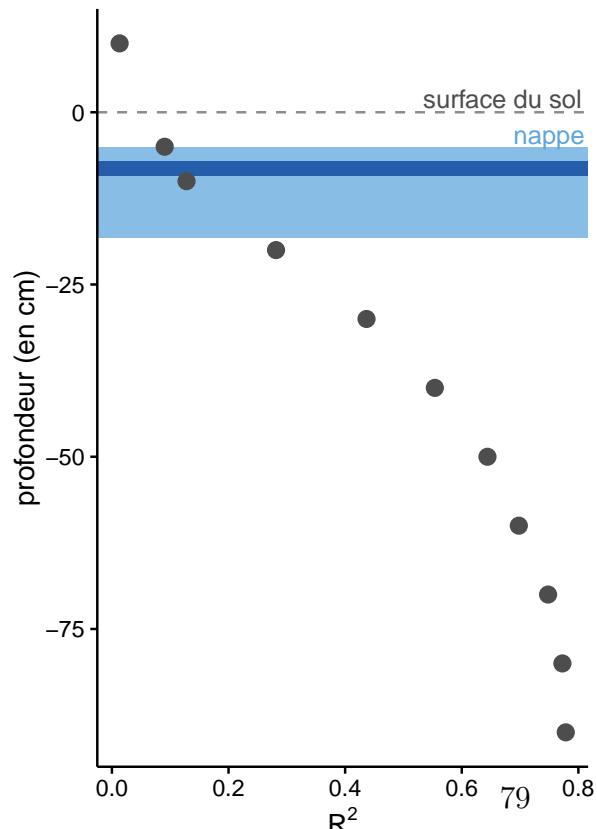


FIGURE 3.15 – Évolution du R² de l'équation RE = (a * H + c) * exp(b * T) en fonction de la profondeur

3.3. Résultats

1340 de nappe on des R^2 inférieur à 0,50. Au
1341 delà, les R^2 sont supérieurs à 0,50, mais l'en-
1342 semble des placettes n'est plus représenté,
1343 certaines placettes n'ayant pas une épaisseur
1344 de tourbe supérieure ou égale à 30 cm. Le
1345 CH_4 ne montre pas de relation particulière
1346 avec le niveau de la nappe. Les relations CH_4
1347 et végétation ont donc été modélisées avec :

$$F_{CH_4} = a * \exp(b * IV) \quad (3.9)$$

1348 Avec les données acquises, l'indice de végétation est le meilleur prédicteur (Fi-
1349 gure 3.16), il explique 78 % de la variabilité du CH_4 avec une erreur standard de 32 %.
1350 Aucune tendance ne semble se dégager entre les résidus de cette équation et les facteurs
1351 contrôlant mesurés. L'évaluation de cette équation montre une tendance à sous-estimer
1352 les flux de CH_4 et une erreur standard qui double par rapport à la phase de calibration
1353 en atteignant 68 %. Les détails de l'estimation des paramètres de l'équation 3.9 est
1354 visible dans le tableau 3.1 sous le nom FCH4.

1355 Le COD

1356 3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle 1357 de l'écosystème

1358 L'interpolation des flux de PPB montrent une variabilité saisonnière proche de
1359 celle mesurée sur le terrain (Figure 3.17). Les valeurs mesurées les plus grandes (partie
1360 supérieure de la barre rouge sur la figure 3.17) ne semblent pas atteinte par le modèle
1361 PPB-2 à l'inverse du modèle PPB-1 (courbes noires sur la figure 3.17). Dans les deux
1362 cas les modèles semblent sur-estimer la valeur de PPB mesurées fin 2014.

1363 Pour la RE, l'interpolation suit également les variations saisonnières mesurées men-
1364 suellement (Figure 3.18). Les gammes de valeurs mesurées sont très proche des gammes

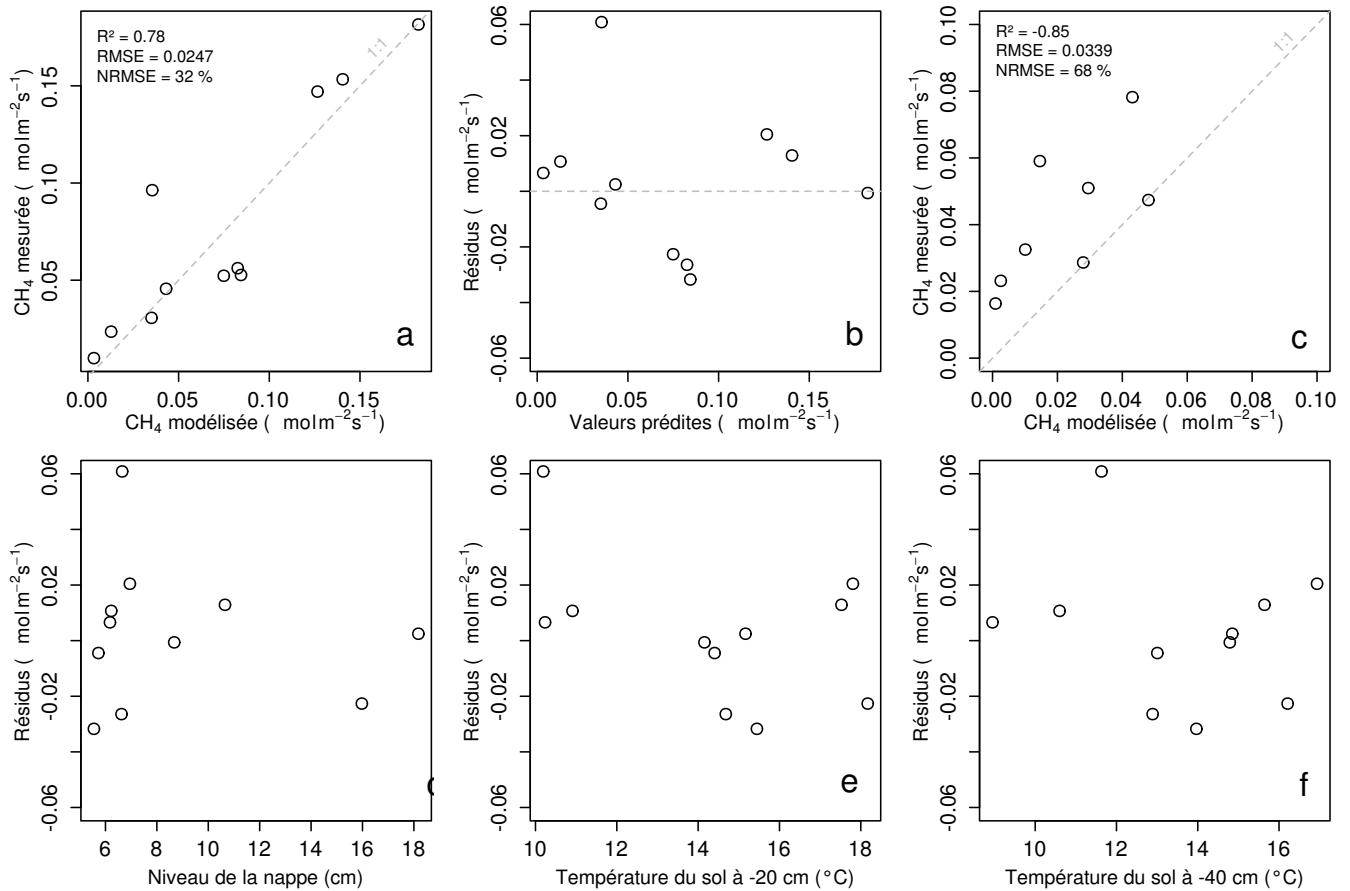

 FIGURE 3.16 – CH₄ modèle H

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 3.3 et 3.4 | | | | | | |
| 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 3.5 et 3.4 | | | | | | |
| 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 3.6 | | | | | | |
| a | 0.34 | 0.08 | 0 | -10 | +10 | |
| b | 0.10 | 0.01 | 0 | -22.6 | +29.9 | |
| RE-2 – équation 3.7 | | | | | | |
| 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 3.8 | | | | | | |
| 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 3.9 | | | | | | |
| a | 0 | 0 | 0.48 | -10 | +10 | |
| b | 13.01 | 2.82 | 0 | -43.9 | +79.2 | |

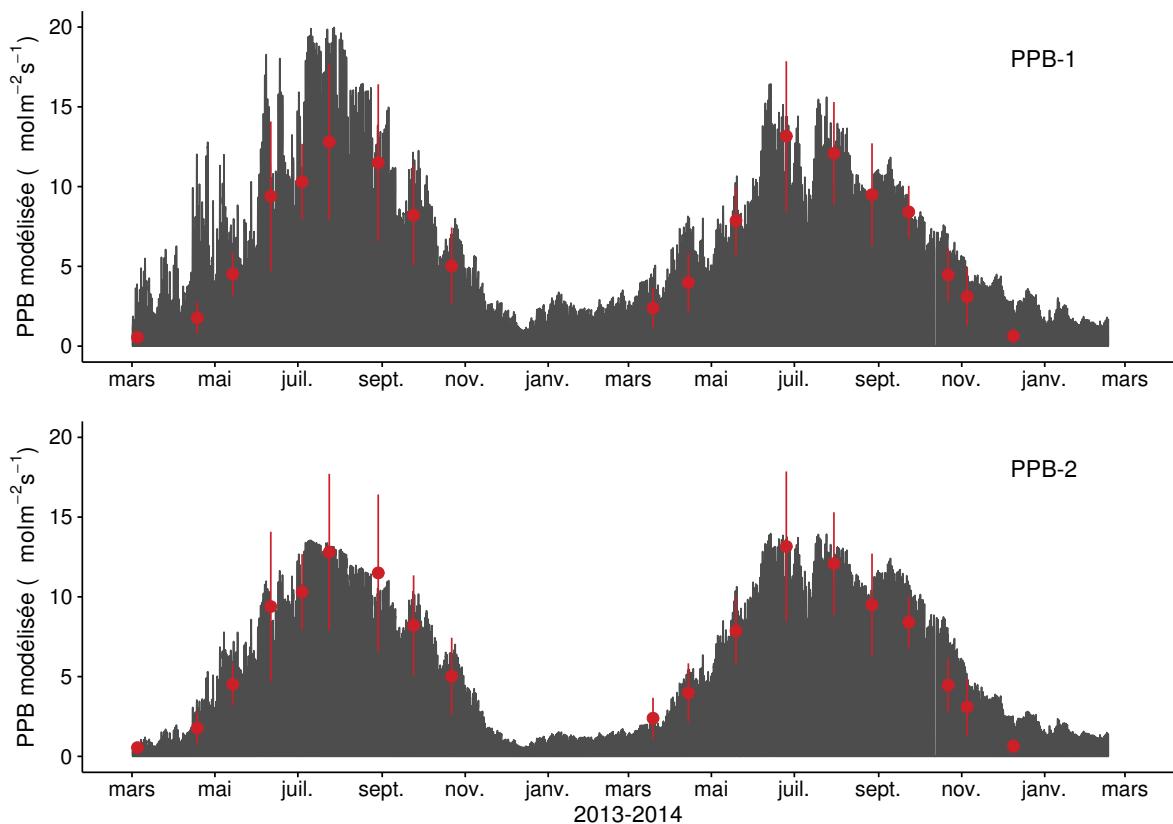


FIGURE 3.17 – Flux de CO₂ interpolé à l'heure à partir de PPB-1 (en haut) et PPB-2 (en bas). Les points rouges représentent les moyennes des mesures mensuelles et leur déviation standard

3.3. Résultats

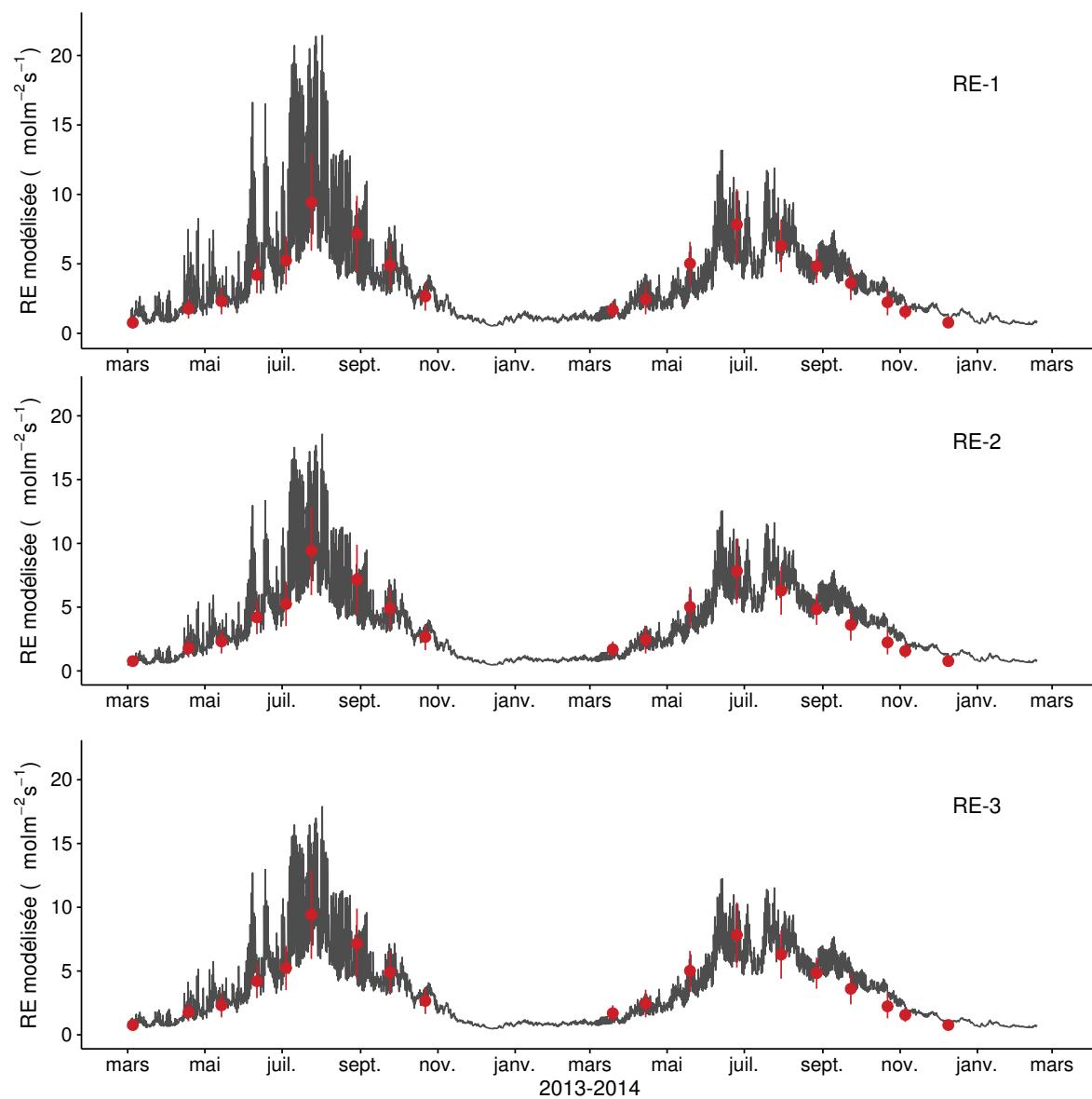


FIGURE 3.18 – Flux de CO₂ interpolé à l'heure à partir de RE-1 (en haut), RE-2 (au milieu) et RE-3 (en bas). Les points rouges représentent les moyennes des mesures mensuelles et leur déviation standard

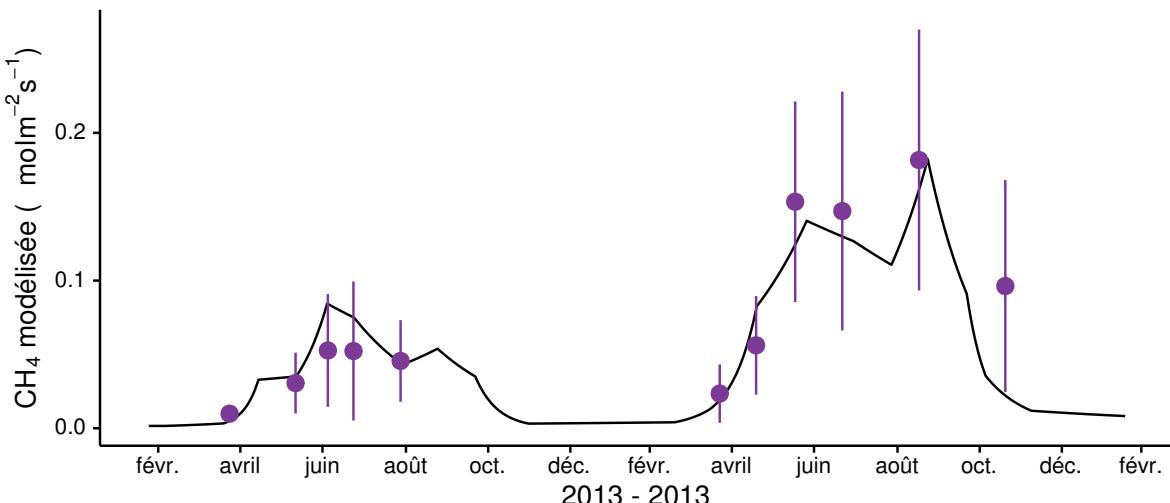


FIGURE 3.19 – Flux de CO_2 interpolé à partir de FCH4. Les points violettes représentent les moyennes des mesures mensuelles et leur déviation standard

interpolées : les valeurs interpolées fluctuent dans les limites des barres d'erreurs. L'interpolation des flux de la RE est très proche quel que soit le modèle utilisé (Figure 3.18). L'intégration de la végétation dans les modèles RE-2 et RE-3 diminue la RE maximum modélisée en 2013 par rapport au modèle RE-1.

Les flux de CH_4 interpolés (Figure 3.19), suivent également une cyclicité saisonnière. L'estimation du CH_4 semble rendre compte dans les grandes lignes de la différence de flux mesurée entre 2013 et 2014.

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

La différence de comportement, entre les années de mesures, liée à l'intégration de la végétation est également visible sur l'estimation de la RE. La prise en compte de la végétation (modèles RE-2 et RE-3) conduit à une respiration plus forte en 2014 qu'en

3.3. Résultats

Tableau 3.2 – Bilan annuel des flux, en $\text{gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, en fonction des modèles utilisés.

| ID | Flux | équation | 2013 | 2014 | moyen |
|-------|------|------------|----------------|----------------|----------------|
| PPB-1 | PPB | 3.3 et 3.4 | 1322 ± 410 | 1258 ± 390 | 1290 ± 400 |
| PPB-2 | | 3.5 et 3.4 | 957 ± 182 | 1184 ± 225 | 1070 ± 203 |
| RE-1 | RE | 3.6 | 1337 ± 241 | 1235 ± 222 | 1286 ± 231 |
| RE-2 | | 3.7 | 1232 ± 160 | 1310 ± 170 | 1271 ± 165 |
| RE-3 | | 3.8 | 1240 ± 161 | 1281 ± 167 | 1261 ± 164 |
| FCH4 | CH4 | 3.9 | 10 ± 3 | 24 ± 8 | 17 ± 5 |

Tableau 3.3 – Bilan de carbone annuel, en $\text{gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, en fonction des modèles utilisés. Les valeurs entre parenthèses représentent l'erreur associée au bilan

| combinaison de modèles | 2013 | 2014 | moyen |
|------------------------|---------------|---------------|---------------|
| PPB-1, RE-1, FCH4 | -25 ± 6 | -2 ± 0 | -14 ± 4 |
| PPB-1, RE-3, FCH4 | $+72 \pm 16$ | -48 ± 11 | $+12 \pm 3$ |
| PPB-2, RE-1, FCH4 | -390 ± 70 | -75 ± 14 | -233 ± 44 |
| PPB-2, RE-3, FCH4 | -293 ± 47 | -122 ± 20 | -208 ± 33 |

1384 2013 à l'inverse de RE-1. La différence entre l'estimation de la RE en 2013 et en 2014
 1385 diminue avec l'intégration de la végétation. Elle passe de 102 pour RE-1 à 78 puis
 1386 41 pour RE-2 et RE-3. Malgré ces différences, on observe une grande proximité dans
 1387 les valeurs des flux interpolés sur les 2 années, quel que soit le modèle, avec un écart
 1388 maximum de $25 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

1389 Les flux de CH₄ estimés ont une erreur importante et sont beaucoup plus faible que
 1390 les flux de la PPB ou de la RE. Le flux de CH₄ est au moins deux fois plus important
 1391 en 2014 qu'en 2013.

1392 Les bilans issus des différentes combinaisons de modèles (à l'exception de RE-3, non
 1393 présenté car très proche de RE-2) varient de $-233 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ à $+12 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$
 1394 stocké dans la tourbière (tableau 3.3). L'intégration de la végétation dans la modélisa-
 1395 tion de PPB fait baisser les bilans de carbone dans le négatif (système source) au-delà
 1396 de $-200 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, avec une différence entre les bilans de $220 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ environ.
 1397 La différence sur les bilans quand les modèles de RE utilisent ou non la végétation est
 1398 moindre : environ $26 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ (tableau 3.3).

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

1399 Évaluation du bilan

1400 L'analyse de sensibilité, consistant à faire varier chaque paramètre des modèles
 1401 de $\pm 10\%$, les combinaisons de modèles PPB-1, PPB-2, RE-1 et RE-3 ont été testé
 1402 (Tableau 3.4). Le modèle RE-2, très proche du modèle RE-3 n'a pas été testé. **Attente**
 1403 **du COD, les valeurs du tableau sont fausse pour le moment**

3.3.4 Variabilité spatiale du bilan

Calibration par groupe de placette

La classification hiérarchique a permis de distinguer 4 groupes de végétation (Figure 3.3). Dans le groupe Mousse, 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 groupe Mix est le plus homogène avec un recouvrement moyen des strates muscinales et arbustives de 63 et 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 Herbe avec un recouvrement moyen de 63 %, la strate arbustive y est peu présence (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 Arbuste (1 %). Groupe dans lequel la strate arbustive est majoritaire avec de 65 % de recouvrement moyen, et la strate herbacée avec 33 % (Figure 3.20). Les flux, calculés à partir des même équations que celles utilisées à l'échelle de l'écosystème entier, ont des erreurs plus importante : de 41 à 66 % pour RE-1 et RE-2 et de 39 à 65 % pour PPB-1 et PPB-2 (Tableau 3.5). Pour la RE les flux sont du même ordre de grandeur que ceux calculés avec l'ensemble des placettes, que ce soit pour RE-1 ou RE-2. Le groupe Mousse a, pour les deux modèles, un flux annuel plus faible que le flux calculé à l'échelle de l'écosystème. Le groupe Arbuste est, quant à lui, le plus proche des flux « écosystèmes » tandis que le groupe Mix est au dessus. L'estimation de la RE du groupe Herbe est supérieure a celle estimée à l'échelle de l'écosystème pour RE-1 et inférieure pour RE-3. La RE du groupe Mousse est inférieur aux autres groupes que ce soit pour RE-1 ou RE-3. Entre RE-1 et RE-3 les estimations du groupe Herbe diminue de façon importante (-338) alors qu'elles sont relativement similaire (± 50) pour les autres groupes. Pour la PPB, les estimations de PPB-1 sont systématiquement inférieures à celles réalisées à l'échelle de l'écosystème. Pour PPB-2 seul le groupe Herbe à une estimation supérieure. Les différences entre PPB-1 et PPB-2 sont plus importantes que celles observées pour RE, même si la plus grande différence (221) est observée pour

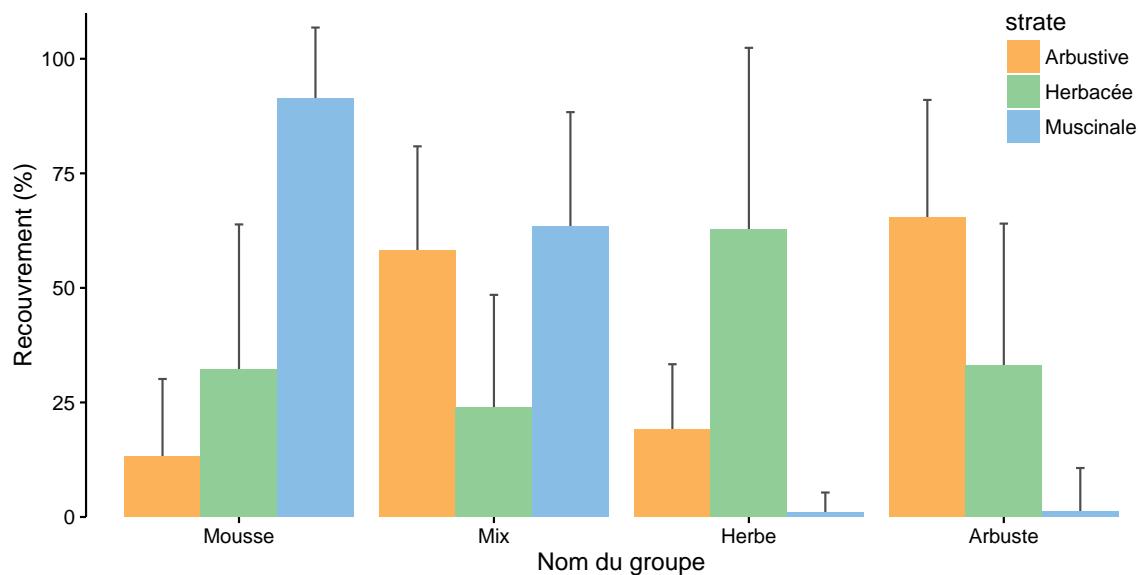


FIGURE 3.20 – Recouvrement végétal moyen par strate (en %) des 4 groupes, les groupes sont nommés en fonction de la végétation majoritaire. Les barres d'erreur représente la déviation standard.

1432 le même groupe, le groupe Herbe. Le groupe Mix cependant une différence du même
 1433 ordre de grandeur (189), tandis que pour les deux autres groupes cette différence est
 1434 plus faible (78 et 58 respectivement pour les groupes Mousse et Arbuste).

1435 En terme de bilan de CO₂, les groupes Arbuste et Mousse sont ceux qui sont le moins
 1436 impactés par le choix des modèles (Tableau 3.6). Quand la végétation n'est pas prise
 1437 en compte pour l'estimation de la RE (modèle RE-1), le groupe Mousse est celui dont
 1438 le bilan est le moins négatif. Quand la végétation est prise en compte (modèle RE-3)
 1439 c'est le groupe Herbe qui perd le moins de carbone (PPB-1, RE-3) voire qui en stocke
 1440 (PPB-2, RE-3). Les groupes Mix et Arbustes ont des valeurs de bilan généralement
 1441 proche quand la végétation n'est pas prise en compte dans l'estimation de la PPB.

