

# **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

|  |     |