1442 Calibration par placette

1443 Les modèles RE-1, RE-3 et PPB-2 ont pu être calibré par placette. Pour l'ensemble
 1444 de ces modèles on constate une forte hausse de la NRMSE (Figure 3.21 et 3.22).
 1445 Concernant la RE, les modèles RE-1 et RE-3 ont des valeurs de NRMSE relativement
 1446 proche d'environ 50 %, avec deux outliers pour RE-1 et un pour RE-3 (Figure 3.21). Les
 1447 paramètres varient dans des gammes similaires pour les deux modèles. Ces gammes sont

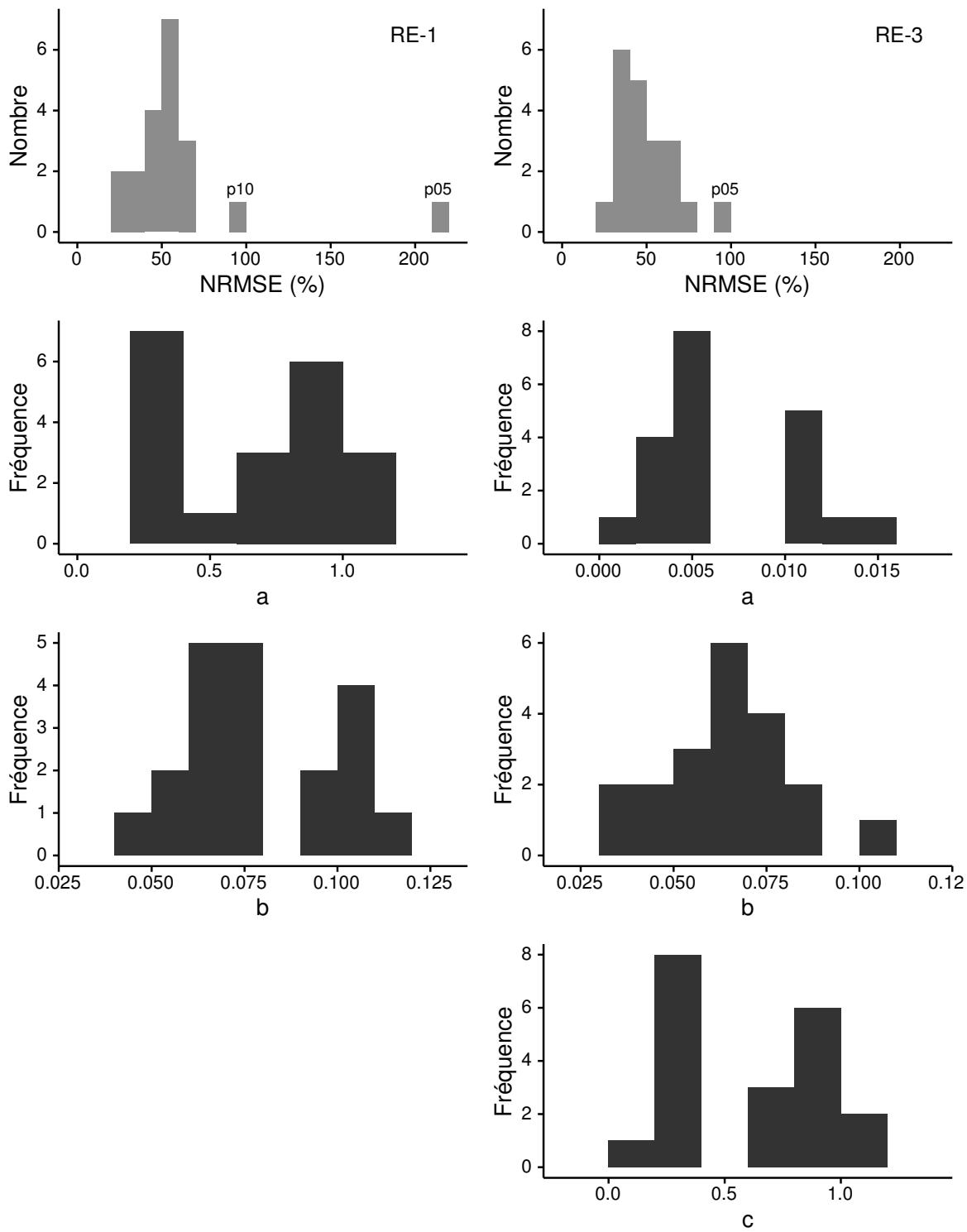


FIGURE 3.21 – Distribution de l'erreur standard (en gris) par placette et des paramètres des modèles RE-1 et RE-3 (en noir)

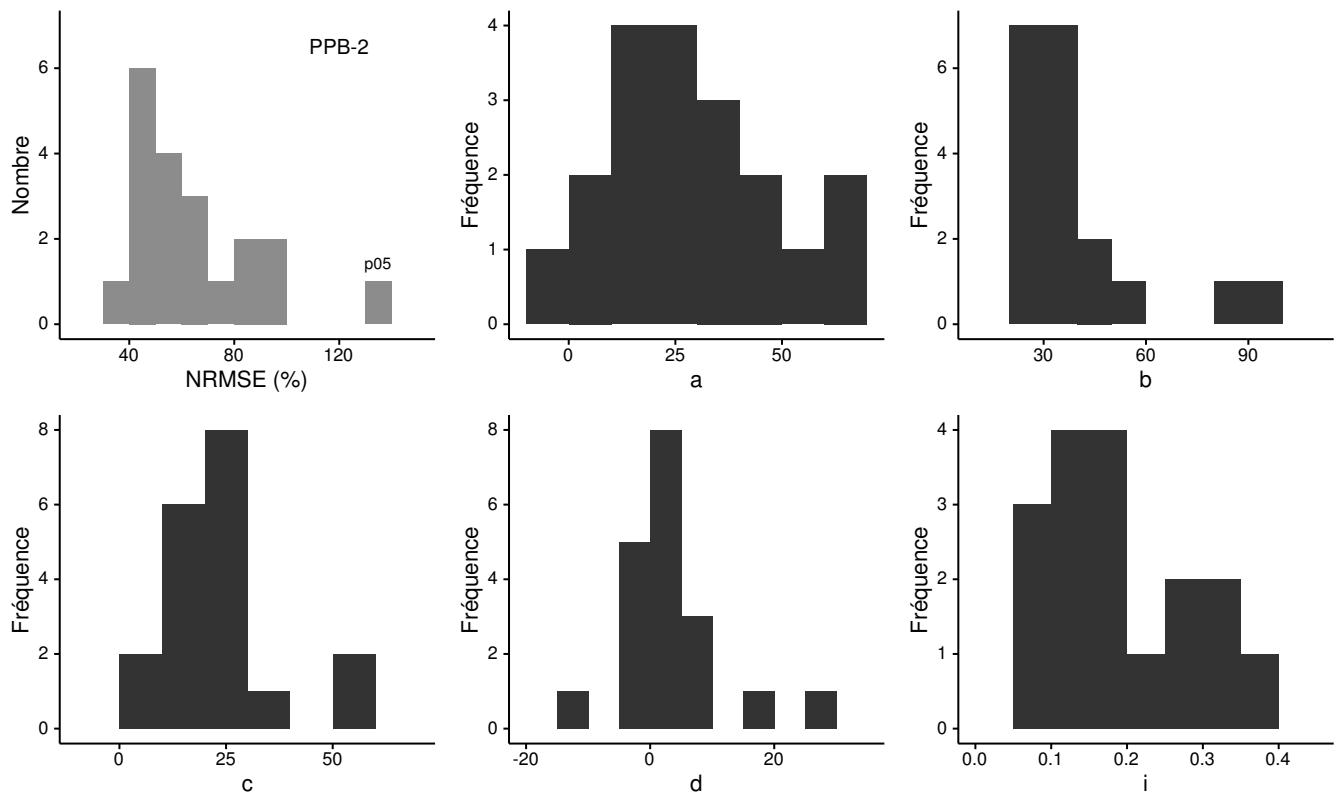


FIGURE 3.22 – Distribution de l'erreur standard par placette (en gris) et des paramètres du modèle PPB-2 (en noir)

Tableau 3.5 – Bilan des flux de CO₂ en gC m⁻² an⁻¹ interpolés par groupe de végétation avec les modèles RE-1 et RE-3 pour la respiration et les modèles PPB-1 et PPB-2 pour la photosynthèse. (Le modèle RE-2, très proche de RE-3 n'a pas été inclus)

| groupe | RE | | | PPB | | |
|---------|--------|----------------|-------|--------|----------------|-------|
| | valeur | R ² | NRMSE | valeur | R ² | NRMSE |
| RE-1 | | | | | | |
| Mousse | 975 | 0,22 | 66,48 | 886 | 0,42 | 56,54 |
| Mix | 1365 | 0,58 | 49,09 | 1065 | 0,56 | 43,70 |
| Herbe | 1453 | 0,56 | 50,93 | 1056 | 0,42 | 64,66 |
| Arbuste | 1237 | 0,49 | 47,02 | 895 | 0,31 | 58,86 |
| RE-3 | | | | | | |
| Mousse | 1023 | 0,68 | 42,91 | 808 | 0,58 | 47,92 |
| Mix | 1393 | 0,58 | 48,88 | 876 | 0,65 | 38,93 |
| Herbe | 1115 | 0,72 | 40,84 | 1277 | 0,65 | 50,30 |
| Arbuste | 1274 | 0,53 | 45,25 | 953 | 0,46 | 52,14 |
| PPB-1 | | | | | | |
| PPB-2 | | | | | | |

3.4. Discussion

Tableau 3.6 – Bilan de CO₂ par groupe de végétation (en gC m⁻² an⁻¹) avec différentes combinaison de modèles. La dernière colonne représente de bilan de CO₂ à l'échelle de l'écosystème.

| Modèles | Mousse | Mix | Herbe | Arbuste | Écosystème |
|-------------|--------|------|-------|---------|------------|
| PPB-1, RE-1 | -90 | -300 | -397 | -341 | +4 |
| PPB-1, RE-3 | -138 | -328 | -59 | -378 | +29 |
| PPB-2, RE-1 | -168 | -489 | -175 | -284 | -216 |
| PPB-2, RE-3 | -216 | -517 | +162 | -321 | -191 |

₁₄₄₈ larges et bien supérieure à 10 %. Concernant la PPB, le modèle PPB-2 a également
₁₄₄₉ une NRMSE importante, variant entre 40 et 100 % avec un outlier. Les valeurs des
₁₄₅₀ paramètres varient également de façon importante (Figure 3.22).

₁₄₅₁ 3.4 Discussion

₁₄₅₂ La discussion de ce chapitre, s'articule autour de quatre parties. La première concerne
₁₄₅₃ les modèles calibrés à l'échelle de l'écosystème, leurs différences leurs qualités respec-
₁₄₅₄ tives. La seconde détaille les différents flux estimés par ces modèles. Le(s) bilan(s) de
₁₄₅₅ carbone issu(s) de ces flux sont exposés dans la troisième partie. Enfin la quatrième
₁₄₅₆ discute des éléments concernant la variabilité spatiale des flux.

₁₄₅₇ 3.4.1 Modèles à l'échelle de l'écosystème

₁₄₅₈ PPB

₁₄₅₉ À l'inverse du modèle PPB-2, le modèle PPB-1 ne prend pas en compte de façon
₁₄₆₀ directe la végétation. L'estimation des paramètres de PPB-1 conduit à une incertitude
₁₄₆₁ forte : supérieure à 60 % pour les paramètres *a* et *b* et à 20 % pour les paramètres *c*
₁₄₆₂ et *i* (Tableau 3.1). Cette incertitude diminue pour PPB-2 avec l'intégration de l'IV,
₁₄₆₃ passant sous les 20 % pour l'ensemble des paramètres. Ces paramètres sont dans la
₁₄₆₄ gamme de ceux rapportés par June *et al.* (2004) : entre 23 et 296,5 µmole⁻¹ m⁻² s⁻¹

pour la vitesse de transport des électrons photosynthétique à lumière saturante, entre 28,4 et 55,7 °C pour la température optimale du transport et entre 13,9 et 30,2 °C pour la différence de température à laquelle PPBsat vaut e^{-1} . Lors de la phase de calibration, l'intégration de l'IV augmente la significativité des estimations et la représentativité des données mesurées.

Lors de l'évaluation cependant, l'augmentation de l'erreur du modèle PPB-2, intégrant l'IV, est supérieure et dépasse (en valeur absolue) celle du modèle PPB-1. L'apport de l'IV dans l'estimation de la PPB n'est donc pas généralisable. Par ailleurs, l'intégration de l'indice de végétation à un effet beaucoup plus important en 2013, avec un flux qui diminue de $365 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, qu'en 2014 où la baisse n'est que de $74 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$. La prise en compte de la végétation, si elle améliore les incertitudes statistiques du modèles, semblent sous-estimer la PPB. En effet le modèle PPB-2 ne rend pas compte des valeurs les plus élevées qui ont été mesurées (Figure 3.17-B). Par ailleurs l'évaluation du modèle PPB-1 renvoie un erreur plus faible que celle du modèle PPB-2.

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

L'intégration de la végétation aux modèles d'estimation de la PPB est rarement réalisé (Bortoluzzi *et al.*, 2006; Görres *et al.*, 2014), probablement à cause de la difficulté à prendre en compte ce signal. La diversité des espèces végétales rend difficile la mise en place de protocole de suivi non-destructif généralisable à un grand nombre d'espèces.

3.4. Discussion

1491 RE

1492 À l'inverse de la PPB, l'intégration de la végétation pour modéliser la RE n'améliore
1493 que peu l'estimation de la RE lors de la phase de calibration : la différence entre les
1494 valeurs d'erreur standard est de 5 % (Figures 3.13 et 3.14). En revanche lors de la phase
1495 d'évaluation, l'utilisation du recouvrement des herbacées semble améliorer l'estimation
1496 de façon plus importante avec une différence de 11 % entre les valeurs d'erreur standard.
1497 Contrairement à la PPB la différence apportée par l'intégration de la végétation (RE-2
1498 ou RE-3) est du même ordre de grandeur en 2013 et en 2014. Sur les 2 années, l'effet
1499 de l'intégration de la végétation est limité avec une différence de $25 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ au
1500 maximum (entre RE-1 et RE-3), soit moins de 2 % du flux. Encore une fois l'intérêt
1501 de l'évaluation est mis en avant puisqu'il permet de distinguer des modèles très proche
1502 lors de la calibration.

1503 Les incertitudes sur l'estimation des paramètres RE sont beaucoup moins impor-
1504 tante que celle de la PPB. L'estimation des paramètres des modèles, à l'exception du
1505 paramètre c du modèles RE-2, ont une p-value inférieure à 0.05 (Tableau 3.1). L'erreur
1506 calculée lors de l'évaluation de ces modèles, si elle augmente par rapport à la cali-
1507 bration, reste faible particulièrement pour le modèle RE-3 où elle vaut moins de 25 %
1508 (Figure 3.14-f). La RE semble donc mieux contrainte que la PPB, avec une estimation
1509 des paramètres plus fiable et une différence entre les estimations issues des modèles
1510 plus limitée.

1511 F_{CH_4}

1512 La calibration des flux de CH_4 conduit à une erreur du même ordre de grandeur
1513 que celle obtenue pour PPB-1 (Figure 3.16). Cependant lors de l'évaluation l'erreur
1514 double montrant que ce résultat est spécifique à l'expérimentation.

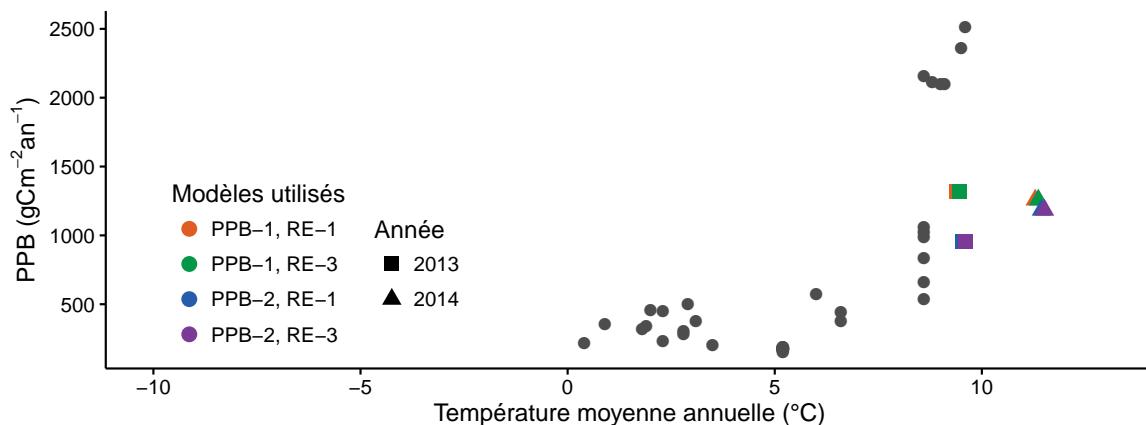


FIGURE 3.23 – Relation entre la production primaire brute (PPB) et la température moyenne annuelle (en °C) dans la littérature (en gris) et pour ces travaux.

1515 3.4.2 Les flux annuels à l'échelle de la tourbière de La Guette

1516 La PPB

1517 L'estimation des flux de PPB, est comprise entre 957 et $1322 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ selon
 1518 l'année et le modèle utilisé. Ces valeurs sont fortes, en comparaison la PPB estimée
 1519 par [Trudeau *et al.* \(2014\)](#) ou [Peichl *et al.* \(2014\)](#) dans des tourbières boréales sont
 1520 respectivement comprises 123 et $131 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ et entre 203 et $503 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$.
 1521 C'est d'ailleurs dans ces gammes de valeurs, inférieures à celles relevées sur la tourbière
 1522 de La Guette, que sont comprises la majorité des estimations (Figure 3.23).

1523 Une première hypothèse permettant d'expliquer une telle différence, est la différence
 1524 entre les températures moyennes sur les sites. $-4,3^\circ\text{C}$ et $1,2^\circ\text{C}$ respectivement pour
 1525 [Trudeau *et al.* \(2014\)](#) et [Peichl *et al.* \(2014\)](#). Ces températures sont bien plus faible
 1526 pour ces sites que sur la tourbière de La Guette. D'autres études faite à des latitudes
 1527 plus basse et des températures moyennes annuelles plus forte, montrent des estimation
 1528 de la PPB plus proche de celles estimées sur la tourbière de La Guette. Entre 534 et
 1529 $1058 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ par exemple pour [Beyer *et al.* \(2015\)](#), sur un site dont la température
 1530 moyenne annuelle est de $8,6^\circ\text{C}$ et avec une végétation proche de celle observée à La
 1531 Guette (*Molinia*, *Eriophorum Augustifolium*, *Sphagnum* spp.).

1532 Une part de l'explication de la force de la PPB observée peut d'ailleurs être liée à la
 1533 composition végétale du site. Ainsi [Jacobs *et al.* \(2007\)](#) étudiant des prairies tourbeuses

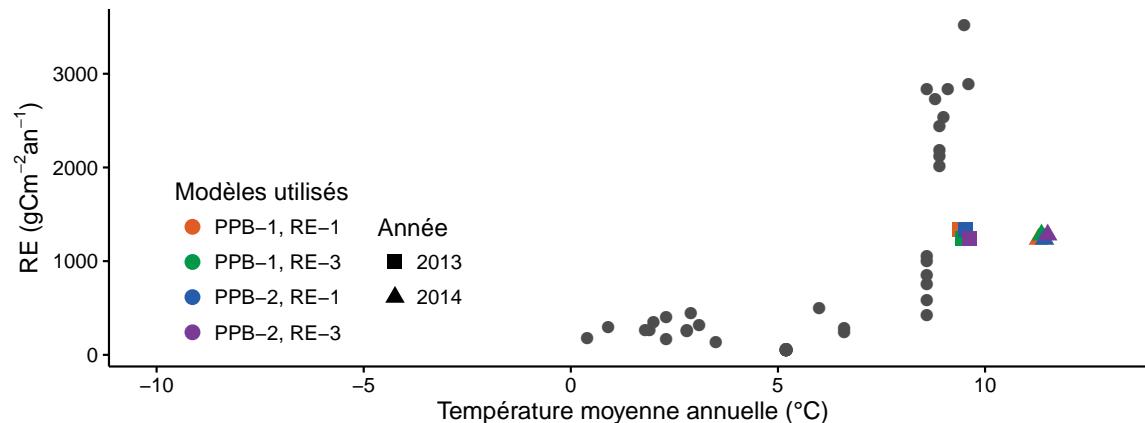


FIGURE 3.24 – Relation entre la respiration de l'écosystème (RE) et la température moyenne annuelle (en °C) dans la littérature (en gris) et pour ces travaux.

hollandaises, estiment des valeurs de PPB comprises entre 400 et $2000 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ avec une moyenne de $1300 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$. Sur des écosystèmes similaires, au Danemark, Görres *et al.* (2014) trouve des valeurs de PPB plus importantes encore, entre 1555 et $2590 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$, mais avec des niveaux de nappe plus faible ($< -30 \text{ cm}$). La tourbière de La Guette est envahie par une végétation vasculaire, notamment herbacée, la comparer à une prairie tourbeuse n'est donc pas moins pertinent que la comparer à une tourbière boréale, ou située à plus haute latitude. Dans ces deux cas les valeurs de PPB observé sont bien plus fort que ceux de la tourbière de La Guette. Il semble cohérent que les valeurs de la PPB de la tourbières de La Guette soit plus forte que celle mesurées dans des tourbières boréales, de par sa position géographique, elle subit un climat moins dur avec des hivers moins longs et froids et plus faible que celle mesurées dans des tourbières utilisées comme prairies permanentes.

La RE

Les observations sur l'intensité des flux de la PPB sont également valables pour la respiration : la RE estimée sur la tourbière de La Guette est plus forte que celles mesurées sur les tourbières boréales et plus faible que celles mesurées sur des prairies tourbeuses. La RE estimée sur la tourbière de La Guette est comprise entre 1232 et $1337 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ selon l'année et le modèle considéré (Figure 3.24). La comparaison de ces valeurs à celles des études citées précédemment pour la PPB montre qu'elles

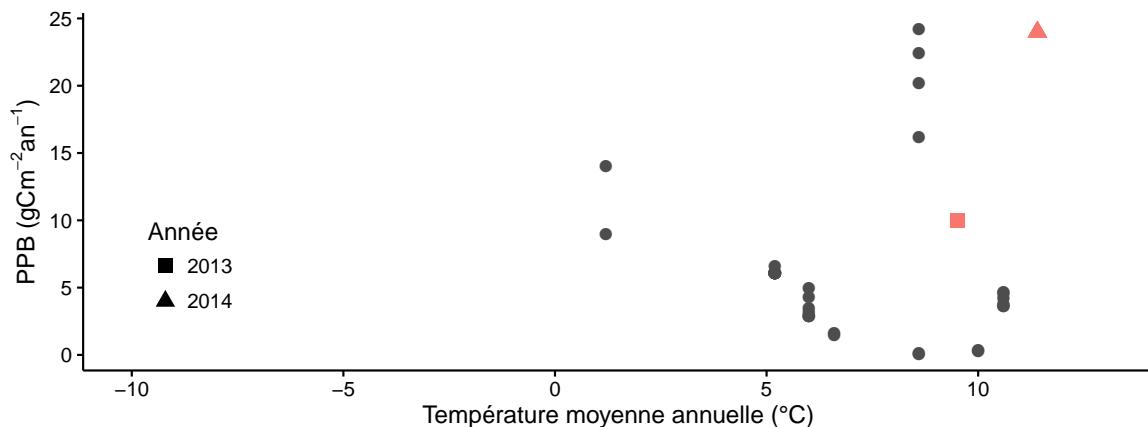


FIGURE 3.25 – Relation entre les flux de CH₄ et la température moyenne annuelle (en °C) dans la littérature (en gris) et pour ces travaux.

sont plus forte que celles mesurées par Peichl *et al.* (2014); Trudeau *et al.* (2014) (137 à 443 gC m⁻² an⁻¹ et 206 à 234 gC m⁻² an⁻¹ respectivement). Ensuite elles s'approchent des valeurs mesurées par Beyer *et al.* (2015) (585 à 1052 gC m⁻² an⁻¹) et enfin elles sont plus faibles que celles mesurées par Jacobs *et al.* (2007) ou Görres *et al.* (2014) (500 à 2000 gC m⁻² an⁻¹ et 2070 et 3500 gC m⁻² an⁻¹ respectivement). Comme pour la PPB, la température et la composition végétale des sites sont des explications possibles à ces observations.

F_{CH_4}

Comparés aux flux de CO₂, les flux de CH₄ mesurés sur la tourbière de La Guette sont faibles : deux ordres de grandeur inférieurs. Ces flux sont dans la gammes de valeurs présente dans la littérature (Figure 3.25). Pour 2013 les valeurs mesurées sont proches de celle mesurée par Nilsson *et al.* (2008) (entre 9 et 14 gC m⁻² an⁻¹). Plus généralement, Nilsson *et al.* (2001) estiment les émissions des tourbières suédoises entre 1,5 et 40 gC m⁻² an⁻¹. L'absence d'étiage en 2014 explique peut-être le doublement des flux en minimisant la zone aérobie et les possibilités d'oxydation du CH₄ (Lai, 2009). Les faibles variations du niveau de nappe sont probablement à l'origine de l'absence de relation entre ce dernier et les flux de CH₄. Ces observations vont dans le même sens que les observations faites par Trudeau *et al.* (2012) et (à développer, de ref ds trudeau2012)

1572 **Le COD**1573 **3.4.3 Estimations du bilan net de l'écosystème à l'échelle de la
1574 tourbière de La Guette**

1575 D'une manière générale, les bilans sont principalement contraints par les flux de
1576 CO₂, le CH₄ ne jouant qu'un rôle marginal en termes de quantité de carbone. Ces ob-
1577 servations sont cohérentes avec d'autres études comme [Bortoluzzi et al. \(2006\)](#); [Worrall](#)
1578 *et al.* ([2009](#)). Malgré tout si le CH₄ ne semble pas jouer un rôle majeur sur le bilan de
1579 carbone de la tourbière de La Guette, il faut cependant considérer le fait que seul le
1580 flux diffusif de CH₄ a pu être mesuré et estimé (C'est également le cas pour les études
1581 citées précédemment). Les émissions de méthane par ébullition sont donc exclues du
1582 bilan. Rarement estimé ce flux peut représenter 17 à 66 % d'une émission ([Gogo et al.](#),
1583 [2011](#); [Christensen et al.](#), [2003](#)), et être potentiellement très fort : plus de 35 gC m⁻²
1584 par événement [Glaser et Chanton \(2009\)](#). La présence de végétaux vasculaires qui en
1585 transportant le CH₄ dans l'atmosphère diminuent la concentration en CH₄ dans le sol
1586 tendraient cependant à diminuer ce phénomène ([Chanton, 2005](#)).

1587 La forte variabilité entre les différents bilans est à attribuer en grande majorité à
1588 l'erreur sur l'estimation du flux de PPB.

1589 Les bilans annuels ont des comportements différents en 2013 et en 2014. En 2013
1590 l'écart entre les deux estimations les plus extrêmes est de 462 gC m⁻². Cet écart est
1591 lié principalement à la prise en compte de la végétation (utilisation de PPB-2 au lieu
1592 de PPB-1). En comparaison l'écart observé entre estimations extrêmes est quatre fois
1593 plus faible en 2014 (120 gC m⁻²).

1594 Selon le bilan considéré, la tourbière de La Guette stocke de faible quantité de
1595 C de l'ordre d'une dizaine de grammes par mètre carré, ou émet du carbone dans
1596 l'atmosphère de l'ordre de 14 à de 233 gC m⁻² an⁻¹. Ces valeurs, si on les compare à
1597 celle mesurées dans des prairies tourbeuses, ne sont pas aberrante en valeur absolue
1598 (Figure [3.26](#)). Elle reste cependant sujette à caution. En effet il est probable que le
1599 modèle PPB-2 sous-estime la PPB et donc sur-estime les pertes de carbone par la

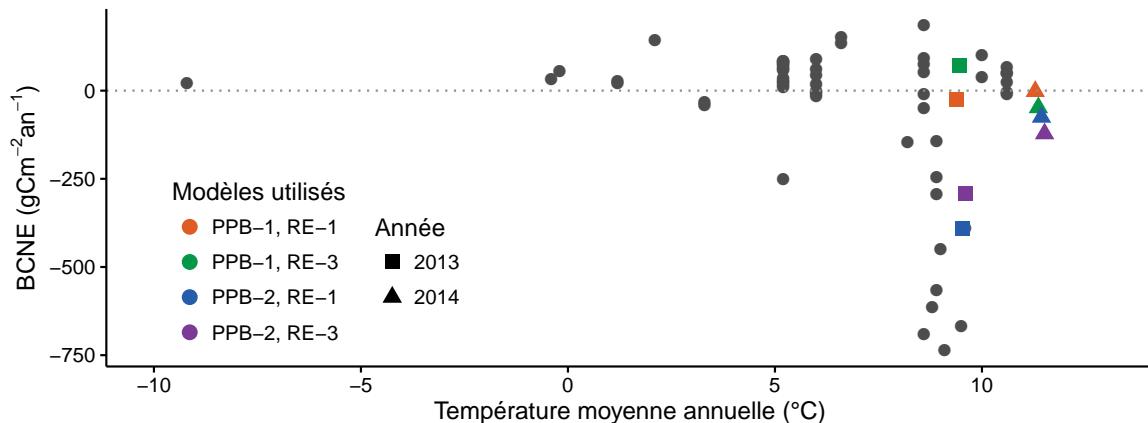


FIGURE 3.26 – Relation entre le bilan de carbone net de l'écosystème (BCNE) et la température moyenne annuelle (en °C) dans la littérature (en gris) et pour ces travaux. La ligne de tirets sépare les écosystèmes stockant du carbone (au dessus) de ceux libérant du carbone (en dessous).

tourbière. Les modèles utilisant PPB-1 sont plus proches les uns des autres et semble indiquer que, si la tourbière semble fonctionner plutôt comme une source de carbone, c'est de façon plus légère. Ce constat est également cohérent avec les observations de terrain, qui montre un niveau de nappe particulièrement élevé pendant les deux années de mesure en comparaison avec les précédentes.

Pour résumer, il est probable que la tourbière de La Guette fonctionne actuellement plutôt comme une légère source de carbone.

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 pour les années 2013 et 2014, mais que son utilisation dans d'autres conditions (année sèche, haute MAT) est fortement limitée. L'importance faible du CH₄ dans le bilan de carbone de la tourbière rend ces erreurs moins critiques que celles faites sur l'estimation de la PPB. Les incertitudes importantes sur la PPB, sont mises en évidence par les fortes variations 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

3.4. Discussion

des paramètres du modèle, mais cet apport n'est pas reflété par l'évaluation, malgré la similarité de la végétation. À l'inverse la RE est bien contrainte. Sur les 2 années la différence entre les différentes équations utilisées ne dépassent pas $25 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$.

sensibilité du bilan au variation des paramètres

Outre ces aspects ce bilan de carbone est aussi limité par sa représentativité. Ainsi la strate arborée fortement présente dans certaines zones n'est pas directement prise en compte. De la même manière une partie restreinte de la tourbière mais néanmoins présente est constitué de touradons dont l'effet n'a pas été pris en compte.

3.4.4 Variabilité spatiale sur la tourbière de La Guette

La végétation

Si quelques placettes proche géographiquement ont des recouvrement végétaux voisins (les placettes p18 et p19 ; p02, p03 et p04 ; p12, p14 et p16) les autres ne présentent pas un tel lien. Par ailleurs, au sein d'une même classe peuvent être rassemblées des placettes très éloignées spatialement, les placette p01 et p15 par exemple ou les placettes p02 et p17 ou p09 et p20. Ceci montre une variabilité spatiale importante du recouvrement végétal mais également que cette variabilité ne semble pas zonée géographiquement, selon un gradient quelconque.

Effet du type de végétation majoritaire sur les flux de CO₂ et le bilan de CO₂

Le calcul des bilans avec les différents groupes de végétation permet de mettre en évidence des comportements différents des flux selon la végétation majoritaire. Ainsi le groupe 3 dans lequel la strate herbacée est la plus importante est celui où la PPB est la plus forte. Ce point semble en cohérence avec la croissance annuelle importante des herbacées visible sur le terrain. Mais également car la présence d'un Aérenchyme permet à la molinie et à la linaigrette d'alimenter leurs racines en oxygène malgré un niveau de nappe très élevé ([Taylor et al., 2001; ?](#)). À l'inverse le groupe 1 dans lequel

₁₆₄₄ la strate muscinale est la plus importante est également le groupe pour lequel la PPB
₁₆₄₅ est la plus faible. (**Réf needed**)

₁₆₄₆ Pour la RE, ce sont les groupes 3 et 4 qui ont les flux estimés les plus importants
₁₆₄₇ avec une différence d'environ $200 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ avec les deux autres groupes. Malgré
₁₆₄₈ leurs différences, le groupe 2 possède une strate muscinale importante alors qu'elle est
₁₆₄₉ absente dans le groupe 3, ils ont en commun d'avoir une strate arbustive importante.

₁₆₅₀ 3.4.5 Représentativité locale du modèle

₁₆₅₁ Distribution des paramètres

₁₆₅₂ Pourquoi certaines placette mieux que d'autres

₁₆₅₃ Concernant la respiration la représentativité locale des modèles calibrés à l'échelle
₁₆₅₄ de l'écosystème semble plus homogène pour le modèle RE-3 que pour le modèle RE-1.

₁₆₅₅ Une telle comparaison entre PPB-1 et PPB-2 n'a pas été possible car vu le faible
₁₆₅₆ nombre de données et la qualité relative des modèles PPB par rapport aux modèles
₁₆₅₇ RE, peu de modèles sont parvenus à converger pour PPB-1 (11 sur 20 placettes) et
₁₆₅₈ pour PPB-2 (17 sur 20 placettes).

1659 CHAPITRE 4

1660 EFFETS DE L'HYDROLOGIE SUR LES FLUX DE GES

1661

| | | |
|------|--|-----|
| 1662 | 4.1 Introduction | 104 |
| 1663 | 4.2 Procédure expérimentale | 106 |
| 1664 | 4.2.1 Expérimentation A | 106 |
| 1665 | 4.2.2 Expérimentation B | 107 |
| 1666 | 4.2.3 Analyse des données | 107 |
| 1667 | 4.3 Résultats | 110 |
| 1668 | 4.3.1 Expérimentation A | 110 |
| 1669 | 4.3.2 Expérimentation B | 114 |
| 1670 | 4.3.3 tendances générales | 117 |
| 1671 | 4.4 Discussion | 117 |
| 1672 | 4.4.1 Comparaison aux mesures <i>in-situ</i> | 117 |
| 1673 | 4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de gaz | 120 |
| 1674 | 4.4.3 Effet cycles multiples | 121 |
| 1675 | | |
| 1676 | | |
| 1677 | | |

1678 4.1 Introduction

1679 Au cours des deux années de suivis des flux de CO₂ et de CH₄ sur la tourbière de La
1680 Guette, le niveau de la nappe a très faiblement varié comparé aux années précédentes
1681 bien plus sèches. En conséquence l'effet des variations de nappe sur les flux n'a pu être
1682 investigué. Néanmoins l'hydrologie est un facteur contrôlant des flux (**Réf needed**).
1683 Ainsi de nombreuses études ont reliées les émissions de CO₂ au niveau de la nappe (**Réf
1684 needed**). Cependant, aucun consensus n'a encore été atteint : La majorité des études
1685 montrent qu'une tourbière dont le niveau de la nappe est abaissé, soit par un drainage,
1686 soit par une sécheresse, aura tendance à avoir un ENE plus faible. Par exemple, [Strack
1687 et Zuback \(2013\)](#) expliquent des valeurs d'ENE plus faibles qu'escompté, par des me-
1688 sures faites pendant une période relativement sèche. Une observation similaire est faite
1689 par [Aurela et al. \(2007\)](#) qui mesure un ENE plus faible lors d'une année sèche, sur une
1690 tourbière à Carex du sud de la Finlande. Ils attribuent la variation de l'ENE à une
1691 augmentation de la RE et à une baisse de la PPB, dans des conditions plus chaudes
1692 et plus sèches. [Peichl et al. \(2014\)](#) observent également une baisse de l'ENE lors d'une
1693 année où le niveau de la nappe baisse de façon importante, au delà de -30 cm. Ils ex-
1694 pliquent cette baisse par une baisse de la PPB. Cette observation va dans le même sens
1695 que [Lund et al. \(2012\)](#) qui observent en 2008 une baisse de l'ENE sur une tourbière
1696 à sphaignes située au sud de la suède. Les mesures de RE faites cette année là étant
1697 similaires à celles effectuées les autres années, ils lient cette baisse à une diminution de
1698 la PPB. En 2006, sur la même tourbière, [Lund et al. \(2012\)](#) observent une autre baisse
1699 de l'ENE. Mais cette fois, les mesures de PPB à leur tour similaires à celle des autres
1700 années n'expliquent pas cette baisse. À l'inverse de 2008, cette baisse est expliquée par
1701 une augmentation de la RE. Ces inconsistances apparentes peuvent avoir pour origine
1702 des types de sécheresse différente : courte et intense pendant la saison de végétation
1703 de 2006 et d'intensité plus faible mais d'une durée plus longue en 2008. À l'inverse des
1704 résultats précédemment cités, [Ballantyne et al. \(2014\)](#) dans une étude des effets à long

1705 terme d'une baisse du niveau de la nappe, observent pas d'effets significatifs sur l'ENE
1706 tandis que les flux de RE et de PPB augmentent tous les deux. Ces études montrent
1707 que si le niveau de la nappe est reconnu comme un facteur de contrôle des flux de CO₂,
1708 il est difficile d'en dégager des liens de cause à effet répétables.

1709 Concernant le méthane, une baisse du niveau de la nappe est généralement liée à
1710 une baisse des émissions de CH₄, et inversement, le niveau de la nappe contrôlant la
1711 proportion des zones où le CH₄ est produit/oxydé (Pelletier *et al.*, 2007). Turetsky
1712 *et al.* (2008) montrent par ailleurs que selon leur sens, l'effet des variations du niveau
1713 de nappe sur les flux de CH₄ n'est pas identique. Ils observent ainsi que l'effet est
1714 plus important lorsque le niveau de la nappe est augmenté que lorsqu'il est diminué (\pm
1715 10 cm). Ils font l'hypothèse que le niveau de la nappe, en plus de jouer sur la proportion
1716 production/oxydation, a un effet sur le transfert de chaleur dans le sol. Cette hypothèse
1717 s'appuie sur l'observation de températures plus élevées, que ce soit celles de l'air ou de
1718 la tourbe, dans les zones où le niveau de la nappe a été rehaussé. Cependant d'autres
1719 études, principalement dans des sites où le niveau de la nappe est proche de la surface
1720 du sol, montrent une absence de relation entre le niveau de la nappe et les émissions
1721 de méthane, voire une relation inverse, avec des flux plus faibles liés à des niveaux de
1722 nappe plus élevés (Kettunen *et al.*, 1996; Bellisario *et al.*, 1999; Treat *et al.*, 2007). Là
1723 encore selon les conditions environnementales, la relation entre les flux de CH₄ et le
1724 niveau de la nappe n'est pas aisément généralisable.

1725 La vitesse de l'augmentation du niveau de nappe semble également jouer sur les
1726 flux, des pics de RE ont été observés après la réhumectation rapide. La façon dont
1727 le niveau de la nappe augmente semble également jouer sur les flux. Strack et Price
1728 (2009) ont observés qu'une hausse graduelle par le bas de la colonne de sol conduit
1729 à une baisse de la RE, tandis qu'une hausse rapide simulant un événement pluvieux
1730 (par le haut) conduisait à un pic de RE. Ce pic de RE après une réhumectation a
1731 également été observé par McNeil et Waddington (2003). L'objectif de ce chapitre est
1732 donc d'explorer plus en avant l'effet du niveau de la nappe d'eau sur les émissions de
1733 GES, effet peu ou pas visible *in-situ*. Plus précisément il s'agit de déterminer l'effet de

4.2. Procédure expérimentale

1734 cycles de dessication/ré-humectation sur les émissions de CO₂ et de CH₄. On attend
1735 donc qu'une baisse du niveau de la nappe une augmentation des flux de RE, avec
1736 possiblement un pic d'émission au moment de la réhumectation, et une diminution des
1737 flux de méthane. ((Réf needed)cycle multiples effet)

1738 4.2 Procédure expérimentale

1739 L'étude des cycles de dessication/ré-humectation est effectuée sur des mésocosmes,
1740 prélevés à la tourbière de La Guette. L'expérimentation a été réalisée durant l'été 2013
1741 avec un seul cycle relativement long, on s'y référera par la suite comme l'expérimen-
1742 tation A. L'expérimentation a été renouvelée l'été 2014 avec trois cycles, plus courts. On
1743 appellera cette seconde expérimentation, l'expérimentation B.

1744 4.2.1 Expérimentation A

1745 Six mésocosmes ont été prélevés le 12 avril 2013, sur la tourbière de La Guette.
1746 Le prélèvement s'effectue à l'aide de cylindres de PVC qui, dans un premier temps,
1747 posé sur le sol, permettent de faire un pré-découpage au couteau, puis dans un second
1748 temps sont insérés, délicatement, dans la tourbe. Les mésocosmes sont finalement dé-
1749 gagés en creusant de chaque côté (Figure 4.2). Enfin ils sont transportés au laboratoire
1750 où ils sont enterrés en extérieur et saturé en eau (eau prélevée dans la tourbière), afin
1751 que leur conditions hydrologique de départ soient les plus proche possible (Figure 4.1).
1752 Trois mésocosmes tirés au sort servent de contrôle, et trois vont subir un cycle de
1753 dessication/ré-humectation. À partir du 2 mai 2013 les précipitations ont été inter-
1754 ceptées à l'aide d'abri bâchés installable en cas de pluie et la nuit. Ces interceptions
1755 ont été faites jusqu'au 17 juillet dans les 3 mésocosmes traités pour simuler une séche-
1756 resse. À cette date de l'eau est ajouté aux mésocosmes, que ce soit les contrôles ou les
1757 traitements, pour simuler de fortes précipitations (Tableau 4.1).

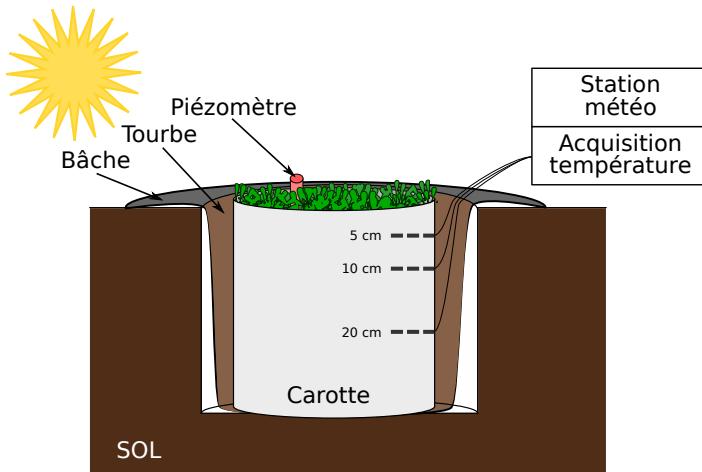


FIGURE 4.1 – Schéma d'un mésocosme

1758 4.2.2 Expérimentation B

1759 Le 17 avril 2014, six nouveaux mésocosmes ont été prélevés sur la tourbières de
 1760 La Guette et installés près du laboratoire, en suivant le même protocole que pour
 1761 l'expérimentation A. Une station météo a été installée à côté des mésocosmes afin de
 1762 mesurer la température de l'air, l'humidité relative, le rayonnement solaire, la vitesse et
 1763 la direction du vent et les précipitations toutes les 15 minutes. La pluviométrie devait
 1764 également être enregistrée mais une panne de pluviomètre a empêchée l'acquisition de
 1765 cette variable. Cette station permettait également l'enregistrement des températures
 1766 mesurées par des sondes (T107) installées à -5, -10, et -20 cm. Les conditions mé-
 1767 téorologiques moins ensoleillée qu'en 2013 et l'objectif de suivre plusieurs cycles de
 1768 dessiccation/réhumectation ont nécessité la mise en place d'un abaissement manuel
 1769 du niveau de la nappe. Pendant les phases d'assèchement les niveaux de nappes des
 1770 placettes traitées étaient donc abaissés en moyenne de 2,5 cm par jour. La durée des
 1771 différents cycles est présentée dans le tableau 4.1.

1772 4.2.3 Analyse des données

1773 Pour les deux expérimentations les variables explicatives sont la température de
 1774 l'air, du sol à -5 cm, le niveau de nappe, et la teneur en eau du sol.

4.2. Procédure expérimentale

Tableau 4.1 – Récapitulatif des différentes phases de dessication/réhumectations pour les deux expérimentations. La colonne code phase correspond à la première lettre de la phase (D pour dessication et R pour réhumectation) suivi d'un numéro représentant l'ordre du cycle

| code phase | dates |
|--------------------------|---------------------|
| Expérimentation A (2013) | |
| D1 | 2 mai – 17 juillet |
| R1 | 17 juillet – 9 août |
| Expérimentation B (2014) | |
| D1 | 30 juin – 6 juillet |
| R1 | 7 – 16 juillet |
| D2 | 17 – 28 juillet |
| R2 | 29 juillet – 3 août |
| D3 | 4 – 11 août |
| R3 | 12 – 14 août |

Remarque : La mesure de la teneur en eau du sol se fait à l'aide d'une sonde munie d'un corps duquel dépasse deux tiges d'une dizaine de centimètre et écartée de deux. Pour l'expérimentation A les mesures ont été faite en insérant verticalement la sonde dans le mésocosme. La mesure est donc une intégration de la teneur en eau sur 10 cm. En revanche pour l'expérimentation B, la sonde à été insérée horizontalement sur un côté du mésocosmes à une profondeur fixe (-5, -10 et -20 cm). La mesure qui en résulte est donc plus spécifique à cette profondeur. Pour les deux expérimentations les valeurs obtenues ne sont pas à prendre de façon absolue, les sondes n'ayant pas été calibrées pour des sols tourbeux.

1775

1776 La végétation n'a été suivie que lors de l'expérimentation B. Les placettes subissant
1777 les cycles de dessiccation seront nommées groupe « Dessiccation » et les placettes ne
1778 subissant pas les cycles, groupe « Contrôle ». Ces deux groupes correspondent aux
1779 deux traitements utilisés pour l'analyse statistique. Pour le CO₂ et le CH₄, l'analyse a
1780 été faite sur les flux moyennés sur une journée, les flux ayant été généralement mesuré
1781 deux fois par jour.



FIGURE 4.2 – Prélèvement des mésocosmes (en haut). Mésocosmes installés et protégés de la pluie (en bas).

4.3. Résultats

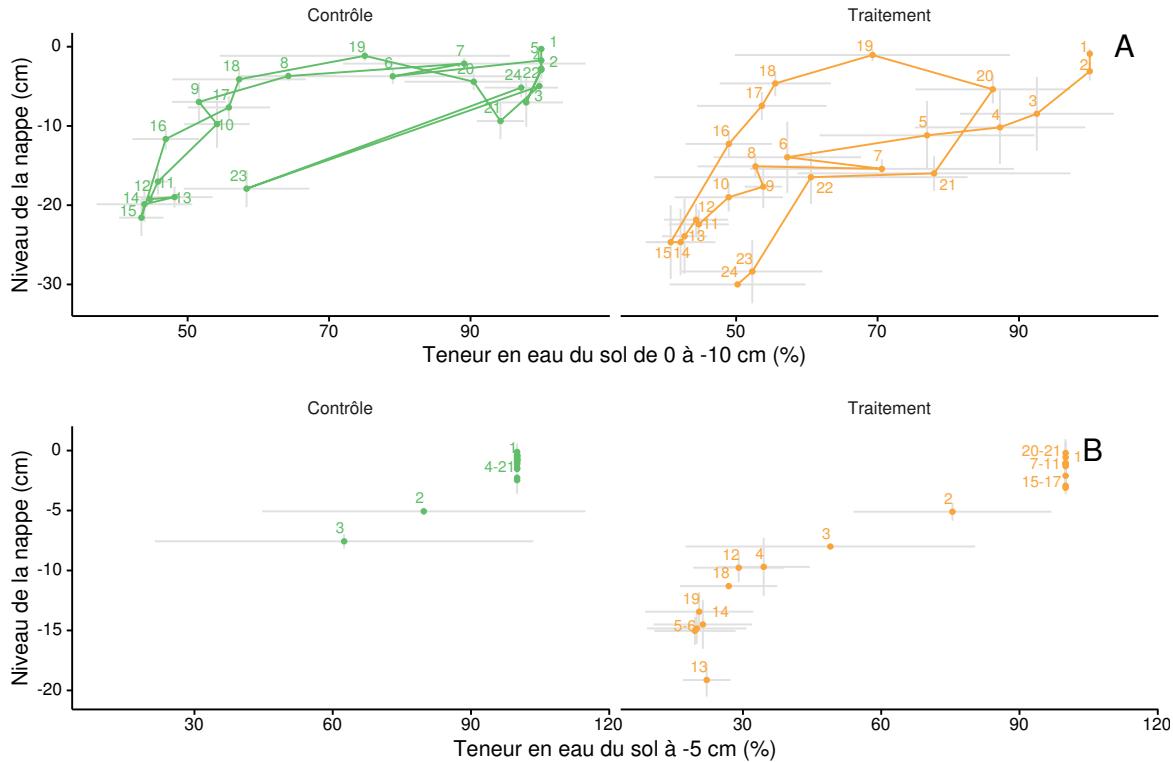


FIGURE 4.3 – Relation entre les niveaux de nappe et la teneur en eau du sol pour l'expérimentation A (en haut) et en bas pour l'expérimentation B. Les numéros correspondent à l'ordre des campagnes de mesure et les lignes grises aux déviations standard.

1782 4.3 Résultats

1783 4.3.1 Expérimentation A

1784 Dynamique hydrologique

1785 Pendant la phase de dessiccation de l'expérimentation A, on observe une baisse du
 1786 niveau de la nappe pour les placettes contrôles comme pour les placettes traitements
 1787 (Figure 4.4–A). Cependant les placettes du groupe Contrôle ont un niveau de nappe re-
 1788 lativement élevé jusqu'au 24 juin puis ce niveau baisse fortement alors que les placettes
 1789 du groupe Dessiccation ont un niveau de nappe qui diminue de façon plus continue sur
 1790 l'ensemble de la phase. Cette dynamique d'assèchement s'observe également au niveau
 1791 de la teneur en eau du sol (Figure 4.3). Les trois premières campagnes ont des évolu-
 1792 tions similaires pour les deux groupes avec une baisse du niveau de la nappe associée à

une baisse de la teneur en eau très limitée (< 10 %). Des campagnes 4 à 8 le niveau de la nappe reste à peu près constant pour le groupe Contrôle (≈ -3 cm), tandis que la teneur en eau du sol diminue de 100 à 64 %. Dans le même temps le niveau de nappe du groupe Dessication diminue (-10 à -15 cm) avec la teneur en eau du sol (87 à 53 %). Entre les campagnes 9 à 15 le niveau de nappe diminue pour les deux groupes. De -7 à -22 et de -18 à -25 cm respectivement pour les groupes Contrôle et Dessication. Les groupes Contrôle et Dessication se retrouvent également proche en termes de teneur en eau du sol : 41 et 43 % respectivement.

À l'inverse de la dessication, la réhumectation semble s'effectuer de façon similaire pour les deux groupes. La réhumectation commence par une augmentation du niveau de la nappe importante des campagnes 15 à 18 : il passe de -22 à -4 cm pour le groupe Contrôle et de -25 à -5 cm pour le groupe Dessication. Dans ce même temps la teneur en eau du sol varie peu, de 43 à 57 et de 41 à 56 % respectivement pour les groupes Contrôle et Dessication. Dans une seconde phase de la réhumectation, des campagnes 18 à 20, le niveau de nappe n'évolue plus que faiblement, oscillant entre -5 et -1 cm pour les deux groupes. Cependant la teneur en eau du sol continue d'augmenter passant de 57 à 90 % pour le groupe Contrôle et de 56 à 86 % pour le groupe Dessication. Au delà de la campagne 20 le comportement des groupes divergent à nouveau. Le groupe Contrôle semble reprendre le même chemin de dessication à l'exception d'un point. Ce point, la campagne 23 et liée à une baisse brusque du niveau de la nappe (-18 cm) et semble d'avantage sur le « chemin » du groupe Dessication (Figure 4.3). Le groupe dessication quant à lui suit un chemin proche de sa première phase de dessication même si la teneur en eau du sol diminue moins rapidement par rapport au niveau de la nappe que précédemment.

Flux de CH₄

Les émissions de CH₄, varient de 0 et 0,3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Elles sont similaires entre les deux groupes jusqu'au 24 juin 2013, date à partir de laquelle elles divergent (Figure 4.4–B). À cette date les émissions du groupe contrôle augmentent rapidement pour atteindre $0,55 \pm 0,31 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ tandis que celles du groupe traité restent stable. À la fin de

4.3. Résultats

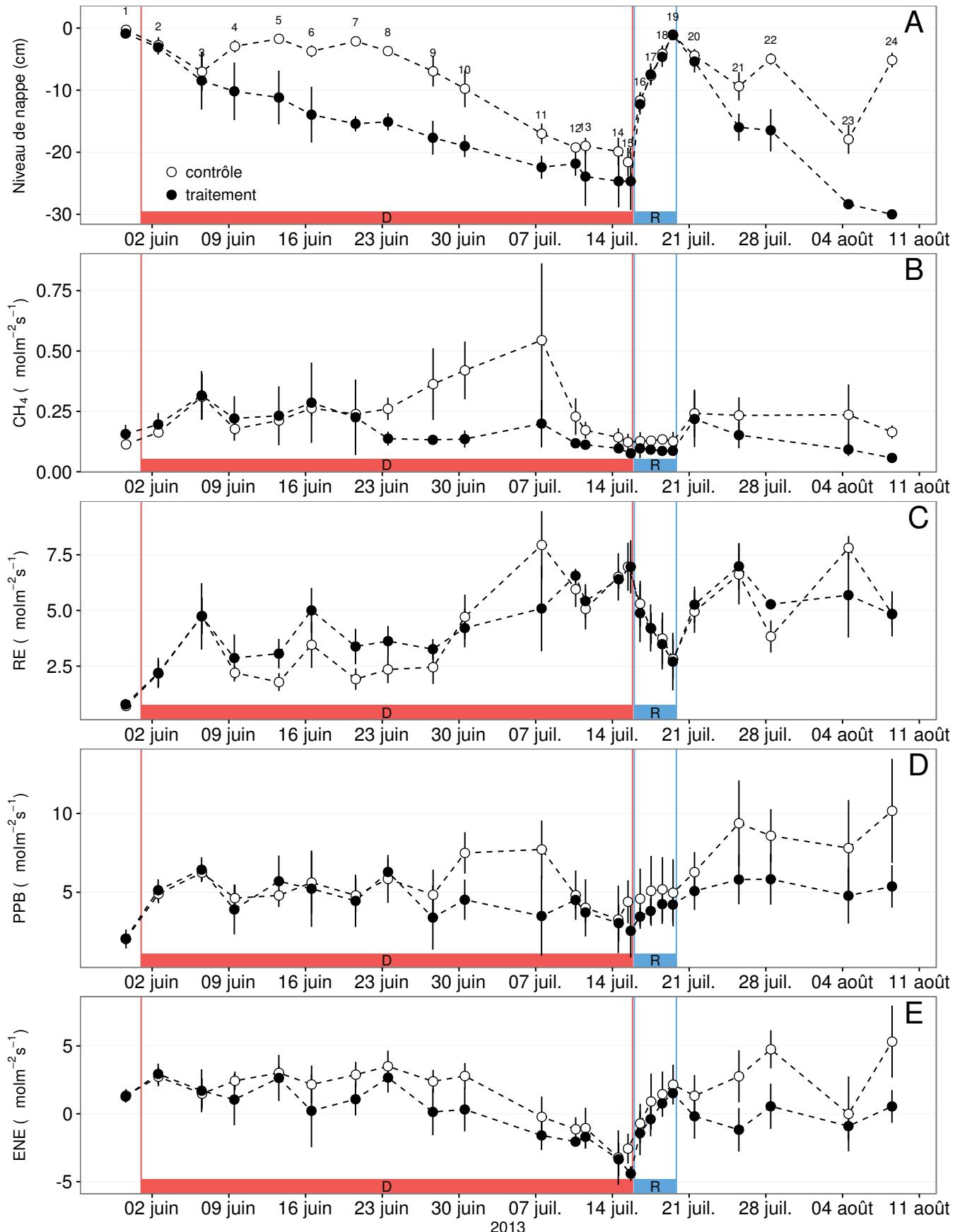


FIGURE 4.4 – Expérimentation A : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH_4 , RE, PPB, ENE en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent à la phase de dessiccation (D) en rouge et à la phase de réhumectation (R) en bleu.

la phase de dessiccation, mi-juillet, les deux groupes retrouvent des niveaux d'émission similaires compris entre $0,1$ et $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Ces niveaux restent constant pendant toute la phase de réhumectation, avant d'augmenter légèrement par la suite pour se situer entre $0,25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ et $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Flux de CO₂

Pendant la phase de dessiccation, les valeurs de la RE tendent à augmenter quel que soit le groupe de placettes considéré (Figure 4.4–C). Ces valeurs inférieures à $2,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ début juin, atteignent environ $7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour les deux groupes mi-juillet, avant la réhumectation. Cependant la RE du groupe Dessiccation augmente régulièrement pendant l'ensemble de cette phase jusqu'à $3,26 \pm 0,46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, tandis que les valeurs du groupe Contrôle restent, dans un premier temps, stable jusque fin juin ($2,45 \pm 0,75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). À partir de début juillet, les valeurs de RE du groupe Contrôle augmentent fortement dépassant les valeurs du groupe Dessiccation. La RE de ce groupe atteint un maximum à $7,93 \pm 1,52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ le 8 juillet avant de retrouver des valeurs proche de celles observées dans le groupe Dessiccation. Cette augmentation brusque correspond temporellement à celle observé, pour le même groupe, dans les flux de CH₄. Lors de la phase de réhumectation, les flux de RE diminuent de façon très similaire pour les deux groupes pour atteindre $2,75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en juin. Ce minimum reste cependant plus élevé que les valeurs mesurées initialement. Après la phase de réhumectation, les flux des deux groupe restent relativement proches pendant le reste des mesures, où ils remontent à mesure que le niveau de la nappe diminue à nouveau.

Pour les deux groupes, les flux de PPB restent stables pendant la phase de dessiccation (Figure 4.4–D) : 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 moyenne pour les deux groupes) jusqu'au 24 juin. Ensuite comme pour le CH₄ et la RE, les valeurs de la PPB du groupe Contrôle augmentent et s'écartent de celles mesurées dans le groupe Dessiccation. À la fin de cette phase de dessiccation les flux redéviennent identiques entre les traitements. Par ailleurs, à la fin de cette phase, les flux diminuent légèrement atteignant un minimum proche de $3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Pendant la phase de réhumectation, la PPB augmente légèrement pour les deux groupes. La PPB

4.3. Résultats

1851 dans le groupe de contrôle a des valeurs supérieures à celles du groupe Dessiccation.
1852 Après la réhumectation, la PPB augmente pour les deux groupes, avec un maximum de
1853 $5,83 \pm 1,61 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le groupe Dessiccation et de $10,17 \pm 3,30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
1854 pour le groupe Contrôle.

1855 L'ENE est systématiquement supérieure pour le groupe Contrôle, avec une cinétique
1856 parallèle des flux pour les deux groupes (Figure 4.4–E). Pendant la phase de dessicca-
1857 tion, l'ENE reste relativement constante jusque fin juin avec une valeur moyenne pour
1858 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
1859 groupe Dessiccation tend à augmenter du 10 au 30 juin environ, avant que les valeurs
1860 du groupe de Contrôle ne rejoignent celles du groupe Dessiccation. Au delà du 24 juin,
1861 l'ENE baisse fortement pour les deux groupes pour atteindre un minimum proche de
1862 $-4,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Pendant la phase de réhumectation l'ENE monte rapidement pour
1863 atteindre $1,52 \pm 0,36$ et $2,15 \pm 1,47 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le groupe Contrôle et de groupe
1864 Dessiccation respectivement. Après la réhumectation, l'ENE du groupe Contrôle va-
1865 rie en suivant généralement les variations du niveau de nappe. Pour le groupe traité,
1866 l'ENE baisse par rapport au maximum atteint lors de la réhumectation puis se stabilise
1867 autour de 0.

1868 L'effet des variations du niveau de la nappe sur la PPB est quasiment nul (Fi-
1869 gure 4.6–E), même si la PPB semble diminuer aux plus fortes profondeurs. Les va-
1870 riations de la RE sont principalement liée au niveau de la nappe (Figure 4.6–C) Par
1871 conséquent, les variation de RE se répercutent sur l'ENE (Figure 4.6–G). Pour le CH₄ il
1872 est également difficile de distinguer des tendances générales entre les flux et les niveaux
1873 de nappe (Figure 4.6–A).

1874 4.3.2 Expérimentation B

1875 Contrairement à l'expérimentation A, le niveau de nappe du groupe Contrôle de
1876 l'expérimentation B reste relativement constant pendant l'ensemble de la période de
1877 mesure. Le drainage artificiel du groupe Dessiccation permet d'abaisser le niveau de la
1878 nappe d'une quinzaine de centimètres en moyenne pour chaque cycle (Figure 4.5–A).

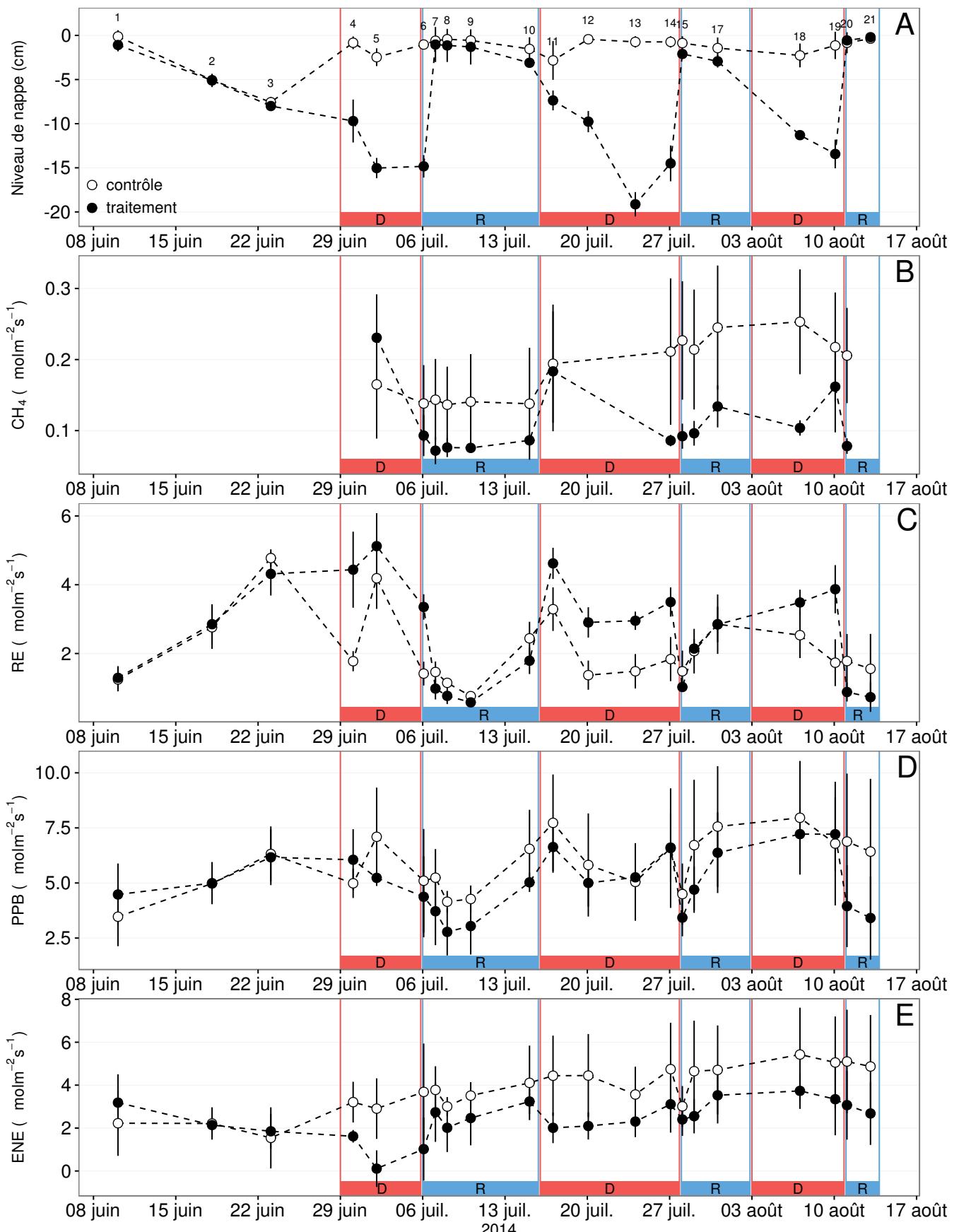


FIGURE 4.5 – Expérimentation B : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH_4 , RE, PPB, ENE en $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent aux phases de dessiccation (D) en rouge et aux phases de réhumectation (R) en bleu.

4.3. Résultats

1879 Les flux de CH₄ moyen varient entre 0,07 à 0,34 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Les flux du groupe
1880 Contrôle, à l'exception de la première mesure, sont supérieurs aux flux du groupe Des-
1881 siccation, (moyennes globales de $0,20 \pm 0,06$ et $0,11 \pm 0,05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, respective-
1882 ment. Les émissions du groupe Contrôle tendent à augmenter sur la période de mesure.
1883 Une tendance similaire, est également visible pour le groupe Dessiccation. Concernant
1884 les cycles de dessiccation/réhumectation, il est difficile de dégager des comportements
1885 communs entre eux, même si l'assèchement conduit à une baisse des émissions (Fi-
1886 gure 4.5-B) Cette relation, mise en exergue pas un nombre de points très faible, n'ap-
1887 paraît cependant pas sur l'ensemble des données (Figure 4.6-B). Un pic d'émission de
1888 CH₄ est également à noter pour chaque cycle pendant la phase de dessiccation.

1889 La RE varie pour les deux groupes entre 0,42 et 5,12 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Figure 4.5-
1890 C)). Avant le démarrage des manipulations du niveau de la nappe, les valeurs des
1891 deux groupes sont très proches et augmentent tandis que le niveau de nappe diminue.
1892 Pendant les phases de dessication, les valeurs du groupe Dessiccation sont systéma-
1893 tiquement supérieures, de 1,5 à 1,8 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en moyenne par phase, par rapport
1894 à celle du groupe Contrôle. À l'inverse pendant les phases de réhumectation les flux
1895 entre les deux groupes sont beaucoup plus proches avec une tendance de la RE du
1896 groupe Contrôle à être supérieure à celle du groupe Dessiccation. La RE du groupe
1897 traité est systématiquement plus faible pendant les phases de réhumectations que pen-
1898 dant les phases de dessications. En moyenne la RE vaut respectivement $2,28 \pm 1,00$ et
1899 $3,86 \pm 0,80 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour les groupes Contrôle et Dessiccation pendant les phases
1900 de dessiccation et $1,70 \pm 0,62$ et $1,51 \pm 0,98 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pendant les phases de réhu-
1901 mectation.

1902 Sur l'ensemble de la période de mesure la PPB est comprise entre 2,78 et 7,96 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.
1903 Avant le début des traitements les flux des deux groupes sont similaires (Figure 4.5-D).
1904 À partir de la première phase de dessiccation, la PPB du groupe Contrôle supérieure
1905 à celle du groupe Dessiccation. Pour les deux groupes, la PPB est plus importante lors
1906 des phases de dessiccation comparée aux phase de réhumectation, avec des moyennes
1907 respectives de $6,35 \pm 2,19$ contre $5,80 \pm 2,20$ pour le groupe Contrôle et de $5,95 \pm 1,46$

1908 contre $4,05 \pm 1,60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le groupe Dessiccation.

1909 Les valeurs d'ENE mesurées sont comprises entre $0,11$ et $5,42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, elles ont
 1910 tendance à augmenter au cours du temps. Passé la période pré-traitements pendant la-
 1911 quelle les flux de l'ENE sont similaires pour les deux groupes l'ENE du groupe Contrôle
 1912 est systématiquement supérieure à celle du groupe Dessiccation (Figure 4.5–E). L'évo-
 1913 lution des deux groupes reste cependant relativement conjointe pendant la période de
 1914 mesure avec pour le groupe Dessiccation une diminution récurrente de l'ENE au début
 1915 de chaque phase de dessiccation.

1916 4.3.3 tendances générales

1917 Pour les deux expérimentations une relation nette est visible entre le niveau de la
 1918 nappe et l'ENE qui diminue lorsque le niveau de nappe augmente (Figure 4.6–G,H).
 1919 La relation inverse est visible, pour les deux expérimentations, entre la RE et le niveau
 1920 de la nappe (Figure 4.6–C,D). La PPB ne montre aucune tendance quelle que soit
 1921 l'expérimentation. On peut noter que les valeurs de PPB les plus faibles correspondent
 1922 aux niveaux de nappe les plus élevés(Figure 4.6–E,F). Pour le méthane, que ce soit
 1923 pour l'expérimentation A ou B, aucune tendance ne semble se dégager vis à vis du
 1924 niveau de la nappe (Figure 4.6–A,B).

1925 4.4 Discussion

1926 4.4.1 Comparaison aux mesures *in-situ*

1927 Les flux moyen de CH_4 mesurés dans les mésocosmes des deux expérimentations
 1928 font partie des valeurs hautes mesurées sur le terrain. Certaines campagnes dépassent
 1929 nettement, en faisant plus que doubler, le maximum de $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mesuré en
 1930 2014 sur la tourbière de La Guette.

1931 Pour le CO_2 les flux sont généralement dans la gamme des valeurs mesurées sur

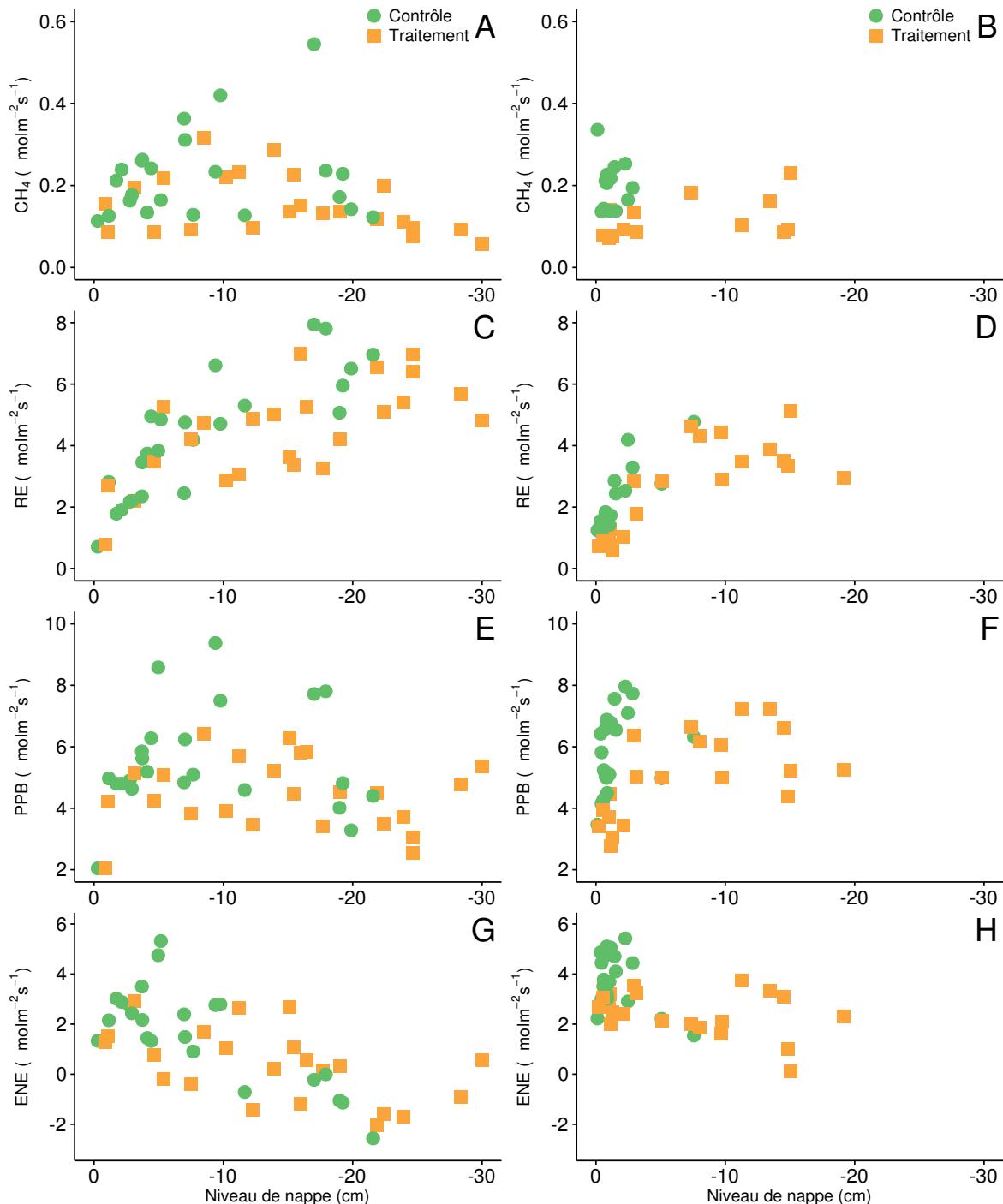


FIGURE 4.6 – Relations entre les flux de GES et le niveau de la nappe

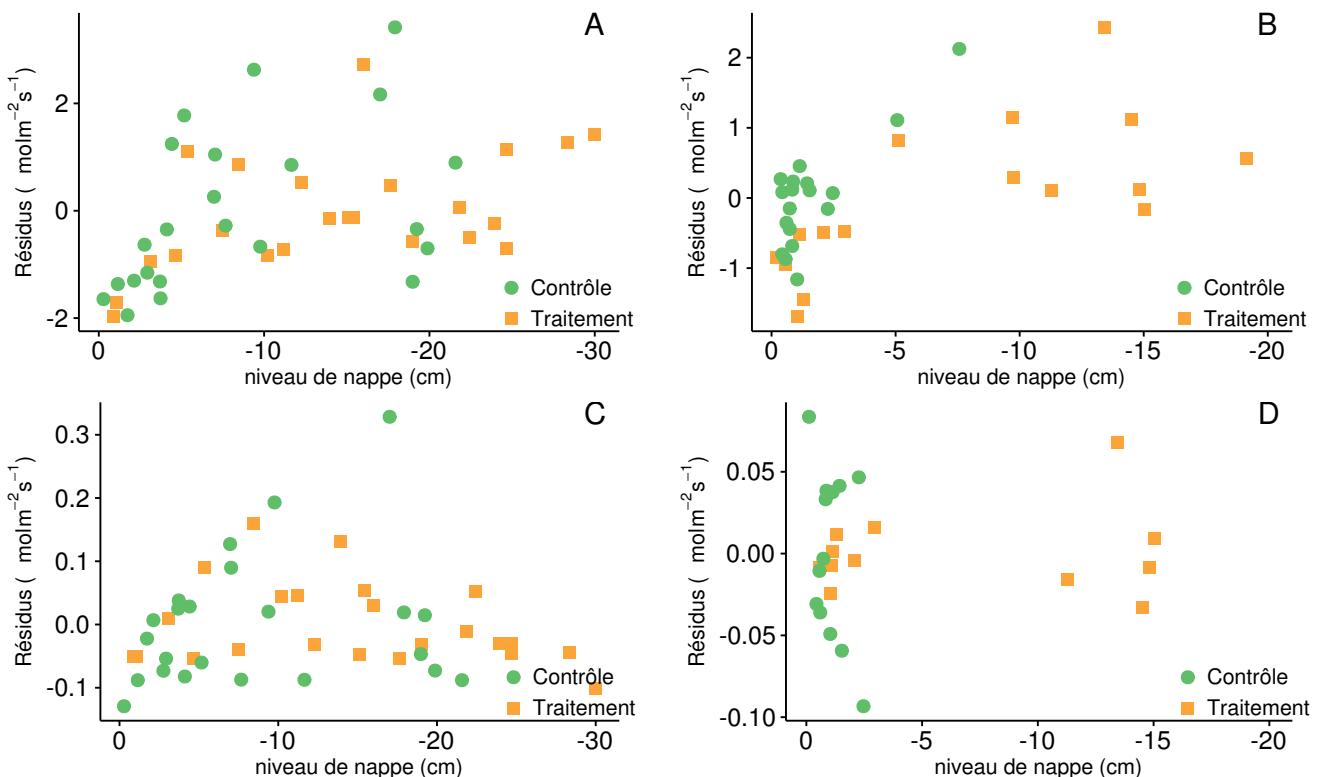


FIGURE 4.7 – ...

1932 la tourbière de La Guette. Pour l'expérimentation A, l'ENE moyen est plus faible que
 1933 celui mesuré sur le terrain la même année : $0,81$ contre $2,85 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Pour l'expé-
 1934 rimentation B en revanche l'ENE moyen vaut $0,71 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ce qui est relativement
 1935 proche de celui mesuré sur le terrain : $2,93 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Les flux de RE et de PPB
 1936 sont moins fort que les flux mesurés sur le terrain mais restent dans leur gamme de
 1937 valeurs. Ces comparaisons sont par ailleurs à relativiser puisque les mesures de flux
 1938 n'ont pas nécessairement lieu aux mêmes moment de la journée.

1939 Comme pour la RE, les flux de PPB sont du même ordre de grandeur que ceux
 1940 mesurés sur le terrain, mais dans la gamme basse : les maxima moyens mesurés dans les
 1941 mésocosmes sont d'environ $7,5$ pour des valeurs de $13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ mesuré directement
 1942 sur la tourbière.

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

Les résultats de ces deux expérimentations montrent une augmentation de la RE quand le niveau de la nappe diminue. Ceci est en accord avec les résultats d'autres études que ce soit in-situ (Ballantyne *et al.*, 2014) ou en mésocosmes (Blodau *et al.*, 2004; Dinsmore *et al.*, 2009). Dans ces deux dernières publications, la baisse du niveau de la nappe diminue la PPB. Pas de variations significatives de la PPB avec le niveau de la nappe n'est visible dans les données présentées, même si une légère tendance semble émergée aux plus fortes profondeur de nappe pour l'expérimentation A. Cette absence d'effet du niveau de la nappe sur la PPB peut, être liée à la profondeur des mésocosmes (30 cm). En effet dans Blodau *et al.* (2004) et Dinsmore *et al.* (2009), les mésocosmes utilisés sont plus grands, 75 et 41 cm respectivement, ont permis d'abaisser le niveau de l'eau au delà de -30 cm. Cette limite a été rapportée plusieurs fois comme étant un seuil au delà duquel son observés des changements importants (Blodau *et al.*, 2004; Peichl *et al.*, 2014). Ce seuil est expliqué comme étant la limite au delà de laquelle les forces de capillarités ne permettent plus d'alimenter en eau les sphaignes (Rydin et Jeglum, 2013b; Ketcheson et Price, 2014). Il résulte des constats précédents qu'une baisse du niveau de nappe, faisant augmenter la RE et ne changeant pas ou peu la PPB, conduit à une baisse de l'ENE. Cette diminution de l'ENE est cohérente avec la littérature, que ce soit des expérimentations en mésocosmes (Aerts et Ludwig, 1997; Blodau *et al.*, 2004), ou in-situ (Bubier *et al.*, 2003; Sonnentag *et al.*, 2010). Malgré tout l'extrapolation de ses résultats à d'autres situations n'est pas aisée car fortement fonction du contexte. D'autre études n'ont, par exemple, pas observé d'influence du niveau de la nappe sur la RE (Updegraff *et al.*, 2001). Par ailleurs Laiho (2006) a montré l'importance du contexte et notamment celui de l'échelle de temps considéré qui peut impliquer des phénomènes différents et donc avoir des conséquences différentes.

La dépendance entre les flux de CH₄ et le niveau de la nappe, devant conduire à une baisse des émissions quand le niveau de la nappe diminue, comme décrite dans Aerts et

1971 Ludwig (1997), Pelletier *et al.* (2007) ou Turetsky *et al.* (2008), n'a pas été clairement
1972 observée. Ce constat rejoint d'autres études dans lesquelles une relation inverse ou un
1973 absence de relation a été trouvé entre le CH₄ et le niveau de la nappe Kettunen *et al.*
1974 (1996); Bellisario *et al.* (1999); Treat *et al.* (2007). L'observation d'un pic de méthane
1975 suivant de quelques jours une phase de hausse du niveau de la nappe, est également
1976 rapportée par Kettunen *et al.* (1996). (**And so what ?**)

1977 **4.4.3 Effet cycles multiples**

1978 CHAPITRE 5

1979 VARIATION JOURNALIÈRE DE LA RESPIRATION DE

1980 L'ÉCOSYSTÈME (ARTICLE)

| | |
|------|--|
| 1981 | |
| 1982 | 5.1 Introduction 124 |
| 1983 | 5.1.1 Study sites 126 |
| 1984 | 5.1.2 Data acquisition 126 |
| 1985 | 5.1.3 Data synchronisation 127 |
| 1986 | 5.1.4 Sensitivity of ER to temperature 127 |
| 1987 | 5.1.5 Testing difference between daytime and nighttime ER sensitivity to temperature 128 |
| 1988 | 5.1.6 Physico-chemical characterisation of the peat 128 |
| 1989 | 5.2 Results 129 |
| 1990 | 5.2.1 Air temperature and ER variability 129 |
| 1991 | 5.2.2 ER and soil temperature synchronisation 131 |
| 1992 | 5.2.3 Model implementation 132 |
| 1993 | 5.2.4 ER and temperature relationship 132 |
| 1994 | 5.2.5 Q_{10} evolution 134 |
| 1995 | 5.2.6 Daytime and nighttime differences 134 |
| 1996 | 5.2.7 Peat characterisation 138 |
| 1997 | 5.3 Discussion 139 |
| 1998 | 5.3.1 ER differences between sites 139 |
| 1999 | 5.3.2 Time-delay between temperature and ER 140 |
| 2000 | 5.3.3 Synchronising ER and temperature improves ER sensitivity to temperature representation 140 |
| 2001 | 5.3.4 Differences between daytime and nighttime ER measurements 141 |
| 2002 | 5.3.5 Q_{10} sensitivity to temperature depth and synchronisation 141 |
| 2003 | 5.4 Conclusions 142 |
| 2004 | |
| 2005 | |
| 2006 | |
| 2007 | |
| 2008 | |

2009 5.1 Introduction

2010 At a global scale, Ecosystem Respiration (ER) and photosynthesis are the most
2011 important fluxes between the atmosphere and the biosphere, accounting for 98 and
2012 123 PgC yr⁻¹, respectively (Bond-Lamberty et Thomson, 2010; Beer et al., 2010). By
2013 contrast the fossil fuel and cement production flux is one order of magnitude lower, at
2014 7.8 PgC yr⁻¹ (Ciais et al., 2014). Consequently, even small variations in the ecosystem
2015 fluxes may result in substantial changes in carbon (C) storage dynamics. This can have
2016 a significant effect on the global C budget, in particular on atmospheric C concentration.
2017 The C stock in natural ecosystems is divided into two pools : vegetation, which contains
2018 450 to 650 Pg C, and the soil which contains 1500 to 2400 Pg C (Prentice et al., 2001;
2019 Eswaran et al., 1993; Batjes, 1996). Across the world, the soil organic C (SOC) pool is
2020 spatially heterogeneous in terms of source and physical conditions, leading to variable
2021 storage rates between ecosystem types. Peatlands are efficient C storage ecosystems.
2022 They cover only 3 % of the global terrestrial area, but contain from 270 to 455 Pg C as
2023 SOC, i.e. from 10 to 30 % of the world's soil C (Gorham, 1991; Turunen et al., 2002).
2024 Thus, peatlands are considered as a "hot spots" for SOC storage, and their evolution
2025 under current environmental changes deserves attention.

2026 As in many other terrestrial ecosystems, many factors affect ER variability in peat-
2027 lands : temperature, soil water content, vegetation, and substrate supply (Luo et Zhou,
2028 2006b). All these factors are thought to be affected by global change, with unknown
2029 consequences on the C balance (Limpens et al., 2008). ER is often related to tempe-
2030 rature : either to air temperature (e.g., ?), or soil temperature. The most commonly
2031 used soil temperatures are those at -5 cm (Ballantyne et al., 2014; Görres et al., 2014)
2032 and -10 cm (Kim et Verma, 1992; Zhu et al., 2015). In some studies, different depths
2033 are used and the selected one depends on the goodness-of-fit (Günther et al., 2014;
2034 Zhu et al., 2015). All these studies use the chamber method to measure gas fluxes.
2035 Even though most studies use -5 cm soil temperature, no clear consensus exists. In

addition Pavelka *et al.* (2007) and Graf *et al.* (2008) showed that the relationship between ER and temperature is depth dependent since heat transfer in the soil profile is not instantaneous and leads to a time-delay between the temperature and the ER signals. The relationship between ER and temperature is often described using the Q_{10} indicator, which represents the proportional increase of a reaction rate due to a 10°C rise in temperature. However, even if the Q_{10} seems coherent at a global scale (Mahecha *et al.*, 2010), reported values show a significant variability at the ecosystem level (Graf *et al.*, 2008). Because the measured Q_{10} are not linked to a single reaction but to multiple processes, numerous issues arise (Davidson *et al.*, 2006). Among them are the time-scale considered (Curiel Yuste *et al.*, 2004), the depth (Graf *et al.*, 2008) and the time-delays between ER and soil temperatures (Phillips *et al.*, 2011). One way to deal with the time-delays might be data synchronisation according to Pavelka *et al.* (2007). Another issue is the difference between the daytime and nighttime ER relationship with temperature. Juszczak *et al.* (2012), for example, showed that there are significant differences between ER modelled with daytime and nighttime data. Assessing these differences may be important when working at a daily timescale and when treating data from eddy-covariance measurements.

Based on these previous studies, we expected that time-delays in *Sphagnum*-dominated peatlands would be significant, even in the first 10 centimetres depth and that they would lead to a better description of observed data once taken into account, especially through data synchronisation. To our knowledge no studies have explored the time-delay between ER and soil temperature in peatlands yet. Differences in the ER–temperature relationship between daytime and nighttime datasets were also expected. To test these predictions, ER fluxes, during the growing season in 4 *Sphagnum*-dominated peatlands were measured in 2013. Continuous measurements over 72 hours were carried out in each site using static dark chambers. Air and soil temperature were also monitored. Specifically, the relationship between ER and temperature, measured at different depths in peat was studied and the difference between daytime and nighttime measurements was assessed.

5.1. Introduction

2065 The aim of this study was (i) to highlight any time-delay at the daily timescale
2066 between ER and soil temperature at different depths in peatlands (ii) to assess the
2067 effect of synchronisation between ER and temperature in the representation of the diel
2068 ER variations (iii) to use the improved model to assess whether there is a difference
2069 between nighttime and daytime ER.

2070 5.1.1 Study sites

2071 The study was performed on four French *Sphagnum*-dominated peatlands : Berna-
2072 douze (BDZ, Ariège ; 3.75 ha, N 42°48'09", E 1°25'24", 1400 m), Frasne (FRN, Doubs ;
2073 98 ha, N 46°49'35", E 6°10'20", 836 m), Landemarais (LDM, Ille-et-vilaine ; 23 ha,
2074 N 48°26'30", E 1°10'54", 154 m), and La Guette (LGT, Cher ; 26 ha, N 47°19'44", E
2075 2°17'04", 145 m). Mean annual air temperatures and annual rainfalls were 6, 7.5, 11,
2076 11°C, and 1700, 1400, 870, 880 mm for BDZ, FRN, LDM and LGT respectively. During
2077 the measurements the water table level remained constant at to -12, -7, -35 and -9 cm
2078 for BDZ, FRN, LDM and LGT.

2079 5.1.2 Data acquisition

2080 Fieldwork was conducted between July and October 2013. In each site, four plots
2081 (replicates) with similar plant cover were chosen. Four cylindrical PVC collars (diame-
2082 ter : 31 cm, height : 15 cm) were inserted into the peat the day before beginning the
2083 measurements. For 72 hours, CO₂ fluxes were measured in the 4 plots once an hour
2084 in random order. These measurements were undertaken using a closed static cham-
2085 ber (diameter of 30.5 cm, height of 30 cm), with a GMP343 Vaisala probe. ER was
2086 measured with a transparent chamber covered by an opaque material to avoid input of
2087 photosynthetic active radiation. Inside the chamber the air was homogenized with a fan
2088 in order to minimize concentration gradients ([Pumpenan et al., 2004](#)). Measurement
2089 lasted a maximum of 5 min with CO₂ concentration recorded every 5 seconds as well
2090 as the relative humidity and the temperature inside the chamber.

2091 In each site a weather station and a data logger were set up near the plots to provide

2092 meteorological and environmental data recorded every second : surface temperature (air
2093 temperature as close as possible to the surface : 5 cm), peat temperature (at -5, -10,
2094 -20 and -30 cm depth), air relative humidity and solar radiation.

2095 After the 72 hours of measurements four peat cores (30 cm height and 15 cm
2096 diameter), one for each replicate, were extracted at each site for physico-chemical cha-
2097 racterisation.

2098 5.1.3 Data synchronisation

2099 The synchronisations between ER fluxes and temperatures were calculated for each
2100 depth and time-delays : The acquisition frequency between temperature and ER were
2101 different. Thus an average of the temperatures recorded during the ER measurement
2102 time was calculated for all depths at the corresponding CO₂ flux measurement time.

2103 Then the temperature averaging procedure was repeated at 10-minute increments, until
2104 a 24 hour shift. The 10-minute step was a compromise between precision and calculation
2105 time. Next a correlation coefficient was calculated for each time step and temperature
2106 measurement depth. Finally the synchronisation was determined for each depth, by
2107 selecting the time-delay corresponding to the highest correlation coefficient. Negative
2108 correlations caused by the phase shift were discarded.

2109 5.1.4 Sensitivity of ER to temperature

2110 Three widely used models Fang et Moncrieff (2001) were implemented to study
 the relationship between ER and temperature : Linear regression (5.1), exponential
 models : Q₁₀ (5.2) and Arrhenius (5.3)

$$ER = \alpha + \beta T \quad (5.1)$$

$$ER = \alpha e^{\beta T}; Q_{10} = e^{10*\beta} \quad (5.2)$$

$$ER = \alpha e^{\frac{-E_a}{RT}} \quad (5.3)$$

2110 ER was estimated using air temperature, soil temperatures at -5, -10, -20 and -30

cm depth with both non-synchronised and synchronised datasets. Calculations were implemented in R, and modelled data were adjusted to measured data using Ordinary Least Squares (OLS). The goodness-of-fit was estimated by calculating the regression coefficient (R^2) and the root mean square error normalized by the mean (NRMSE).

5.1.5 Testing difference between daytime and nighttime ER sensitivity to temperature

To test whether the relationship between ER and temperature differed during daytime and nighttime, the dataset was split into two groups which were then compared. The data between 10 am and 5 pm were considered as representative of the day and data between 11 pm and 6 am as representative of the night. Only the air temperature and the -5 cm depth peat temperature (with synchronised and non-synchronised data) were investigated as they provide the best ER representation. The data for day and night were centred to account for natural differences in measurement, since : during the day both temperature and ER are higher than in the night. Using these centred data, ratios between ER and temperatures were calculated. Finally a paired Student's t test was applied on the mean of the replicate for each site and each temperature to assess the significance of the differences between day and night measurements.

5.1.6 Physico-chemical characterisation of the peat

In the laboratory, two peat cores from each site were immersed in water during 24 hours to saturate the pores. Then, the cores were soaked overnight to get rid of the water filling the effective porosity. At 5 cm steps, a piece of peat with a known volume (V , cm^3) was cut and weighed (W_1 , g). Then, the samples were dried at 50°C for 48 hours and weighed (W_2 , g). Total porosity (Φ_T , dimensionless), retention porosity (Φ_R , dimensionless), effective porosity (Φ_E , dimensionless) and bulk density (Bd , g cm^{-3}) were calculated as follows :

$$\Phi_T = 1 - \left[\frac{\left(\frac{W2}{\rho_{peat}} \right)}{V} \right] \quad (5.4)$$

$$\Phi_R = 1 - \left[\frac{\left(\frac{(W1-W2)}{\rho_{peat}} \right)}{V} \right] \quad (5.5)$$

$$\Phi_E = \Phi_T - \Phi_R \quad (5.6)$$

$$Bd = \frac{W2}{V} \quad (5.7)$$

2136 Peat density (ρ_{peat}) was set at 1.45 according to [Kennedy et Price \(2005\)](#). Then
2137 the peat was crushed and C, H, N and S analyses were performed with an elemental
2138 analyser (Thermo Flash analyser).

2139 5.2 Results

2140 5.2.1 Air temperature and ER variability

2141 Mean surface air temperatures were about 14-15 °C for all sites, except for LGT
2142 which was 20.8 ± 7.4 °C, ([Figure 5.1 – H](#)). The lowest mean temperature and amplitude
2143 were found at BDZ : 14.4 ± 3.3 °C ([Figure 5.1 – E](#)). In LDM and FRN, the mean surface
2144 air temperatures were respectively 14.9 ± 8.7 °C and 15.0 ± 10.3 °C ([Figure 5.1 – F](#),
2145 G) Surface air temperature was the highest in FRN.

2146 At -5 cm depth, BDZ and LGT had lower mean temperatures than at the surface :
2147 14.1 ± 1.5 °C and 20.3 ± 1.7 °C respectively, whereas the opposite was observed in FRN
2148 and LDM with 16.3 ± 2.4 °C and 15.9 ± 1.0 °C respectively. Mean soil temperatures
2149 were still higher at -10 cm for both sites, but only in LDM at -20 cm. At -30 cm
2150 the soil temperature amplitude ranged from 0.2 in LDM to 0.6 in LGT and FRN.
2151 Overall conditions were warmer in LGT than in the other sites and LDM, despite a
2152 large amplitude of surface air temperature, had a particularly low soil temperature
2153 amplitude.

5.2. Results

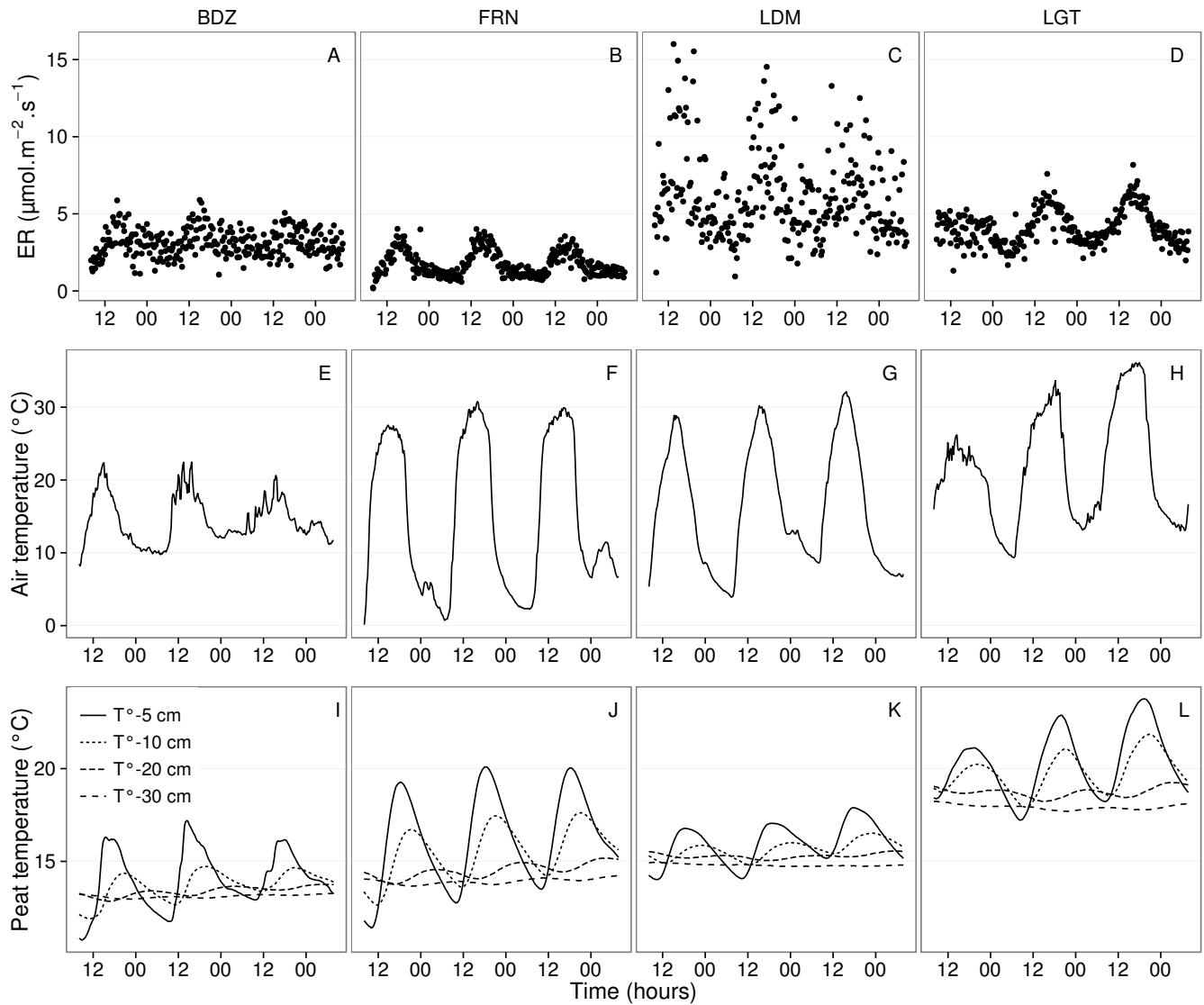


FIGURE 5.1 – Ecosystem Respiration (ER), air and peat temperature, in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT).

2154 In terms of ER, mean and variability were the lowest in FRN among all sites ($1.75 \pm 0.83 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, Figure 5.1 – B). The highest variability and mean ER ($6.13 \pm 2.81 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, Figure 5.1 – C) were observed in LDM. On this site replicates had different behaviours even though they were close to each other and in a similar environment. In BDZ and LGT, ER mean values were 3.12 ± 0.92 and $4.10 \pm 1.15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectively (Figure 5.1 – A, B)

2160 5.2.2 ER and soil temperature synchronisation

2161 Figure 5.1 shows that the deeper the temperature was measured, the greater the
2162 shift with respect to ER. Taking this shift into account by synchronising soil tempera-
2163 tures with ER led to a significant positive linear correlation between the temperature
2164 measurement depth and the synchronisation time-delay (all sites pooled, $R^2=0.94$,
2165 $p<0.001$; Figure 5.2). The range of estimated time-delays decreased with depth up to
2166 -20 cm. At this depth the time-delay was 12 hours, i.e. a phase inversion on a daily
2167 timescale. For the three sites other than LDM, the slopes of the time-delay and mea-
2168 surement depth relationship were in a close range : 0.56, 0.54, 0.52 for FRN, BDZ and
2169 LGT respectively. The relationship for LDM was higher at -30 cm, leading to a steeper
2170 slope (0.66) than in the other sites (Figure 5.2). At the other depths, this site always
2171 had the highest time-delay, though the values were close to those of the other sites.
2172 BDZ always had the lowest time-delay, but like LDM, the values were close to those of
2173 the other sites, although slightly lower at -5 cm depth.

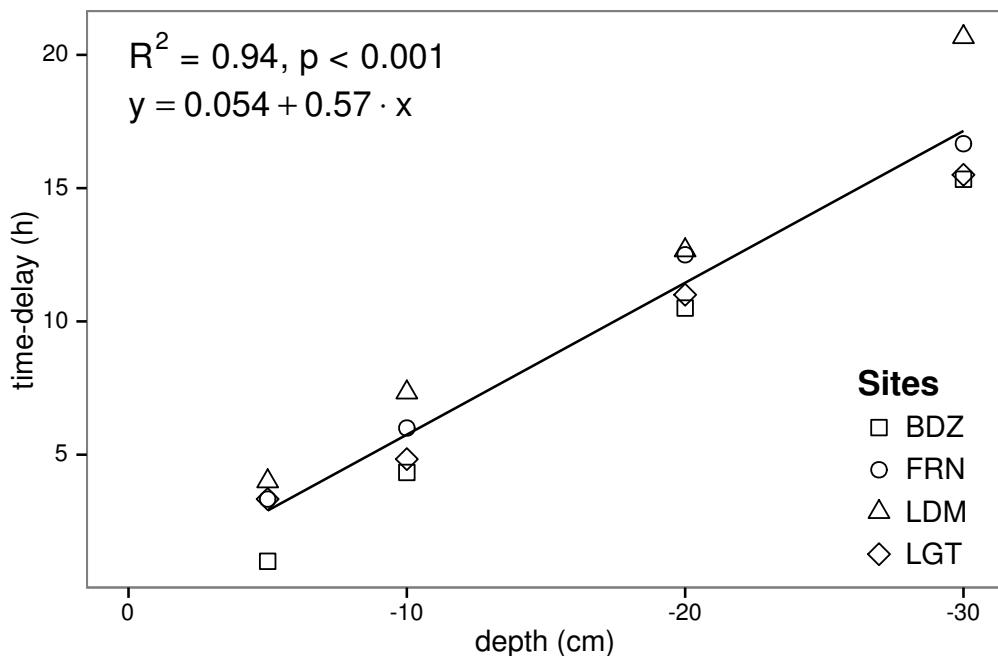


FIGURE 5.2 – Time delay between temperature at different depths and ER, in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT)

2174 5.2.3 Model implementation

2175 For both types of model (using non-synchronised and synchronised data), the dif-
2176 ferences between the 3 tested models were very small. The greatest differences, in R^2
2177 values, were 0.07 and 0.05 for non-synchronised and synchronised data respectively,
2178 whereas differences in NRMSE maximum values were 1.28 and 1.14 (Table 5.1). In
2179 most cases the linear model led to a slightly better R^2 than the others. As the diffe-
2180 rences between equations were small, however, we will describe the exponential model
2181 in the following sections, because (i) it is the most widely used model to describe the
2182 ER-temperature relationship and (ii) the Q_{10} value can be derived from this equation.
2183 This will allow the comparison of the results of our study to others.

2184 5.2.4 ER and temperature relationship

2185 The relationship between air temperature and ER, using the exponential model, was
2186 better in LGT and FRN ($R^2 > 0.55$) than in LDM and LDM ($R^2 < 0.35$) (Table 5.1).
2187 Nevertheless in all sites and with both linear and exponential models, using synchro-
2188 nised soil temperatures gave a better account of the ER variability than their non-
2189 synchronised counterparts (Figure 5.3). The goodness of fit (R^2) increased on average
2190 by 0.26 to 0.35 at -5 cm and -10 cm depth respectively. The degree of improvement
2191 varied however between sites. For instance, at -5 cm depth R^2 between synchronised
2192 and non-synchronised models increased by only 0.04 in BDZ while it increased by 0.47
2193 in FRN. The improvement gained by using synchronised data was higher at -5 cm and
2194 -10 cm than at deeper layers, with 0.12, 0.11 on average for -20 and -30 cm depth
2195 (Figure 5.3).

2196 A similar observation can be made for NRMSE. Regardless of some exceptions at
2197 deeper layers especially at -20 cm depth, the NRMSE values show that using syn-
2198 chronised data rather than non-synchronised ones improved the representation of ER
2199 variability at a daily timescale, indicating that depth measurements dependence is
2200 smaller for models using synchronised data than for models using non-synchronised

Tableau 5.1 – R^2 and NRMSE profile with depth for models using non-synchronised and synchronised data and for the three equations (linear : lin, exponential : exp, arrhenius : arr).

| depth | Non-synchronised | | | | | | Synchronised | | | | | |
|--------------------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
| | lin R ² | NRMSE | exp R ² | NRMSE | arr R ² | NRMSE | lin R ² | NRMSE | exp R ² | NRMSE | arr R ² | NRMSE |
| Bernadouze | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0.22 | 25.88 | 0.19 | 26.09 | 0.19 | 26.09 | 0.22 | 25.88 | 0.19 | 26.09 | 0.19 | 26.09 |
| -5 | 0.23 | 25.66 | 0.20 | 25.89 | 0.20 | 25.89 | 0.27 | 25.18 | 0.24 | 25.40 | 0.24 | 25.40 |
| -10 | 0.02 | 28.92 | 0.03 | 29.26 | 0.03 | 29.26 | 0.23 | 25.72 | 0.22 | 25.90 | 0.22 | 25.91 |
| -20 | 0.04 | 28.64 | 0.03 | 28.98 | 0.03 | 28.98 | 0.13 | 27.79 | 0.13 | 28.16 | 0.13 | 28.15 |
| -30 | 0.02 | 28.93 | 0.02 | 29.28 | 0.02 | 29.28 | 0.05 | 29.54 | 0.05 | 29.92 | 0.05 | 29.92 |
| Frasne | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0.66 | 27.58 | 0.63 | 26.74 | 0.63 | 26.96 | 0.66 | 27.58 | 0.63 | 26.74 | 0.63 | 26.96 |
| -5 | 0.19 | 42.34 | 0.21 | 43.00 | 0.21 | 43.01 | 0.68 | 26.34 | 0.68 | 25.02 | 0.68 | 25.06 |
| -10 | 0.01 | 46.73 | 0.00 | 48.01 | 0.00 | 48.01 | 0.59 | 29.98 | 0.60 | 29.20 | 0.60 | 29.22 |
| -20 | 0.34 | 38.29 | 0.27 | 38.78 | 0.27 | 38.77 | 0.34 | 38.05 | 0.36 | 39.17 | 0.36 | 39.16 |
| -30 | 0.03 | 46.30 | 0.03 | 47.47 | 0.03 | 47.47 | 0.18 | 43.66 | 0.19 | 44.75 | 0.19 | 44.74 |
| Landemarais | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0.29 | 38.55 | 0.32 | 39.31 | 0.32 | 39.24 | 0.29 | 38.55 | 0.32 | 39.31 | 0.32 | 39.24 |
| -5 | 0.03 | 45.18 | 0.04 | 46.06 | 0.04 | 46.07 | 0.21 | 40.63 | 0.25 | 41.58 | 0.25 | 41.57 |
| -10 | 0.05 | 44.53 | 0.04 | 45.45 | 0.04 | 45.45 | 0.13 | 42.65 | 0.16 | 43.71 | 0.16 | 43.7 |
| -20 | 0.09 | 43.75 | 0.08 | 44.55 | 0.08 | 44.55 | 0.09 | 43.83 | 0.12 | 44.97 | 0.12 | 44.97 |
| -30 | 0.03 | 45.09 | 0.02 | 46.07 | 0.02 | 46.07 | 0.13 | 44.94 | 0.12 | 46.02 | 0.12 | NA |
| La Guette | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0.61 | 17.44 | 0.56 | 17.30 | 0.56 | 17.34 | 0.61 | 17.44 | 0.56 | 17.30 | 0.56 | 17.34 |
| -5 | 0.31 | 23.27 | 0.29 | 23.24 | 0.28 | 23.26 | 0.63 | 16.83 | 0.59 | 16.49 | 0.58 | 16.51 |
| -10 | 0.08 | 26.89 | 0.07 | 27.09 | 0.07 | 27.10 | 0.61 | 17.21 | 0.57 | 16.84 | 0.57 | 16.85 |
| -20 | 0.30 | 23.41 | 0.27 | 23.30 | 0.27 | 23.30 | 0.54 | 18.93 | 0.51 | 19.01 | 0.51 | 19.01 |
| -30 | 0.12 | 26.25 | 0.11 | 26.37 | 0.11 | 26.37 | 0.39 | 22.18 | 0.36 | 22.26 | 0.36 | 22.26 |

5.2. Results

2201 data. However with increasing depth R^2 values still decreased and NRMSE values still
2202 increased. For FRN, LDM and LGT, synchronised data at -5 cm depth gave a better
2203 account of the ER variability than surface air temperature (Figure 5.3). This was not
2204 the case in LDM, where temperature at the surface was the best descriptor of ER. For
2205 both R^2 and NRMSE the values at -20 cm depth were better than those observed at
2206 -10 or -30 cm depth. This pattern was observed with different magnitudes among sites,
2207 and was particularly visible in FRN and LGT. For the most part, the synchronisation
2208 of data led to higher R^2 and NRMSE values for models using one soil temperature, at
2209 a daily scale on *sphagnum*-dominated peatlands.

2210 5.2.5 Q_{10} evolution

2211 The Q_{10} stood between 0 and 2.5 for non-synchronised data with a maximum at
2212 -5 cm depth. Average values were 1.4, 2.4 and 1.3, at the surface, -5 and -10 cm depth
2213 respectively (Figure 5.4). Average Q_{10} values at the surface and -10 cm depth were
2214 very similar. However there was much more variability at -10 cm depth, where the
2215 values ranged from 0.1 to 2.1, than at the surface where the values stood between 1.3
2216 and 1.5. Beyond -10 cm depth Q_{10} values fell almost to 0, while for non-synchronised
2217 data Q_{10} values greatly increased with depth, reaching meaningless values. Q_{10} values
2218 estimated with surface temperature were very similar between sites with an average of
2219 1.4 (Figure 5.4). It increased to about 2.5 at -5 cm depth, with both synchronised and
2220 non-synchronised data. Below this depth, Q_{10} estimated with both methods either de-
2221 creased downwards (non-synchronised) or increased (synchronised data) to unrealistic
2222 values (Figure 5.4).

2223 5.2.6 Daytime and nighttime differences

2224 For BDZ and LDM sites no significant differences were found between daytime and
2225 nighttime data no matter which model was used, whereas differences were found for
2226 FRN and LGT (Figure 5.5). In FRN, synchronisation increased the significance of the
2227 differences : $p < 0.001$ with and $p < 0.01$ without synchronisation respectively. The

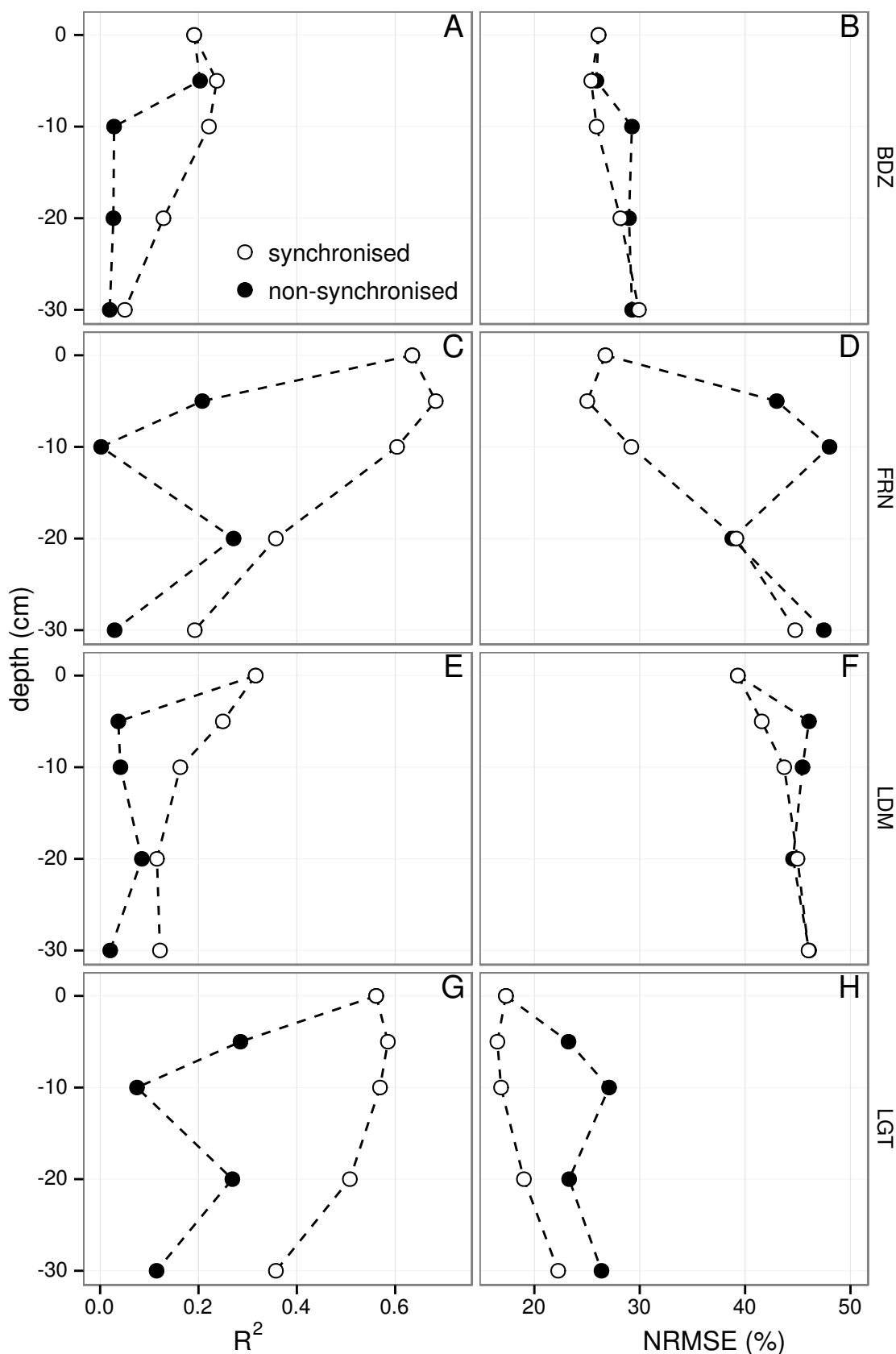


FIGURE 5.3 – Profile of R^2 and NRMSE, (RMSE, normalized by the mean), with depth, in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT) using the exponential model.

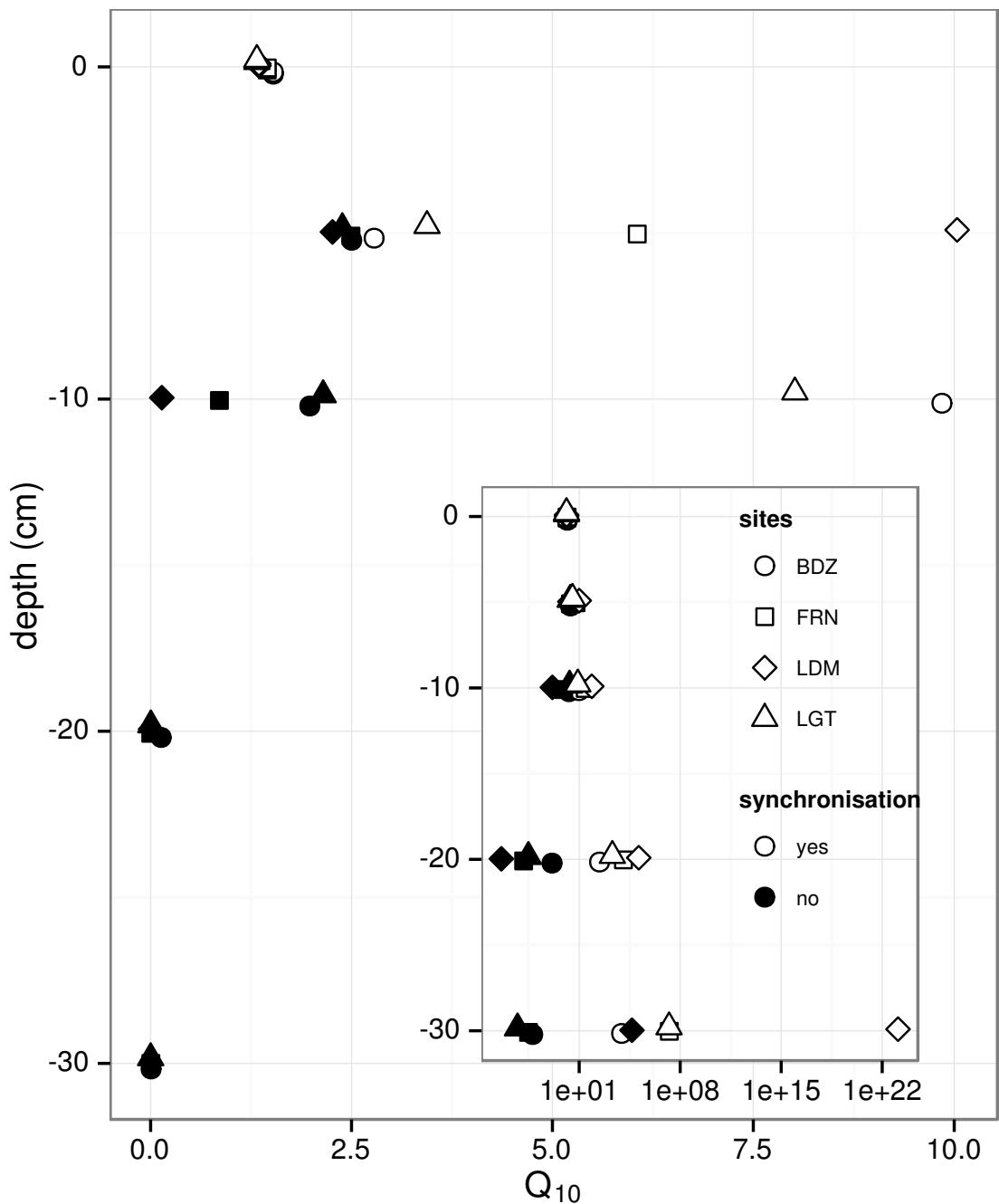


FIGURE 5.4 – Profile of Q_{10} with depth for synchronised (white) and non synchronised (black) data and exponential model in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT).

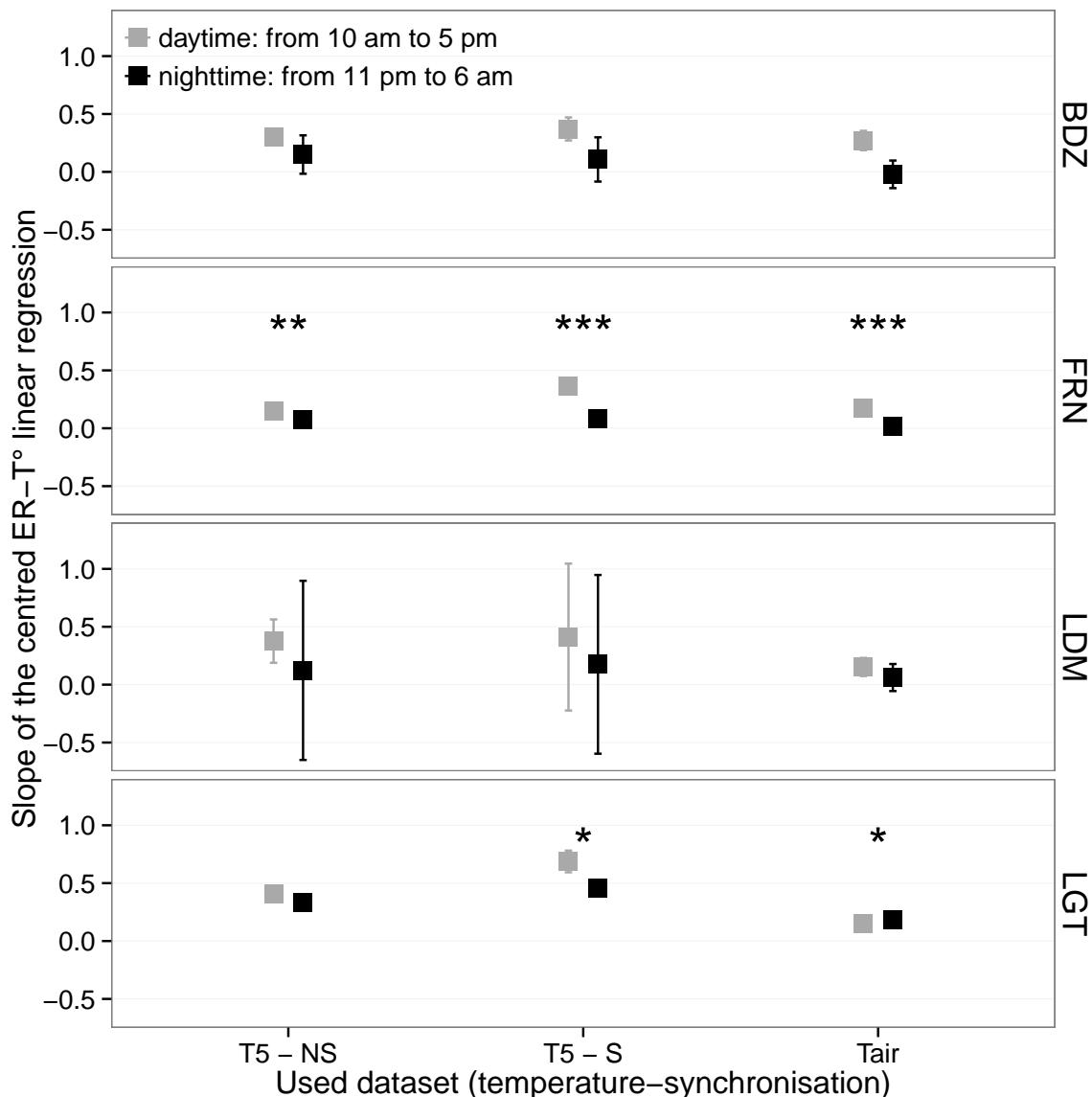


FIGURE 5.5 – Differences between daytime and nighttime measurements using 3 models : non-synchronised data at -5 cm depth temperature (T5 – NS), synchronised data at -5 cm depth temperature (T5 – S), and non-synchronised data at air temperature (Tair).

same pattern was found in LGT but with lower significance. Hence models using -5 cm depth with non-synchronised data are not significantly different but those using synchronised data are. Note that, for LGT, the model using air temperature had a daytime slope that was higher than the nighttime one, which was the opposite of all the other cases.

5.2. Results

Tableau 5.2 – Peat chemical properties as a function of depth in cm : content (%) N, C, H, S, the total, retention and effective porosity, Φ_T , Φ_R , Φ_E respectively in $m^3.m^{-3}$, solid peat volumic fraction in $m^3.m^{-3}$ and the bulk density (Bd) in $g.cm^{-3}$.

| level | N | C | H | S | Φ_T | Φ_R | Φ_E | solid | Bd |
|-------------|------|-------|------|------|----------|----------|----------|-------|------|
| Bernadouze | | | | | | | | | |
| 0–5 | 1.76 | 41.84 | 6.05 | 0.05 | 0.99 | 0.47 | 0.52 | 0.01 | 0.03 |
| 5–10 | 1.99 | 43.99 | 6.18 | 0.07 | 0.97 | 0.78 | 0.19 | 0.03 | 0.06 |
| 10–15 | 2.28 | 45.38 | 6.35 | 0.10 | 0.96 | 0.92 | 0.04 | 0.04 | 0.10 |
| 15–20 | 2.92 | 44.95 | 6.23 | 0.23 | 0.95 | 0.82 | 0.13 | 0.05 | 0.11 |
| 20–25 | 3.14 | 39.01 | 5.31 | 0.23 | 0.93 | 0.90 | 0.04 | 0.07 | 0.16 |
| 25–30 | 2.50 | 31.15 | 4.28 | 0.13 | 0.89 | 0.86 | 0.03 | 0.11 | 0.24 |
| Frasne | | | | | | | | | |
| 0–5 | 1.73 | 43.67 | 6.24 | 0.00 | 0.99 | 0.40 | 0.58 | 0.01 | 0.03 |
| 5–10 | 1.55 | 43.35 | 5.97 | 0.00 | 0.98 | 0.59 | 0.40 | 0.02 | 0.03 |
| 10–15 | 1.69 | 43.49 | 6.17 | 0.00 | 0.98 | 0.89 | 0.09 | 0.02 | 0.05 |
| 15–20 | 1.63 | 43.06 | 5.97 | 0.00 | 0.98 | 0.89 | 0.09 | 0.02 | 0.05 |
| 20–25 | 1.30 | 43.68 | 6.29 | 0.05 | 0.98 | 0.93 | 0.04 | 0.02 | 0.05 |
| 25–30 | 1.48 | 43.44 | 6.21 | 0.03 | 0.98 | 0.87 | 0.11 | 0.02 | 0.05 |
| Landemarais | | | | | | | | | |
| 0–5 | 1.36 | 45.63 | 5.69 | 0.25 | 0.97 | 0.62 | 0.35 | 0.03 | 0.07 |
| 5–10 | 3.08 | 47.37 | 5.37 | 0.09 | 0.95 | 0.74 | 0.21 | 0.05 | 0.11 |
| 10–15 | 2.73 | 48.34 | 5.63 | 0.10 | 0.94 | 0.94 | 0.00 | 0.06 | 0.13 |
| 15–20 | 2.54 | 48.67 | 5.64 | 0.30 | 0.96 | 0.81 | 0.15 | 0.04 | 0.10 |
| 20–25 | 2.08 | 46.99 | 5.80 | 0.23 | 0.97 | 0.89 | 0.08 | 0.03 | 0.07 |
| 25–30 | 1.57 | 45.65 | 6.23 | 0.21 | 0.97 | 0.89 | 0.08 | 0.03 | 0.07 |
| La Guette | | | | | | | | | |
| 0–5 | 1.55 | 38.33 | 5.23 | 0.05 | 0.97 | 0.61 | 0.36 | 0.03 | 0.05 |
| 5–10 | 2.35 | 41.31 | 4.66 | 0.20 | 0.93 | 0.83 | 0.10 | 0.07 | 0.08 |
| 10–15 | 2.34 | 43.81 | 5.72 | 0.18 | 0.91 | 0.89 | 0.02 | 0.09 | 0.10 |
| 15–20 | 1.99 | 43.17 | 5.45 | 0.10 | 0.89 | 0.87 | 0.01 | 0.11 | 0.13 |
| 20–25 | 1.90 | 37.91 | 4.83 | 0.05 | 0.88 | 0.83 | 0.05 | 0.12 | 0.15 |
| 25–30 | 1.32 | 18.95 | 2.32 | 0.01 | 0.79 | 0.76 | 0.03 | 0.21 | 0.28 |

5.2.7 Peat characterisation

²²³³ Elemental compositions were similar in all sites : 1–3%, 4–6% and <1% for N, H
²²³⁴ and S respectively (Table 5.2). C content was mainly between 40 and 50 %, except at
²²³⁵ the deeper levels in LDM and LGT where values were lower (< 32%).

2237 5.3 Discussion

2238 5.3.1 ER differences between sites

2239 The ER fluxes calculated in the 4 sites were in the same order of magnitude as those
2240 of peatlands found in the literature. ?, for instance, found ER values ranging from 2
2241 to 5 during the same period as this study, i.e. July to October 2004. In the present
2242 study, the models performed poorly in 2 sites, BDZ and LDM. For BDZ, amplitudes of
2243 both ER and temperatures were low (Figure 5.1 – A, E) making the representation of
2244 ER possible only on a short temperature span. With such low ranges of both ER and
2245 temperature, it can be assumed that ER variability was due to the variability between
2246 plots. For LDM, the ER fluxes were measured in plots that were more heterogeneous
2247 than expected, resulting in strong variability (Figure 5.1 – C). This observation is
2248 consistent with the high NRMSE value calculated for this site (39.3 % for BDZ against
2249 26.1 % for LDM) whereas the R^2 values for these two sites were close, 0.19 and 0.32
2250 for BDZ and LDM respectively, using surface air temperature and an exponential
2251 relationship. It is noteworthy that in FRN the NRMSE values were high with respect
2252 to R^2 values. This result can be explained by the fact that the mean ER flux was
2253 low ($1.75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and thus had a strong influence on NRMSE as we used mean
2254 normalization. Finally at -20 cm depth, models using non-synchronised data showed,
2255 an increase in R^2 and a decrease in NRMSE which was more or less observable in
2256 the different sites : clearly in FRN, LGT and to a lesser extent in LDM, but barely
2257 perceivable in BDZ. At this depth the temperature and the ER signal phases are
2258 opposed making the non-synchronised models better at representing ER than at -10
2259 or -30 centimetres but with a reverse relationship. The ER fluxes thus show different
2260 behaviours either in their amplitude or in their homogeneity

2261 5.3.2 Time-delay between temperature and ER

2262 Time-delays between soil temperatures and ER occur in *Sphagnum*-dominated peat-
2263 lands. They occur even close to the soil surface and increase with depth. The relation-
2264 ship between time-delays and depth was similar in all the studied sites although LDM
2265 had slightly higher time-delays. The overall delay observed in peat soils, 0.57 hours
2266 per centimetre, was higher than those found by Pavelka *et al.* (2007) in a forest and
2267 in a grassland ecosystem and by Parkin et Kaspar (2003) on two agricultural soils (0.4
2268 and 0.5 hours per centimetre respectively). This is coherent with the fact that peat soil
2269 has a lower thermal diffusivity than mineral soils (Farouki, 1981; Arya, 2001). LDM
2270 was the only site with a slightly higher slope especially at -30 cm. This was expected
2271 as soil diffusivity increases with wetness (Hillel, 2003) and LDM was the site with the
2272 lowest water table level. This was confirmed by thermal conductivity measurements
2273 conducted on the peat cores (data not shown). Overall, it should be noted that the
2274 time-delays were similar in all the studied sites despite their variability in terms of ER
2275 fluxes.

2276 5.3.3 Synchronising ER and temperature improves ER sensit- 2277 vity to temperature representation

2278 In spite of the importance of lags between physical phenomena and biological
2279 activities (Vargas *et al.*, 2010), few studies have addressed the effect of time-delays bet-
2280 ween soil temperature and global biological activity (ER) at the daily timescale. At this
2281 scale, we showed in peatlands that using synchronised data improved the representation
2282 of the temperature sensitivity of ER. The improvement provided by synchronisation
2283 was evidenced at shallow depth. The best goodness-of-fit obtained with synchronised
2284 data and models using one temperature, was found at -5 cm depth. These observations
2285 are in agreement with those of Pavelka *et al.* (2007) who also found a decreasing ef-
2286 fect of synchronisation with depth. Such a lesser depth effect could be explained by
2287 a simultaneous decrease in temperature amplitude. Because the goodness-of-fit of the

non-synchronised data increases at -20 cm, the synchronisation effect strongly decreases at this depth. This pattern is visible, with various amplitudes, in the different sites. It is explained by the 12 h time-delay (Figure 5.2) corresponding to a phase inversion that occurs at this depth between the ER and the daily temperature courses. Such a phase inversion was found deeper, at -30 cm by Pavelka *et al.* (2007), due to a higher temperature diffusivity in mineral soils. Finally in our study these models, using synchronised -5 cm depth temperature, show slightly higher R^2 and lower NRMSE values than those using surface air temperature.

5.3.4 Differences between daytime and nighttime ER measurements

The significant differences observed between daytime and nighttime measurements corroborate other studies in which these differences were found using chamber techniques (Juszczak *et al.*, 2012; Darenova *et al.*, 2014). The fact that some sites show significant differences (FRN and LGT) and not others (BDZ and LDM) seems to be linked to the variability between plots and temperature amplitude. When temperature amplitude was low, most of the variability originated from spatial variability between plots. This was also corroborated by a test done on LGT where we calculated the day and night differences only on the last two days when temperature amplitude was the greatest. As a result the significance increased from $p < 0.05$ to $p < 0.01$ for the synchronised model using -5 cm depth temperature and the differences observed in the model using air temperature were no longer significant any more ($p > 0.05$).

5.3.5 Q_{10} sensitivity to temperature depth and synchronisation

In shallow layers (≤ 10 cm), the Q_{10} values calculated with non-synchronised data in the ranges that are usually reported, i.e. between 1.3 to 3.3 (Raich et Schlesinger, 1992). At deeper levels in the peat profile (≥ 10 cm), they reach 0 as the relationship between ER and the temperature weakens, and is not compensated by a long term

5.4. Conclusions

evolution. A similar behaviour was found by [Pavelka *et al.* \(2007\)](#) even if this Q_{10} decrease with depth is not usually seen and most studies show the opposite, namely an increase in Q_{10} values with depth ([Graf *et al.*, 2008](#)). This apparent contradiction may be explained by the length of the study. Because of its short duration, the effect of the time-delays on ER were preponderant over the temperature effect. Synchronisation also led to meaningless high Q_{10} values because synchronisation can explain a higher proportion of ER flux with a smaller temperature variation. Temperature amplitude decreases with depth because of soil dampening.

[2322](#) 5.4 Conclusions

We showed that the time-delays between ER and soil temperatures at different depths are significant on a daily timescale as the signals are shifted 30 minutes every centimetre. At this scale the use of synchronised soil temperature, to take into account these time-delays, can improve the representation of ER particularly in the first 10 centimetres. Only one of the studied sites showed highly significant differences between daytime and nighttime measurements. However it is possible that such differences exist in the other sites, depending on the environmental conditions (e.g. temperature amplitude) and spatial variability in the ER fluxes. Addressing questions of bio-physical coupling in determining ER at different timescales requires high frequency observations ([Vargas *et al.*, 2011](#)). Even if the automated chamber technique is increasingly used, it cannot be easily deployed in some sites due to tall vegetation, power supply difficulties, or harsh environmental conditions. In contrast, temperature measurements at different depths are easy to conduct, robust to harsh conditions and can be powered by a small solar panel. A calibration campaign with human manipulated closed chambers could be carried out to assess ER variability at different timescales. Coupling temperature profile and punctual ER measurements and then using synchronised data in models may be a good alternative in sites where automated chambers are not easily implantable.

²³⁴⁰ Acknowledgements

²³⁴¹ The work was funded as part of the Peatland National Observatory Service (Service
²³⁴² national d'observation Tourbières, certified by the CNRS/INSU) as the four studied
²³⁴³ sites are part of this Service. The authors are also indebted to the site managers for
²³⁴⁴ permitting access to the studied peatlands. We also acknowledge support from Labex
²³⁴⁵ VOLTAIRE (ANR-10-LABX-100-01). Finally we would like to thank Elizabeth Rowley-
²³⁴⁶ Jolivet for corrections to the manuscript.

2347

2348

SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

2349 L'étude des flux de carbone dans les écosystèmes tourbeux est complexe car assu-
2350 jetti à des facteurs de contrôle dont la prépondérance varie fortement selon l'échelle
2351 considérée et les conditions environnementales. Les effets d'un facteur contrôlant sur
2352 un flux de gaz vont généralement dans le même sens dans la littérature : une hausse
2353 de la température à tendance à augmenter les flux. Une augmentation du niveau de
2354 la nappe à tendance à favoriser la production de CH₄ par rapport à celle du CO₂. La
2355 végétation semble faciliter les échanges de gaz et libère des substrats facilement mo-
2356 bilitables. Outre le fait que ces facteurs co-varient et qu'il donc difficile de distinguer
2357 leurs effets, ces effets sur les différents flux en terme de bilan de carbone est beaucoup
2358 moins nette, d'où la nécessité d'estimer des bilans de carbone sur ces écosystèmes.

2359 Bilan du bilan (de C) ?

2360 Les observations réalisées sur la tourbière de La Guette ont permis de mettre en
2361 évidence des flux de CO₂ particulièrement fort que ce soit pour la RE ou la PPB. Ces
2362 flux annuels, plus fort que ceux relevés dans les tourbières boréales, sont cependant
2363 moins important que ceux mesurés dans des tourbières utilisées comme pâties per-
2364 manentes. Ces observations sont cohérentes avec les observations de terrain. En effet
2365 la présence d'une végétation vasculaire herbacée largement dominante (*Molinia caeru-*
2366 *lea*) rapproche davantage la tourbière de La Guette d'une prairie tourbeuse que d'une
2367 tourbière boréale où prédomine les sphaignes. Le niveau de la nappe particulièrement
2368 élevé pendant les deux années de mesure a probablement limité en partie les flux de
2369 CO₂ sans pour autant les empêcher. En effet à la fois *Molinia caerulea* et *Eriophorum*
2370 *Augustifolium* (**Vaginatum oui mais augustifolium ?**) possèdent un aérenchyme,
2371 cette adaptation aux milieux inondés leur permettant de maintenir des échanges ga-
2372 zeux de leurs racines à l'atmosphère. Par ailleurs la situation géographique locale et
2373 globale du site : une tourbière de plaine située à basse latitude, joue également sur la
2374 saisonnalité du climat, plus faible qu'en montagne, et permettant aux flux de rester

plus fort pendant une période de l'année plus importante. Les flux de CH₄ ne semblent quant à eux pas être contraint par le niveau de la nappe pendant les deux années de mesures. Leur relation avec la végétation laisse encore une fois penser un effet possible de l'aérenchyme.

Ces travaux ont également montré la forte variabilité spatiale des flux de CO₂. Le nombre limité de points de mesure du CH₄ ne permettant pas d'affirmer quoi que ce soit de ce côté là. (**dvlpé var spa + vég**)

La prise en compte de la végétation reste une difficulté importante, l'observation répétée nécessitant des mesures non destructives, souvent imprécises ou très coûteuses en temps. Paradoxalement les zones de la tourbière fonctionnant en puits de carbone sont celle où les herbacées sont dominantes.

Modélisation saisonnière et mesures horaires

Les estimations des flux de la tourbière de La Guette par les modèles du chapitre 3 ont été calculées à l'heure. Elles ont donc pu être comparées aux données acquises sur le même site lors d'autres expérimentations, notamment grâce à l'utilisation de méthodes de mesures identiques sur l'ensemble de ces travaux. Ainsi si l'on compare la RE estimée à l'aide des modèles RE-1 et RE-3 (chapitre 3) aux données acquises à haute fréquence (chapitre 5) on observe un écart important entre les valeurs mesurées et celles estimées par les modèles (Figure 5.6). Pour expliquer cet écart on peut considérer les deux points suivants :

Premier point, on compare des modèles qui prennent en compte la variabilité spatiale du site (une partie au moins, à travers les vingt points qui on servi à les calibrer) à des mesures réalisées sur quatre embases dans une zone restreinte de la tourbière (20 x 20 m). Ces quatre points ayant une représentativité spatiale limitée et ont été choisi pour leur similarités. Cet écart peut donc être en partie le reflet de la variabilité spatiale des flux dans la tourbière. Cet argument est soutenu par les mesures de RE réalisées le 24 et le 25 juillet 2013, soit 5 jours avant les mesures haute fréquence et dont la gamme de valeur est comprise entre 4,8 et 18,9 µmol m⁻² s⁻¹ et sont représentés par le fond gris

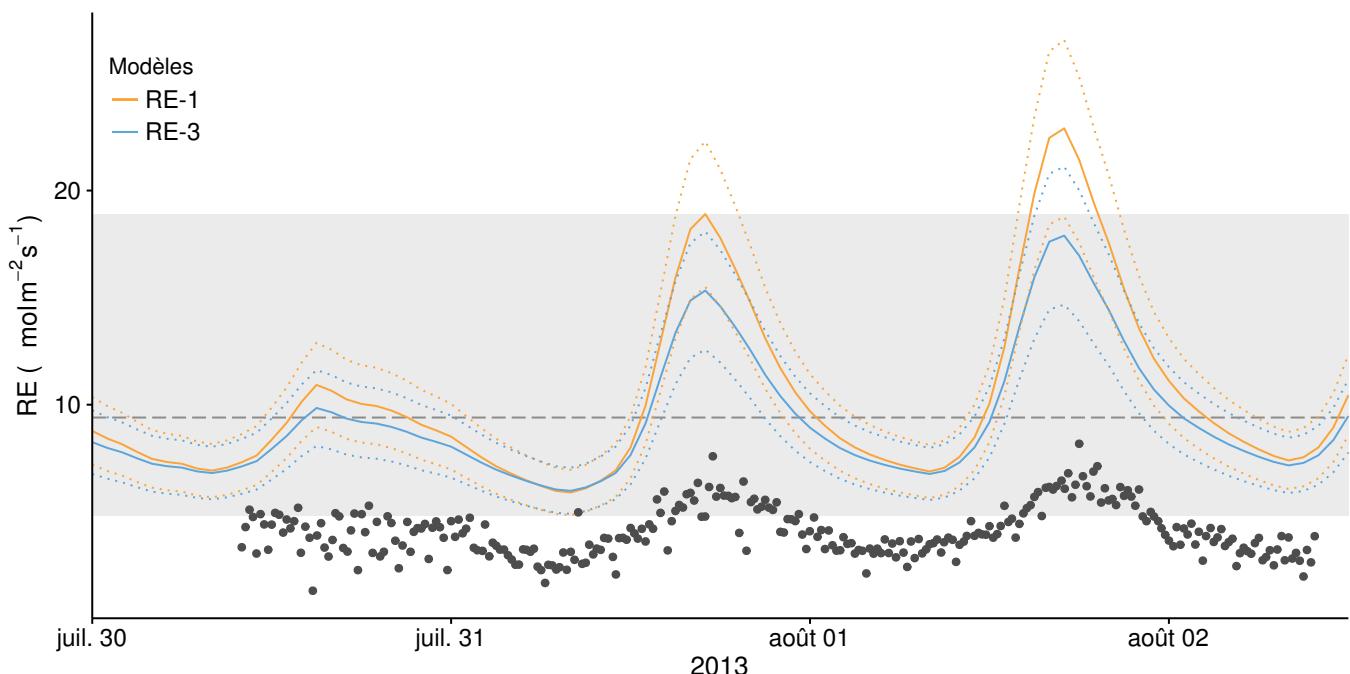


FIGURE 5.6 – Comparaison entre les valeurs estimées par les modèles RE-1 (ligne orange), RE-3 (ligne bleue) et les mesures faites à haute fréquence sur le site du 30 juillet au 2 août 2013 (points noirs). Les lignes de pointillés représentent l'erreur (NRMSE) associée aux modèles. La zone grisée correspond à la gamme de valeur de la RE mesurée sur l'ensemble des 20 placettes pendant la campagne du 24-25 juillet 2013. La ligne de tiret correspond à la moyenne de la RE pour cette campagne.

sur la figure 5.6. Les estimations des modèles RE-1 et RE-3 restent d'ailleurs majoritairement dans cette gamme de valeurs. Par ailleurs, la placette p04 (Figure 3.1) la plus proche des mesures haute fréquences, est dans la gamme basse des flux que ce soit pour la campagne du 24-25 juillet : troisième flux le plus faible mesuré ($6,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ou en moyenne sur l'ensemble de mesure où elle vaut $2,81 \pm 1,60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ par rapport à la moyenne de l'ensemble des placettes valant $3,77 \pm 2,89 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Second point, le modèle est calibré à partir de moyennes des flux par campagne de mesure (Figure ??). Ces moyennes sont comprises entre $0,69 \pm 0,27$ et $9,43 \pm 3,48 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, par conséquent les estimations des modèles, dont RE-1, en dehors de cette gamme sont du domaine de l'extrapolation et donc à considérer avec précaution.

Ces deux points considérés, il semble que les estimations des modèles RE-1 et RE-3, malgré les écarts que l'on peut observées, restent cohérentes avec les mesures effectuées aux différentes échelles. Le modèle RE-3 restant davantage encore que le modèle RE-1 dans la gamme de valeur attribuable en grande partie, à la variabilité spatiale. Cette

²⁴¹⁷ comparaison montre également l'importance de la variabilité spatiale des flux dans les
²⁴¹⁸ tourbières et la difficulté qu'il peut y avoir à la prendre en compte de façon satisfaisante.

²⁴¹⁹ L'hydrologie

²⁴²⁰ L'effet de la restauration hydrologique de la tourbière de La Guette n'a pas pu
²⁴²¹ être mis en évidence de part une pluviométrie forte et un niveau de nappe toujours
²⁴²² important. Les expérimentations

²⁴²³ Résilience de la tourbe par rapport aux 2 années sèches qui pré- ²⁴²⁴ cèdent le BdC

²⁴²⁵ (lien chap 3 et 4)

²⁴²⁶ Les prendre en compte amélioreraient-il les modèles
²⁴²⁷ modèles globaux ? **limitations des équations** : Plus généralement, la majorité
²⁴²⁸ des tourbières sont sous la neige une partie de l'année, ce qui n'arrive que rarement sur
²⁴²⁹ la tourbière de La Guette et une partie possède également des zones d'eau libre, qui
²⁴³⁰ n'existent pas sur ce site.

²⁴³¹ modèles globaux et profondeur de tourbe

²⁴³² Ouverture vers d'autre méthodes de mesures

²⁴³³ — chambre automatique (lien chap 5, et chap 3 ?)
²⁴³⁴ — tour eddy covariance (lien chap 5 et chap 3 ?)

²⁴³⁵ perspectives

²⁴³⁶ La suite du projet CARBIODIV permettra peut être de mettre en évidence l'effet
²⁴³⁷ de la restauration.

²⁴³⁸ Un partenariat avec le LSCE commencé pendant ces travaux devra permettre de
²⁴³⁹ valoriser ces données à des échelles plus importante. Des données on d'ors et déjà été
²⁴⁴⁰ envoyée à Chloé XX qui développe un code "tourbière" dans le modèle ORCHIDEE.

²⁴⁴¹ L'installation prochaine d'une tour eddy covariance sur le site permettra de com-
²⁴⁴² parer ce bilan à des mesures plus haute fréquence.

²⁴⁴³ Modèles : PCARS (frolking2002), MWM (Wu2013), TOPMODEL (Stocker2014)

²⁴⁴⁴ idées

²⁴⁴⁵ L'amélioration du protocole de végétation (RVI?)

²⁴⁴⁶ Amélioration des chambres (contrôle de la température? de la vitesse du ventila-
²⁴⁴⁷ teur? plus grande? aquisition automatisée du PAR sur la chambre)

²⁴⁴⁸ l'inclusion des arbres

²⁴⁴⁹ Correction du volume par pondération de la surface

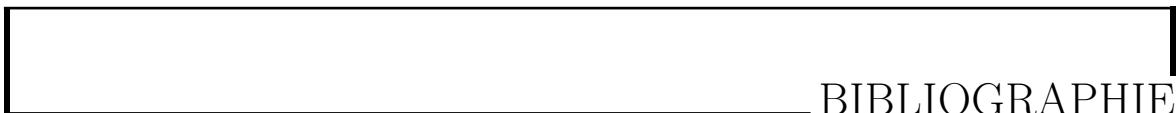
²⁴⁵⁰ Utilisation de chambres automatiques/EC

²⁴⁵¹ Humidité du sol

²⁴⁵² Propriétés physique de la tourbe (en cours)

2453

2454



BIBLIOGRAPHIE

- 2455 AERTS, R. et LUDWIG, F. (1997). Water-table changes and nutritional status affect
 2456 trace gas emissions from laboratory columns of peatland soils. *Soil Biology and*
 2457 *Biochemistry*, 29(11–12):1691–1698.
- 2458 ALM, J., SAARNIO, S., NYKÄNEN, H., SILVOLA, J. et MARTIKAINEN, P. (1999). Winter
 2459 CO₂, CH₄ and N₂O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeo-*
 2460 *chemistry*, 44(2):163–186.
- 2461 ALM, J., TALANOV, A., SAARNIO, S., SILVOLA, J., IKKONEN, E., AALTONEN, H.,
 2462 NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1997). Reconstruction of the carbon balance
 2463 for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland. *Oecologia*, 110:423–431.
- 2464 ANDREJKO, M. J., FIENE, F. et COHEN, A. D. (1983). Comparison of ashing techniques
 2465 for determination of the inorganic content of peats. In *Testing of Peats and Organic*
 2466 *Soils : A Symposium*, volume 820, pages 5–10. ASTM International.
- 2467 ARCHER, D., EBY, M., BROVKIN, V., RIDGWELL, A., CAO, L., MIKOŁAJEWICZ, U.,
 2468 CALDEIRA, K., MATSUMOTO, K., MUNHOVEN, G., MONTENEGRO, A. et OTHERS
 2469 (2009). Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide. *Annu. Rev. Earth Planet.*
 2470 *Sci.*, 37(1):117.
- 2471 ARYA, S. P. (2001). *Introduction to Micrometeorology*, volume 79 de *International*
 2472 *Geophysics Series*. Academic Press.
- 2473 AURELA, M., RIUTTA, T., LAURILA, T., TUOVINEN, J.-P., VESALA, T., TUITTIILA,
 2474 E.-S., RINNE, J., HAAPANALA, S. et LAINE, J. (2007). CO₂ exchange of a sedge fen
 2475 in southern Finland—the impact of a drought period. *Tellus B*, 59(5):826–837.
- 2476 BALLANTYNE, D. M., HRIBLJAN, J. A., PYPKER, T. G. et CHIMNER, R. A. (2014).
 2477 Long-term water table manipulations alter peatland gaseous carbon fluxes in nor-
 2478 thern Michigan. *Wetlands Ecol. Manage.*, 22(1):35–47.
- 2479 BATJES, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil*
 2480 *Sci.*, 47(2):151–163.
- 2481 BEER, C., REICHSTEIN, M., TOMELLERI, E., CIAIS, P., JUNG, M., CARVALHAIS, N.,
 2482 RÖDENBECK, C., ARAIN, M. A., BALDOCCHI, D., BONAN, G. B., BONDEAU, A.,

- 2483 CESCATTI, A., LASSLOP, G., LINDROTH, A., LOMAS, M., LUYSSAERT, S., MARGO-
2484 LIS, H., OLESON, K. W., ROUPSARD, O., VEENENDAAL, E., VIOVY, N., WILLIAMS,
2485 C., WOODWARD, F. I. et PAPALE, D. (2010). Terrestrial Gross Carbon Dioxide Up-
2486 take : Global Distribution and Covariation with Climate. *Science*, 329(5993):834–838.
- 2487 BELLISARIO, L. M., BUBIER, J. L., MOORE, T. R. et CHANTON, J. P. (1999). Controls
2488 on CH₄ emissions from a northern peatland. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(1):81–
2489 91.
- 2490 BEYER, C., LIEBERSBACH, H. et HÖPER, H. (2015). Multiyear greenhouse gas flux
2491 measurements on a temperate fen soil used for cropland or grassland. *J. Plant Nutr.
2492 Soil Sci.*, pages n/a–n/a.
- 2493 BLODAU, C. (2002). Carbon cycling in peatlands. A review of processes and controls.
2494 *Environmental Reviews*, 10(2):111–134.
- 2495 BLODAU, C., BASILIKO, N. et MOORE, T. R. (2004). Carbon turnover in peatland
2496 mesocosms exposed to different water table levels. *Biogeochemistry*, 67(3):331–351.
- 2497 BOND-LAMBERTY, B. et THOMSON, A. (2010). Temperature-associated increases in
2498 the global soil respiration record. *Nature*, 464(7288):579–582.
- 2499 BORTOLUZZI, E., EPRON, D., SIEGENTHALER, A., GILBERT, D. et BUTTLER, A.
2500 (2006). Carbon balance of a European mountain bog at contrasting stages of re-
2501 generation. *New Phytol.*, 172(4):708–718.
- 2502 BUBIER, J. (1995). The relationship of vegetation to methane emission and hydroche-
2503 mical gradients in northern peatlands. *J Ecol*, 83(3):403–420.
- 2504 BUBIER, J., COSTELLO, A., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et SAVAGE, K. (1993).
2505 Microtopography and methane flux in boreal peatlands, northern Ontario, Canada.
2506 *Canadian Journal of Botany*, 71(8):1056–1063.
- 2507 BUBIER, J. L., BHATIA, G., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et LAFLEUR, P. M. (2003).
2508 Spatial and Temporal Variability in Growing-Season Net Ecosystem Carbon Dioxide
2509 Exchange at a Large Peatland in Ontario, Canada. *Ecosystems*, 6:353–367.
- 2510 BUBIER, J. L., CRILL, P. M., MOORE, T. R., SAVAGE, K. et VARNER, R. K. (1998).
2511 Seasonal patterns and controls on net ecosystem CO₂ exchange in a boreal peatland
2512 complex. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(4):703–714.
- 2513 BUBIER, J. L., MOORE, T. R., BELLISARIO, L., COMER, N. T. et CRILL, P. M. (1995).
2514 Ecological controls on methane emissions from a Northern Peatland Complex in the
2515 zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada. *Global Biogeochemical Cycles*,
2516 9(4):455–470.
- 2517 BUCKLAND, P. C. (1993). Peatland archaeology : a conservation resource on the edge
2518 of extinction. *Biodivers. Conserv.*, 2(5):513–527.
- 2519 CAI, T., FLANAGAN, L. B. et SYED, K. H. (2010). Warmer and drier conditions
2520 stimulate respiration more than photosynthesis in a boreal peatland ecosystem :
2521 Analysis of automatic chambers and eddy covariance measurements. *Plant Cell
2522 Environ.*, 33(3):394–407.

- 2523 CHANTON, J. P. (2005). The effect of gas transport on the isotope signature of methane
2524 in wetlands. *Org. Geochem.*, 36(5):753–768.
- 2525 CHAPIN, F., WOODWELL, G., RANDERSON, J., LOVETT, G., RASTETTER, E., BAL-
2526 DOCCHI, D., CLARK, D., HARMAN, M., SCHIMEL, D., VALENTINI, R., WIRTH, C.,
2527 ABER, J., COLE, J., GIBLIN, A., GOULDEN, M., HARDEN, J., HEIMANN, M., HO-
2528 WARTH, R., MATSON, P., MCGUIRE, A., MELILLO, J., MOONEY, H., NEFF, J.,
2529 HOUGHTON, R., PACE, M., RYAN, M., RUNNING, S., SALA, O., SCHLESINGER, W.
2530 et SCHULZE, E.-D. (2006). Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and me-
2531 thodology. *Ecosystems*, 9:1041–1050.
- 2532 CHAPMAN, S., BUTTLER, A., FRANCEZ, A.-J., LAGGOUN-DÉFARGE, F., VASANDER,
2533 H., SCHLÖTER, M., COMBE, J., GROSVERNIER, P., HARMS, H., EPRON, D. et
2534 OTHERS (2003). Exploitation of northern peatlands and biodiversity maintenance :
2535 a conflict between economy and ecology. *Front. Ecol. Environ.*, 1(10):525–532.
- 2536 CHRISTENSEN, J. H., HEWITSON, B., BUSUIOC, A., CHEN, A., GAO, X., HELD, R.,
2537 JONES, R., KOLLI, R. K., KWON, W. K., LAPRISE, R. et OTHERS (2007). Regional
2538 climate projections. *Clim. Change 2007 Phys. Sci. Basis Contrib. Work. Group*
2539 *Fourth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Change Univ. Press Camb. Chapter 11*,
2540 pages 847–940.
- 2541 CHRISTENSEN, J. H., KANIKICHLARLA, K. K., MARSHALL, G. et TURNER, J. (2013).
2542 Climate phenomena and their relevance for future regional climate change.
- 2543 CHRISTENSEN, T. R., PANIKOV, N., MASTEPANOV, M., JOABSSON, A., STEWART,
2544 A., ÖQUIST, M., SOMMERKORN, M., REYNAUD, S. et SVENSSON, B. (2003). Biotic
2545 controls on CO₂ and CH₄ exchange in wetlands – a closed environment study.
2546 *Biogeochemistry*, 64(3):337–354.
- 2547 CIAIS, P., SABINE, C., BALA, G., BOPP, L., BROVKIN, V., CANADELL, J., CHHABRA,
2548 A., DEFRIES, R., GALLOWAY, J., HEIMANN, M. et OTHERS (2014). Carbon and
2549 other biogeochemical cycles. In *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis.*
2550 *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovern-
2551 mental Panel on Climate Change*, pages 465–570. Cambridge University Press.
- 2552 CLYMO, R. S., TURUNEN, J. et TOLONEN, K. (1998). Carbon accumulation in peat-
2553 land. *Oikos*, pages 368–388.
- 2554 COLES, J. R. et YAVITT, J. B. (2002). Control of methane metabolism in a forested
2555 northern wetland, New York State, by aeration, substrates, and peat size fractions.
2556 *Geomicrobiol. J.*, 19(3):293–315.
- 2557 COLMER, T. D. (2003). Long-distance transport of gases in plants : a perspective on
2558 internal aeration and radial oxygen loss from roots. *Plant Cell Environ.*, 26(1):17–36.
- 2559 CORNELISSEN, J. H., LANG, S. I., SOUDZILOVSKAIA, N. A. et DURING, H. J. (2007).
2560 Comparative cryptogam ecology : a review of bryophyte and lichen traits that drive
2561 biogeochemistry. *Ann. Bot.*, 99(5):987–1001.
- 2562 CROW, S. E. et WIEDER, R. K. (2005). Sources of CO₂ emission from a northern
2563 peatland : root respiration, exudation, and decomposition. *Ecology*, 86(7):1825–1834.

- 2564 CURIEL YUSTE, J., JANSSENS, I. A., CARRARA, A. et CEULEMANS, R. (2004). Annual
2565 Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature
2566 sensitivity. *Global Change Biol.*, 10(2):161–169.
- 2567 DARENOVA, E., PAVELKA, M. et ACOSTA, M. (2014). Diurnal deviations in the rela-
2568 tionship between CO₂ efflux and temperature : A case study. *CATENA*, 123:263–269.
- 2569 DAVIDSON, E. A., JANSSENS, I. A. et LUO, Y. (2006). On the variability of respiration
2570 in terrestrial ecosystems : moving beyond Q₁₀. *Global Change Biol.*, 12(2):154–164.
- 2571 DINSMORE, K. J., SKIBA, U. M., BILLETT, M. F. et REES, R. M. (2009). Effect
2572 of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms. *Plant Soil*,
2573 318(1-2):229–242.
- 2574 ESWARAN, H., VAN DEN BERG, E. et REICH, P. (1993). Organic carbon in soils of
2575 the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57(1):192–194.
- 2576 FANG, C. et MONCRIEFF, J. (2001). The dependence of soil CO₂ efflux on temperature.
2577 *Soil Biol. Biochem.*, 33(2):155–165.
- 2578 FAROUKI, O. (1981). *Thermal properties of soils*. Series on rock and soil mechanics.
2579 Trans Tech Pub., Rockport, MA.
- 2580 FARQUHAR, G. D., VON CAEMMERER, S. et BERRY, J. A. (1980). A biochemical model
2581 of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149(1):78–90.
- 2582 FRANCEZ, A.-J. (2000). La dynamique du carbone dans les tourbières à Sphagnum,
2583 de la sphaine à l'effet de serre. *L'Année Biologique*, 39:205–270.
- 2584 FROLKING, S., TALBOT, J., JONES, M. C., TREAT, C. C., KAUFFMAN, J. B., TUIT-
2585 TILA, E.-S. et ROULET, N. (2011). Peatlands in the Earth's 21st century climate
2586 system. *Environ. Rev.*, 19(NA):371–396.
- 2587 GIRARD, M. C., WALTER, C., REMY, J. C., BERTHELIN, J. et MOREL, J. L. (2011).
2588 *Sols et Environnement, (2e édn)*, volume 28 de *Sciences Sup*. Editions Dunod : Paris,
2589 Vottem, Belgique, 2nd édition édition.
- 2590 GLASER, P. H. et CHANTON, J. P. (2009). Methane accumulation and release from deep
2591 peat : measurements, conceptual models, and biogeochemical significance. *Carbon
2592 Cycl. North. Peatl.*, pages 145–158.
- 2593 GOGO, S., GUIMBAUD, C., LAGGOUN-DÉFARGE, F., CATOIRE, V. et ROBERT, C.
2594 (2011). In situ quantification of CH₄ bubbling events from a peat soil using a new
2595 infrared laser spectrometer. *Journal of Soils and Sediments*, 11:545–551.
- 2596 GORHAM, E. (1991). Northern Peatlands : Role in the Carbon Cycle and Probable
2597 Responses to Climatic Warming. *Ecol. Appl.*, 1(2):182–195.
- 2598 GORNALL, J. L., WOODIN, S. J., JÓNSDÓTTIR, I. S. et van der WAL, R. (2011).
2599 Balancing positive and negative plant interactions : how mosses structure vascular
2600 plant communities. *Oecologia*, 166(3):769–782.

- 2601 GÖRRES, C. M., KUTZBACH, L. et ELSGAARD, L. (2014). Comparative modeling of
2602 annual CO₂ flux of temperate peat soils under permanent grassland management.
2603 *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 186:64–76.
- 2604 GRAF, A., WEIHERMÜLLER, L., HUISMAN, J. A., HERBST, M., BAUER, J. et VEREECKEN, H. (2008). Measurement depth effects on the apparent temperature sensitivity
2605 of soil respiration in field studies. *Biogeosciences*, 5(3):1867–1898.
- 2607 GUIMBAUD, C., CATOIRE, V., GOGO, S., ROBERT, C., CHARTIER, M., LAGGOUN-
2608 DÉFARGE, F., GROSSEL, A., ALBÉRIC, P., POMATHIOD, L., NICOUILLAUD, B. et
2609 RICHARD, G. (2011). A portable infrared laser spectrometer for flux measurements
2610 of trace gases at the geosphere-atmosphere interface. *Measurement Science & Technology*, 22(7):1–17.
- 2612 GUNNARSSON, U. (2005). Global patterns of Sphagnum productivity. *Journal of*
2613 *Bryology*, 27(3):269–279.
- 2614 GÜNTHER, A., HUTH, V., JURASINSKI, G. et GLATZEL, S. (2014). The effect of bio-
2615 mass harvesting on greenhouse gas emissions from a rewetted temperate fen. *GCB*
2616 *Bioenergy*, pages n/a–n/a.
- 2617 HARRIS, D. C. (2010). Charles David Keeling and the Story of Atmospheric CO₂
2618 Measurements†. *Anal. Chem.*, 82(19):7865–7870.
- 2619 HILLEL, D. (2003). Soil temperature and heat flow. In *Introduction to Environmental*
2620 *Soil Physics*. Academic Press. {DOI :10.1016/B978-012348655-4/50013-7}.
- 2621 HOBBIE, S. E. (1996). Temperature and plant species control over litter decomposition
2622 in Alaskan tundra. *Ecol. Monogr.*, 66(4):503–522.
- 2623 ISE, T., DUNN, A. L., WOFSY, S. C. et MOORCROFT, P. R. (2008). High sensitivity of
2624 peat decomposition to climate change through water-table feedback. *Nat. Geosci.*,
2625 1(11):763–766.
- 2626 JACOBS, C. M. J., JACOBS, A. F. G., BOSVELD, F. C., HENDRIKS, D. M. D., HENSEN,
2627 A., KROON, P. S., MOORS, E. J., NOL, L., SCHRIER-UIJL, A. et VEENENDAAL, E. M.
2628 (2007). Variability of annual CO₂ exchange from Dutch grasslands. *Biogeosciences*,
2629 4(5):803–816.
- 2630 JOABSSON, A., CHRISTENSEN, T. R. et WALLÉN, B. (1999). Vascular plant controls
2631 on methane emissions from northern peatforming wetlands. *Trends in Ecology &*
2632 *Evolution*, 14(10):385–388.
- 2633 JONES, M. C. et YU, Z. (2010). Rapid deglacial and early Holocene expansion of
2634 peatlands in Alaska. *PNAS*, 107(16):7347–7352.
- 2635 JOOS, F., ROTH, R., FUGLESTVEDT, J. S., PETERS, G. P., ENTING, I. G., VON BLOH,
2636 W., BROVKIN, V., BURKE, E. J., EBY, M., EDWARDS, N. R., FRIEDRICH, T., FRÖ-
2637 LICHER, T. L., HALLORAN, P. R., HOLDEN, P. B., JONES, C., KLEINEN, T., MAC-
2638 KENZIE, F. T., MATSUMOTO, K., MEINSHAUSEN, M., PLATTNER, G.-K., REISINGER,
2639 A., SEGGSCHNEIDER, J., SHAFFER, G., STEINACHER, M., STRASSMANN, K.,
2640 TANAKA, K., TIMMERMANN, A. et WEAVER, A. J. (2013). Carbon dioxide and

- 2641 climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics :
2642 a multi-model analysis. *Atmos. Chem. Phys.*, 13(5):2793–2825.
- 2643 JOOSTEN, H. et CLARKE, D. (2002). *Wise use of mires and peatlands*. International
2644 mire conservation group.
- 2645 JUNE, T., EVANS, J. R. et FARQUHAR, G. D. (2004). A simple new equation for the
2646 reversible temperature dependence of photosynthetic electron transport : a study on
2647 soybean leaf. *Funct. Plant Biol.*, 31(3):275–283. WOS :000220831200008.
- 2648 JUSZCZAK, R., ACOSTA, M. et OLEJNIK, J. (2012). Comparison of daytime and night-
2649 time ecosystem respiration measured by the closed chamber technique on temperate
2650 mire in Poland. *Pol. J. Environ. Stud.*, 21(3):643–658.
- 2651 KARKI, S., ELSGAARD, L., KANDEL, T. P. et LÆRKE, P. E. (2015). Full GHG balance
2652 of a drained fen peatland cropped to spring barley and reed canary grass using
2653 comparative assessment of CO₂ fluxes. *Environ Monit Assess*, 187(3):1–13.
- 2654 KAUFMAN, D. S., AGER, T. A., ANDERSON, N. J., ANDERSON, P. M., ANDREWS,
2655 J. T., BARTLEIN, P. J., BRUBAKER, L. B., COATS, L. L., CWYNAR, L. C., DUVALL,
2656 M. L., DYKE, A. S., EDWARDS, M. E., EISNER, W. R., GAJEWSKI, K., GEIRSDÓT-
2657 TIR, A., HU, F. S., JENNINGS, A. E., KAPLAN, M. R., KERWIN, M. W., LOZHKNIN,
2658 A. V., MACDONALD, G. M., MILLER, G. H., MOCK, C. J., OSWALD, W. W., OTTO-
2659 BLIESNER, B. L., PORINCHU, D. F., RÜHLAND, K., SMOL, J. P., STEIG, E. J. et
2660 WOLFE, B. B. (2004). Holocene thermal maximum in the western Arctic (0–180°W).
2661 *Quaternary Science Reviews*, 23(5–6):529–560.
- 2662 KENNEDY, G. W. et PRICE, J. S. (2005). A conceptual model of volume-change controls
2663 on the hydrology of cutover peats. *J. Hydrol.*, 302(1–4):13–27.
- 2664 KETCHESON, S. J. et PRICE, J. S. (2014). Characterization of the fluxes and stores of
2665 water within newly formed Sphagnum moss cushions and their environment. *Ecohy-
2666 drology*, 7(2):771–782.
- 2667 KETTUNEN, A., KAITALA, V., ALM, J., SILVOLA, J., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN,
2668 P. J. (1996). Cross-correlation analysis of the dynamics of methane emissions from
2669 a boreal peatland. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 10(3):457–471.
- 2670 KIM, J. et VERMA, S. B. (1992). Soil surface CO₂ flux in a Minnesota peatland.
2671 *Biogeochemistry*, 18(1):37–51.
- 2672 KOEHLER, A.-K., SOTTOCORNOLA, M. et KIELY, G. (2011). How strong is the current
2673 carbon sequestration of an Atlantic blanket bog ? *Glob. Change Biol.*, 17(1):309–319.
- 2674 LAI, D. (2009). Methane Dynamics in Northern Peatlands : A Review. *Pedosphere*,
2675 19(4):409–421.
- 2676 LAIHO, R. (2006). Decomposition in peatlands : Reconciling seemingly contrasting
2677 results on the impacts of lowered water levels. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8):
2678 2011–2024.

- 2679 LANDVA, A. O., KORPIJAAKKO, E. O. et PHEENEY, P. E. (1983). Geotechnical clas-
2680 sification of peats and organic soils. *In Testing of peats and organic soils*, volume
2681 820, pages 37–51.
- 2682 LAPPALAINEN, E. (1996). *Global peat resources*, volume 4. International Peat Society
2683 Jyskä.
- 2684 LELIEVELD, J. O. S., CRUTZEN, P. J. et DENTENER, F. J. (1998). Changing concentra-
2685 tion, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus B*, 50(2):128–150.
- 2686 LIMPENS, J. et BERENDSE, F. (2003). How litter quality affects mass loss and N loss
2687 from decomposing Sphagnum. *Oikos*, 103(3):537–547.
- 2688 LIMPENS, J., BERENDSE, F., BLODAU, C., CANADELL, J. G., FREEMAN, C., HOLDEN,
2689 J., ROULET, N., RYDIN, H. et SCHAEPMAN-STRUB, G. (2008). Peatlands and the
2690 carbon cycle : from local processes to global implications – a synthesis. *Biogeosciences*,
2691 5(2):1475–1491.
- 2692 LIU, W., FOX, J. E. et XU, Z. (2000). Leaf litter decomposition of canopy trees, bamboo
2693 and moss in a montane moist evergreen broad-leaved forest on Ailao Mountain,
2694 Yunnan, south-west China. *Ecol. Res.*, 15(4):435–447.
- 2695 LIVINGSTON, G. P. et HUTCHINSON, G. L. (1995). Enclosure-based measurement of
2696 trace gas exchange : applications and sources of error. *Biog. Trace Gases Meas.*
2697 *Emiss. Soil Water*, pages 14–51.
- 2698 LOHILA, A., AURELA, M., REGINA, K. et LAURILA, T. (2003). Soil and total ecosystem
2699 respiration in agricultural fields : effect of soil and crop type. *Plant Soil*, 251(2):303–
2700 317.
- 2701 LONG, S. P. et HÄLLGREN, J.-E. (1993). Measurement of CO₂ assimilation by plants
2702 in the field and the laboratory. *In* HALL, D. O., SCURLOCK, J. M. O., Bolhàr
2703 NORDENKAMPF, H. R., LEEGOOD, R. C. et LONG, S. P., éditeurs : *Photosynthesis*
2704 and *Production in a Changing Environment*, pages 129–167. Springer Netherlands.
- 2705 LUND, M., CHRISTENSEN, T. R., LINDROTH, A. et SCHUBERT, P. (2012). Effects
2706 of drought conditions on the carbon dioxide dynamics in a temperate peatland.
2707 *Environ. Res. Lett.*, 7(4):045704.
- 2708 LUO, Y. et ZHOU, X. (2006a). Chapter 1 - Introduction and overview. *In* LUO, Y. et
2709 ZHOU, X., éditeurs : *Soil Respiration and the Environment*, pages 3 – 15. Academic
2710 Press, Burlington.
- 2711 LUO, Y. et ZHOU, X. (2006b). Chapter 5 - Controlling factors. *In* LUO, Y. et ZHOU,
2712 X., éditeurs : *Soil Respiration and the Environment*, pages 79 – 105. Academic Press,
2713 Burlington.
- 2714 LUO, Y. et ZHOU, X. (2006c). Chapter 8 - Methods of measurements and estimations.
2715 *In* LUO, Y. et ZHOU, X., éditeurs : *Soil Respiration and the Environment*, pages 161
2716 – 185. Academic Press, Burlington.

- 2717 MACDONALD, G. M., BEILMAN, D. W., KREMENETSKI, K. V., SHENG, Y., SMITH,
2718 L. C. et VELICHKO, A. A. (2006). Rapid early development of circumarctic peatlands
2719 and atmospheric CH₄ and CO₂ variations. *Science*, 314(5797):285–288.
- 2720 MAHECHA, M. D., REICHSTEIN, M., CARVALHAIS, N., LASSLOP, G., LANGE, H., SE-
2721 NEVIRATNE, S. I., VARGAS, R., AMMANN, C., ARAIN, M. A., CESCATTI, A., JANS-
2722 SENS, I. A., MIGLIAVACCA, M., MONTAGNANI, L. et RICHARDSON, A. D. (2010).
2723 Global Convergence in the Temperature Sensitivity of Respiration at Ecosystem Le-
2724 vel. *Science*, 329(5993):838–840.
- 2725 MALMER, N., SVENSSON, B. M. et WALLÉN, B. (1994). Interactions between Sphagnum
2726 mosses and field layer vascular plants in the development of peat-forming systems.
2727 *Folia geobot. phytotax.*, 29(4):483–496.
- 2728 MANNEVILLE, O. (1999). *Le monde des tourbières et des marais : France, Suisse,*
2729 *Belgique et Luxembourg*. Delachaux & Niestle.
- 2730 MCNEIL, P. et WADDINGTON, J. M. (2003). Moisture controls on Sphagnum growth
2731 and CO₂ exchange on a cutover bog. *J. Appl. Ecol.*, 40(2):354–367.
- 2732 MOORE, T. R., BUBIER, J. L., FROLKING, S. E., LAFLEUR, P. M. et ROULET, N. T.
2733 (2002). Plant biomass and production and CO₂ exchange in an ombrotrophic bog.
2734 *Journal of Ecology*, 90(1):25–36.
- 2735 MUNIR, T. M., PERKINS, M., KAING, E. et STRACK, M. (2015). Carbon dioxide
2736 flux and net primary production of a boreal treed bog : Responses to warming and
2737 water-table-lowering simulations of climate change. *Biogeosciences*, 12(4):1091–1111.
- 2738 NATIONAL WETLANDS WORKING GROUP (1997). *The Canadian wetland classifica-*
2739 *tion system*. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 2nd edition édition.
- 2740 NILSSON, M., MIKKELÄ, C., SUNDH, I., GRANBERG, G., SVENSSON, B. H. et RAN-
2741 NEBY, B. (2001). Methane emission from Swedish mires : National and regional
2742 budgets and dependence on mire vegetation. *J. Geophys. Res.*, 106(D18):20847–
2743 20860.
- 2744 NILSSON, M., SAGERFORS, J., BUFFAM, I., LAUDON, H., ERIKSSON, T., GRELLE, A.,
2745 KLEMEDTSSON, L., WESLIEN, P. et LINDROTH, A. (2008). Contemporary carbon
2746 accumulation in a boreal oligotrophic minerogenic mire – a significant sink after
2747 accounting for all C-fluxes. *Glob. Change Biol.*, 14(10):2317–2332.
- 2748 ORLOWSKY, B. et SENEVIRATNE, S. I. (2012). Global changes in extreme events :
2749 regional and seasonal dimension. *Clim. Change*, 110(3–4):669–696.
- 2750 PARISH, F., SIRIN, A., CHARMAN, D., JOOSTEN, H., MINAYEVA, T., SILVIUS, M. et
2751 STRINGER, L. (2008). *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change : Main Report*. Global Environment Centre & Wetlands International.
- 2753 PARKIN, T. B. et KASPAR, T. C. (2003). Temperature Controls on Diurnal Carbon
2754 Dioxide Flux. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67(6):1763–1772.

- 2755 PAVELKA, M., ACOSTA, M., MAREK, M. V., KUTSCH, W. et JANOUS, D. (2007).
 2756 Dependence of the Q_{10} values on the depth of the soil temperature measuring point.
 2757 *Plant Soil*, 292(1-2):171–179.
- 2758 PEICHL, M., ÖQUIST, M., LÖFVENIUS, M. O., ILSTEDT, U., SAGERFORS, J., GRELLE,
 2759 A., LINDROTH, A. et NILSSON, M. B. (2014). A 12-year record reveals pre-growing
 2760 season temperature and water table level threshold effects on the net carbon dioxide
 2761 exchange in a boreal fen. *Environ. Res. Lett.*, 9(5):055006.
- 2762 PELLETIER, L., MOORE, T. R., ROULET, N. T., GARNEAU, M. et BEAULIEU-AUDY,
 2763 V. (2007). Methane fluxes from three peatlands in the La Grande Riviere watershed,
 2764 James Bay lowland, Canada. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).
- 2765 PHILIPPE DE SOUABE-ZYRIANE (1988). Van Helmont Jan Baptist - (1577-1644).
 2766 In *Encyclopædia Universalis, Thesaurus index*, volume 3, page 3072. Encyclopædia
 2767 Universalis, Malesherbes, Paris, 3 édition.
- 2768 PHILLIPS, C. L., NICKERSON, N., RISK, D. et BOND, B. J. (2011). Interpreting diel
 2769 hysteresis between soil respiration and temperature. *Global Change Biol.*, 17(1):515–
 2770 527.
- 2771 POST, W. M., EMANUEL, W. R., ZINKE, P. J. et STANGENBERGER, A. G. (1982). Soil
 2772 carbon pools and world life zones. *Nature*, 298:156–159.
- 2773 PRATHER, M. J., HOLMES, C. D. et HSU, J. (2012). Reactive greenhouse gas scenarios : Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry.
 2774 *Geophys. Res. Lett.*, 39(9):L09803.
- 2776 PRENTICE, I. C., FARQUHAR, G. D., FASHAM, M. J. R., GOULDEN, M. L., HEIMANN,
 2777 M., JARAMILLO, V. J., KHESHGI, H. S., LEQUÉRÉ, C., SCHOLE, R. J. et WALLACE,
 2778 D. W. R. (2001). The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. In HOUGHTON,
 2779 J. T., DING, Y., GRIGGS, D. J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P. J., DAI,
 2780 X., MASKELL, K. et JOHNSON, C. A., éditeurs : *Climate Change 2001 : the Scientific Basis. Contributions of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 185–237. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 2784 PUMPANEN, J., KOLARI, P., ILVESNIEMI, H., MINKKINEN, K., VESALA, T., NIINISTÖ,
 2785 S., LOHLA, A., LARMOLA, T., MORENO, M., PIHLATIE, M., JANSSENS, I., YUSTE,
 2786 J. C., GRÜNZWEIG, J. M., RETH, S., SUBKE, J.-A., SAVAGE, K., KUTSCH, W., ØSTRENG,
 2787 G., ZIEGLER, W., ANTHONI, P., LINDROTH, A. et HARI, P. (2004). Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agric. For. Meteorol.*, 123(3–4):159–176.
- 2790 RAICH, J. W. et SCHLESINGER, W. H. (1992). The global carbon dioxide flux in soil
 2791 respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 44(2):81–99.
- 2792 RAMEAU, J.-C., MANSION, D. et DUMÉ, G. (2008). *Flore forestière française : Plaines et collines*. Forêt privée française.

- 2794 RAMSAR, C. (1987). *Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau, (Ramsar, Iran, 1971) telle qu'amendée en 1982 et 1987.*
- 2797 ROBERT, C. (2007). Simple, stable, and compact multiple-reflection optical cell for
2798 very long optical paths. *Applied Optics*, 46(22):5408–5418.
- 2799 ROBERT, M. et SAUGIER, B. (2003). Contribution des écosystèmes continentaux à la
2800 séquestration du carbone. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(6–7):577–595.
- 2801 ROBROEK, B. J., VAN RUIJVEN, J., SCHOUTEN, M. G., BREEUWER, A., CRUSHELL,
2802 P. H., BERENDSE, F. et LIMPENS, J. (2009). Sphagnum re-introduction in degraded
2803 peatlands : The effects of aggregation, species identity and water table. *Basic and
2804 Applied Ecology*, 10(8):697–706.
- 2805 RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013a). Peatland habitats. In *The biology of Peatlands*,
2806 pages 85–107. Oxford University Press.
- 2807 RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013b). Productivity and peat accumulation. In *The biology
2808 of Peatlands*, pages 254–273. Oxford University Press.
- 2809 RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013c). Sphagnum - the builder of boreal peatlands. In *The
2810 biology of Peatlands*, pages 65–84. Oxford University Press.
- 2811 SEGERS, R. (1998). Methane production and methane consumption : a review of
2812 processes underlying wetland methane fluxes. *Biogeochemistry*, 41(1):23–51.
- 2813 SIEGENTHALER, U. et OESCHGER, H. (1987). Biospheric CO₂ emissions during the
2814 past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus B*, 39B(1–
2815 2):140–154.
- 2816 SILVOLA, J., ALM, J., AHLHOLM, U., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1996).
2817 The contribution of plant roots to CO₂ fluxes from organic soils. *Biol Fertil Soils*,
2818 23(2):126–131.
- 2819 SINGH, J. S. et GUPTA, S. R. (1977). Plant decomposition and soil respiration in
2820 terrestrial ecosystems. *Bot. Rev*, 43(4):449–528.
- 2821 SMITH, L. C., MACDONALD, G. M., VELICHKO, A. A., BEILMAN, D. W., BORISOVA,
2822 O. K., FREY, K. E., KREMENETSKI, K. V. et SHENG, Y. (2004). Siberian Peatlands
2823 a Net Carbon Sink and Global Methane Source Since the Early Holocene. *Science*,
2824 303(5656):353–356.
- 2825 SONNENTAG, O., VAN DER KAMP, G., BARR, A. G. et CHEN, J. M. (2010). On the
2826 relationship between water table depth and water vapor and carbon dioxide fluxes
2827 in a minerotrophic fen. *Glob. Change Biol.*, 16(6):1762–1776.
- 2828 STOCKER, T. F., QIN, D., PLATTNER, G. K., TIGNOR, M., ALLEN, S. K., BOSCHUNG,
2829 J., NAUELS, A., XIA, Y., BEX, B. et MIDGLEY, B. M. (2013). *IPCC, 2013 : climate
2830 change 2013 : the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth
2831 assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge
2832 University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- 2833 STRACK, M. (2008). *Peatlands and climate change*. IPS, International Peat Society,
2834 Jyväskylä, Finland.
- 2835 STRACK, M. et PRICE, J. S. (2009). Moisture controls on carbon dioxide dynamics of
2836 peat-Sphagnum monoliths. *Ecohydrology*, 2(1):34–41.
- 2837 STRACK, M., WALLER, M. F. et WADDINGTON, J. M. (2006). Sedge succession and
2838 peatland methane dynamics : A potential feedback to climate change. *Ecosystems*,
2839 9(2):278–287.
- 2840 STRACK, M. et ZUBACK, Y. C. A. (2013). Annual carbon balance of a peatland 10 yr
2841 following restoration. *Biogeosciences*, 10(5):2885–2896.
- 2842 SVENSSON, B. M. (1995). Competition between Sphagnum fuscum and Drosera rotun-
2843 difolia : A Case of Ecosystem Engineering. *Oikos*, 74(2):205–212.
- 2844 TAYLOR, K., ROWLAND, A. P. et JONES, H. E. (2001). Molinia caerulea (L.) Moench.
2845 *J. Ecol.*, 89(1):126–144.
- 2846 TREAT, C. C., BUBIER, J. L., VARNER, R. K. et CRILL, P. M. (2007). Timescale
2847 dependence of environmental and plant-mediated controls on CH₄ flux in a temperate
2848 fen. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).
- 2849 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2012). Methane fluxes from a
2850 patterned fen of the northeastern part of the La Grande river watershed, James Bay,
2851 Canada. *Biogeochemistry*, 113(1-3):409–422.
- 2852 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2014). Interannual variability in
2853 the CO₂ balance of a boreal patterned fen, James Bay, Canada. *Biogeochemistry*,
2854 118(1-3):371–387.
- 2855 TURETSKY, M. R., TREAT, C. C., WALDROP, M. P., WADDINGTON, J. M., HAR-
2856 DEN, J. W. et MCGUIRE, A. D. (2008). Short-term response of methane fluxes and
2857 methanogen activity to water table and soil warming manipulations in an Alaskan
2858 peatland. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 113(G3).
- 2859 TURUNEN, J., TOMPOPO, E., TOLONEN, K. et REINIKAINEN, A. (2002). Estimating
2860 carbon accumulation rates of undrained mires in Finland—application to boreal and
2861 subarctic regions. *The Holocene*, 12(1):69–80.
- 2862 UPDEGRAFF, K., BRIDGHAM, S. D., PASTOR, J., WEISHAMPEL, P. et HARTH, C.
2863 (2001). Response of CO₂ and CH₄ emissions from peatlands to warming and water
2864 table manipulation. *Ecol. Appl.*, 11(2):311–326.
- 2865 VARGAS, R., BALDOCCHI, D. D., ALLEN, M. F., BAHN, M., BLACK, T. A., COLLINS,
2866 S. L., YUSTE, J. C., HIRANO, T., JASSAL, R. S., PUMPANEN, J. et TANG, J. (2010).
2867 Looking deeper into the soil : biophysical controls and seasonal lags of soil CO₂
2868 production and efflux. *Ecol. Appl.*, 20(6):1569–1582.
- 2869 VARGAS, R., CARBONE, M. S., REICHSTEIN, M. et BALDOCCHI, D. D. (2011). Fron-
2870 tiers and challenges in soil respiration research : from measurements to model-data
2871 integration. *Biogeochemistry*, 102(1-3):1–13.

- 2872 VIEL, E., BINET, S., GOGO, S. et LAGGOUN-DÉFARGE, F. (2015). Tree invasion
2873 controls the drainage pattern in La Guette peatland (France) : impact on the water
2874 storage capacity of the peat. *Journal of Hydrology* (*submitted*).
- 2875 WADDINGTON, J. M. et ROULET, N. T. (2000). Carbon balance of a boreal patterned
2876 peatland. *Global Change Biology*, 6(1):87–97.
- 2877 WAGNER, D. J. et TITUS, J. E. (1984). Comparative desiccation tolerance of two
2878 Sphagnum mosses. *Oecologia*, 62(2):182–187.
- 2879 WARD, S. E., OSTLE, N. J., OAKLEY, S., QUIRK, H., HENRYS, P. A. et BARDGETT,
2880 R. D. (2013). Warming effects on greenhouse gas fluxes in peatlands are modulated
2881 by vegetation composition. *Ecol. Lett.*, 16(10):1285–1293.
- 2882 WEEDON, J. T., AERTS, R., KOWALCHUK, G. A., VAN LOGTESTIJN, R., ANDRINGA,
2883 D. et VAN BODEGOM, P. M. (2013). Temperature sensitivity of peatland C and N
2884 cycling : Does substrate supply play a role? *Soil Biology and Biochemistry*, 61:109–
2885 120.
- 2886 WELTZIN, J. F., PASTOR, J., HARTH, C., BRIDGHAM, S. D., UPDEGRAFF, K. et CHA-
2887 PIN, C. T. (2000). Response of bog and fen plant communities to warming and
2888 water-table manipulations. *Ecology*, 81(12):3464–3478.
- 2889 WHALEN, S. C. et PEIRCE, J. J. (2005). Biogeochemistry of methane exchange between
2890 natural wetlands and the atmosphere. *Environmental engineering science*, 22(1):73–
2891 94.
- 2892 WORRALL, F., BURT, T., ROWSON, J., WARBURTON, J. et ADAMSON, J. (2009).
2893 The multi-annual carbon budget of a peat-covered catchment. *Science of The Total
2894 Environment*, 407(13):4084–4094.
- 2895 WUEBBLES, D. J. et HAYHOE, K. (2002). Atmospheric methane and global change.
2896 *Earth-Sci. Rev.*, 57(3):177–210.
- 2897 WULLSCHLEGER, S. D. (1993). Biochemical limitations to carbon assimilation in C3
2898 plants—a retrospective analysis of the A/Ci curves from 109 species. *J. Exp. Bot.*,
2899 44(5):907–920.
- 2900 YU, Z., BEILMAN, D. W. et JONES, M. C. (2009). Sensitivity of northern peatland car-
2901 bon dynamics to Holocene climate change. In *Carbon cycling in northern peatlands*,
2902 volume 184, pages 55–69. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Se-
2903 ries Washington, DC.
- 2904 YU, Z., LOISEL, J., BROSSEAU, D. P., BEILMAN, D. W. et HUNT, S. J. (2010). Global
2905 peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophys. Res. Lett.*, 37(13).
- 2906 ZHU, X., SONG, C., SWARZENSKI, C. M., GUO, Y., ZHANG, X. et WANG, J. (2015).
2907 Ecosystem-atmosphere exchange of CO₂ in a temperate herbaceous peatland in the
2908 Sanjiang plain of northeast China. *Ecol. Eng.*, 75:16–23.

INDEX

| | | |
|------|--------------------------------|-------|
| 2909 | A | |
| 2910 | atterrissement | 11 |
| 2911 | C | |
| 2912 | carbone | |
| 2913 | stock | 12 |
| 2914 | changements globaux | 2, 14 |
| 2915 | E | |
| 2916 | échange net de l'écosystème | |
| 2917 | contrôle | 21 |
| 2918 | P | |
| 2919 | paludification | 11 |
| 2920 | photosynthèse | 17 |
| 2921 | production primaire brute | |
| 2922 | contrôle | 21 |
| 2923 | R | |
| 2924 | respiration | 18 |
| 2925 | de l'écosystème | 18 |
| 2926 | contrôle | 20 |
| 2927 | du sol | 18 |
| 2928 | S | |
| 2929 | services écologiques | 3 |
| 2930 | T | |
| 2931 | tourbières | 8–16 |
| 2932 | distribution | 11 |
| 2933 | formation | 11 |
| 2934 | surface | 10 |
| 2935 | utilisation | 14 |
| 2936 | turbification | 10 |
| 2937 | Z | |
| 2938 | zone humide | 8 |

2939

2940



ANNEXES

₂₉₄₁ A Photos supplémentaires



(a) droséra

FIGURE 7 – Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure.

₂₉₄₂ B protocole végétation

₂₉₄₃ Le suivi non-destructif d'une végétation n'est pas triviale et nécessite la mise en
₂₉₄₄ place de protocoles particuliers en fonction du type de végétation. L'objectif est de
₂₉₄₅ pouvoir estimer une biomasse produite en impactant au minimum la végétation en
₂₉₄₆ place. Pour l'ensemble des espèces végétales présentes dans les embases servant à la
₂₉₄₇ mesure des flux un recouvrement à été estimé, à l'œil.

₂₉₄₈ **La strate arbustive**

₂₉₄₉ Pour la strate arbustive des mesures de hauteur moyenne ont été effectuées, en
₂₉₅₀ mesurant depuis le niveau du sol, ou le toit des sphaignes, si elles étaient présentes,
₂₉₅₁ jusqu'au sommet de l'individu.

₂₉₅₂ **La strate herbacée**

₂₉₅₃ Pour la strate herbacée, en 2013, 5 individus des deux espèces majoritaires (*Eriophorum vaginatum* ? *augustifolium* ?, *Molinia Caerulea*) ont été marqués afin de pourvoir
₂₉₅₄ les mesurer plusieurs fois au cours de la saison. Cependant les difficultés à retrouver
₂₉₅₅ les individus marqués couplés à la mort d'un nombre important d'entre eux n'ont pas
₂₉₅₆ permis d'acquérir de résultats significatifs. En conséquence en 2014 ces deux espèces
₂₉₅₇ ont fait l'objet de comptage exhaustif et de mesure de hauteur moyenne.

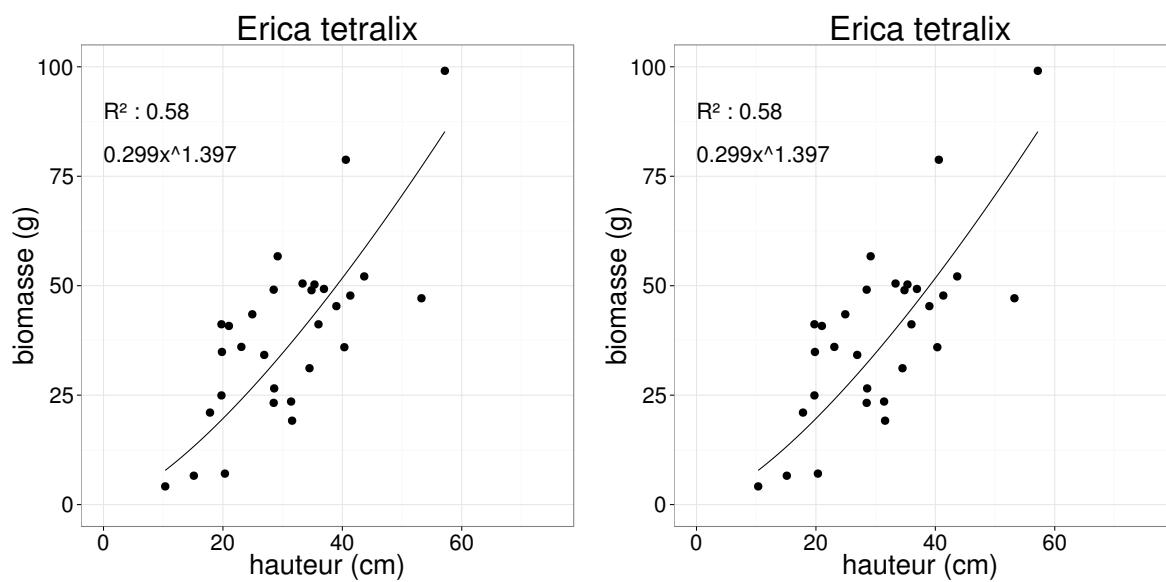


FIGURE 8 – Calibration de la biomasse en fonction de la hauteur

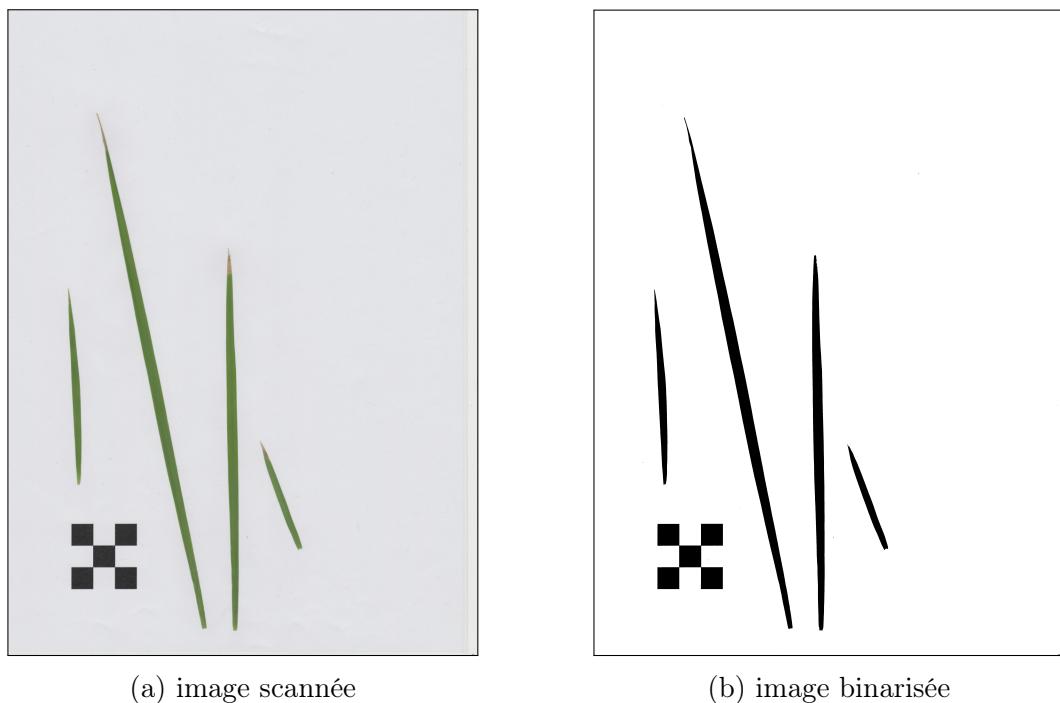


FIGURE 9 – Scanne des feuilles

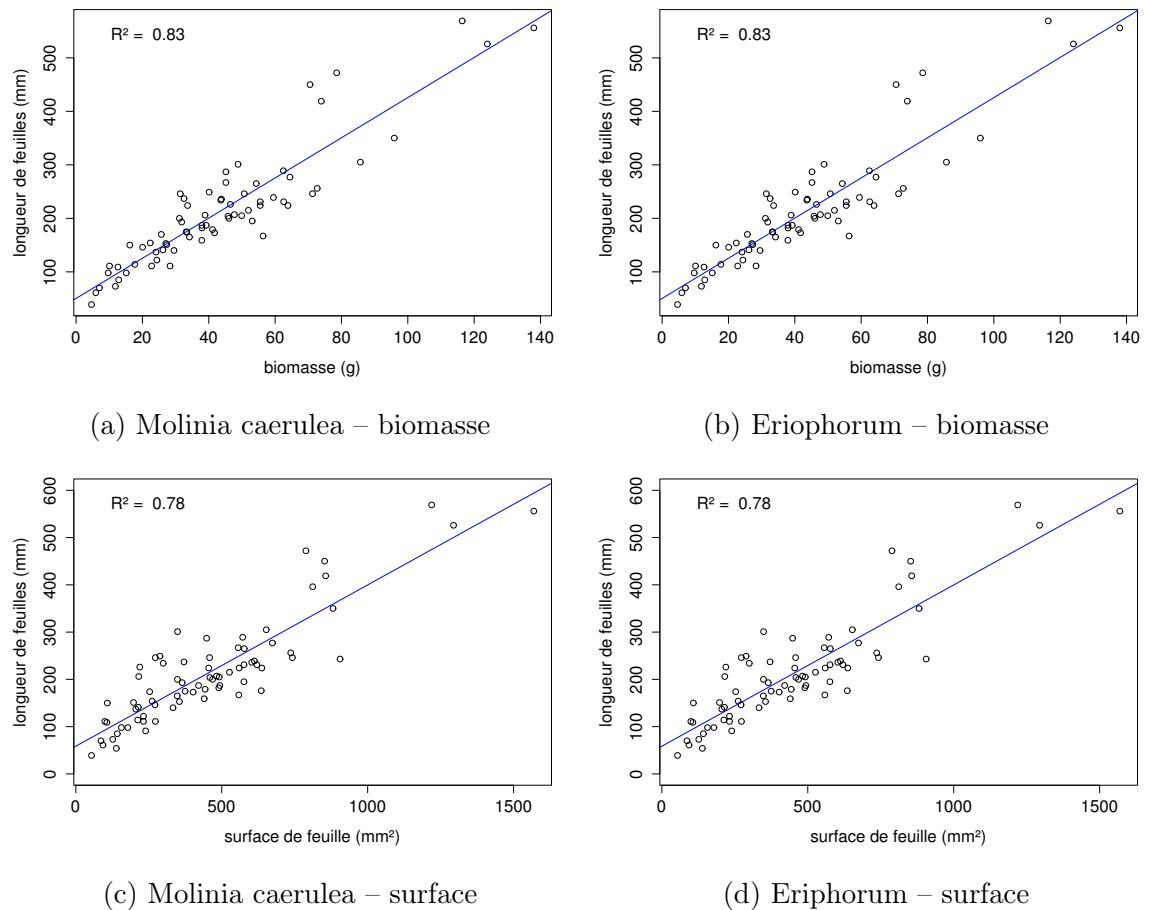


FIGURE 10 – Calibration de la biomasse herbacées pour *Molinia Caerulea* (a), pour *Eriophorum* (b) et de la surface de feuille pour *Molinia Caerulea* (c), pour *Eriophorum* (d) en fonction de la hauteur

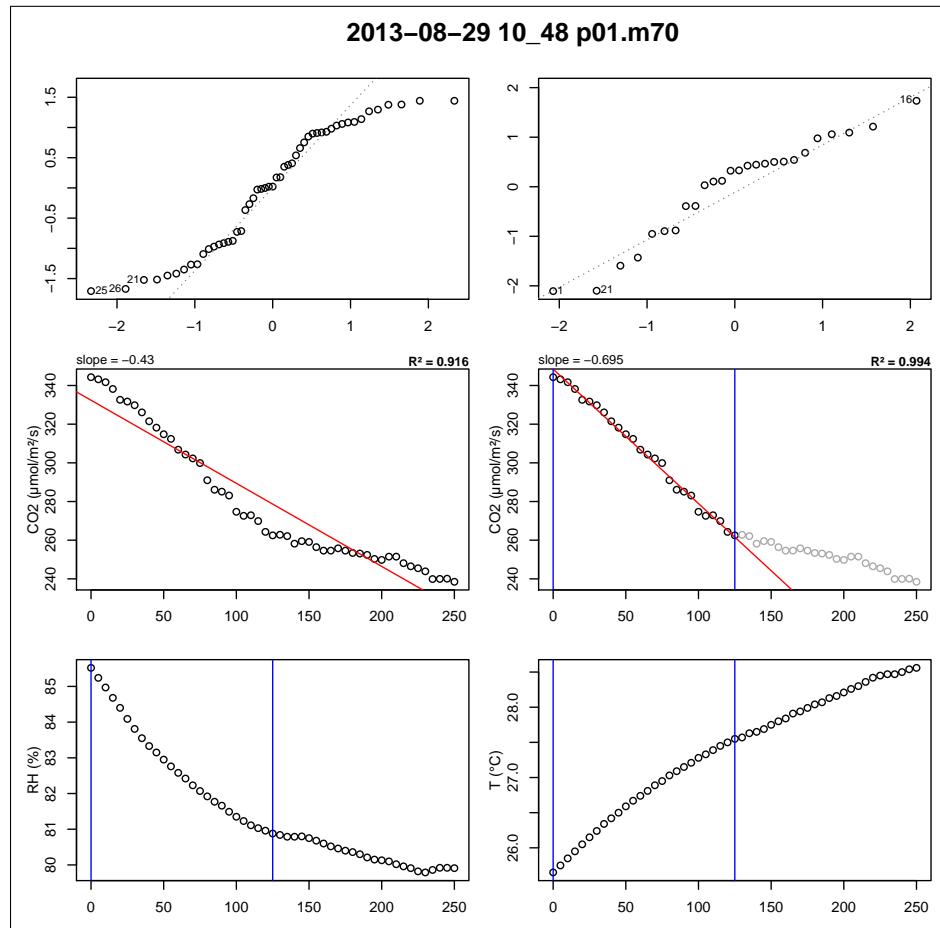


FIGURE 11 – Planche de graphes permettant le diagnostique des mesures de flux de CO₂

C Le projet CARBIODIV

Ce projet vise à restaurer l'hydrologie de la tourbière de La Guette et de suivre les effets de cette restauration sur les flux de carbone et la biodiversité. Ce projet implique donc des laboratoires scientifiques (ISTO, LPC2E) une cellule de recherche et développement de l'Université d'Orléans (CETRAHE), des associations (SNE, CERCOPE, LIN'Eco), et une entreprise (Environnement41).

Carte Nécessaire.

D package m70r

Ce package contient une série de fonctions à utiliser avec le langage R et qui permettent de traiter les fichiers *.m70 issue des sondes Vaisala.

- Générer des planches de graphes pour diagnostiquer les flux (Figure 11)
- De comparer l'effet du retrait de certains points. La figure 11 montre ainsi une mesure pour laquelle l'assimilation de CO₂ par photosynthèse est tellement forte qu'elle semble être stoppée abruptement au delà d'un certain seuil.

Tableau 3 – Valeur des paramètres des équations utilisées pour modéliser les flux de RE par groupe de végétation avec se l’erreur standard (en %) et pval la p-value.

| Groupe | a | | | b | | | c | | |
|----------------------------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | valeur | se | pval | valeur | se | pval | valeur | se | pval |
| RE-1 – équation 3.6 | | | | | | | | | |
| Mousse | 0.23 | 19.90 | 0.000 | 0.11 | 6.47 | 0.000 | | | |
| Mixe | 0.48 | 18.80 | 0.000 | 0.09 | 7.11 | 0.000 | | | |
| Herbe | 0.32 | 41.44 | 0.027 | 0.11 | 13.47 | 0.000 | | | |
| Arbuste | 0.50 | 26.02 | 0.001 | 0.09 | 11.10 | 0.000 | | | |
| RE-3 – équation 3.8 | | | | | | | | | |
| Mousse | 0.00 | 38.47 | 0.019 | 0.08 | 8.32 | 0.000 | 0.27 | 15.28 | 0.000 |
| Mixe | 0.00 | 219.38 | 0.654 | 0.09 | 7.93 | 0.000 | 0.49 | 19.16 | 0.000 |
| Herbe | 0.01 | 48.37 | 0.054 | 0.08 | 14.79 | 0.000 | 0.26 | 42.80 | 0.032 |
| Arbuste | 0.01 | 34.85 | 0.011 | 0.07 | 11.09 | 0.000 | 0.47 | 19.93 | 0.000 |

- 2973 — De conserver les changements effectués dans un fichier séparé du fichier source,
 2974 qui reste donc intact.
 2975 — De calculer les flux net.

2976 E Tableau modélisation par groupe de végétation
 2977

Tableau 4 – Valeur des paramètres des équations utilisées pour modéliser les flux de PPB par groupe de végétation avec se l'erreur standard (en %) et pval la p-value.

| Groupe | a | | | b | | | c | | | d | | |
|-------------------------------------|---------|---------|-------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|--------|---------|-------|
| | valeur | se | pval | valeur | se | pval | valeur | se | pval | valeur | se | pval |
| PPB-1 – équations 3.3 et 3.4 | | | | | | | | | | | | |
| Mousse | 11.22 | 17.48 | 0.000 | 33.09 | 17.01 | 0.000 | 14.56 | 37.24 | 0.016 | | | |
| Mix | 1154.99 | 2997.91 | 0.974 | 167.22 | 521.44 | 0.850 | 64.49 | 304.55 | 0.747 | | | |
| Herbe | 80.90 | 930.16 | 0.916 | 72.30 | 283.52 | 0.729 | 32.24 | 216.07 | 0.650 | | | |
| Arbuste | 18.74 | 312.12 | 0.753 | 54.21 | 185.21 | 0.597 | 31.05 | 164.12 | 0.551 | | | |
| PPB-2 – équations 3.5 et 3.4 | | | | | | | | | | | | |
| Mousse | 16.74 | 49.53 | 0.062 | 31.87 | 14.40 | 0.000 | 14.60 | 34.89 | 0.012 | 2.12 | 202.80 | 0.629 |
| Mix | 42.91 | 70.19 | 0.175 | 51.49 | 47.42 | 0.052 | 30.34 | 43.26 | 0.035 | -1.83 | -256.27 | 0.702 |
| Herbe | 38.57 | 31.68 | 0.007 | 35.69 | 38.50 | 0.021 | 21.99 | 60.90 | 0.123 | 0.10 | 2122.54 | 0.963 |
| Arbuste | 23.96 | 33.90 | 0.010 | 33.27 | 47.74 | 0.054 | 23.57 | 70.42 | 0.176 | 0.27 | 910.80 | 0.914 |

[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, ...

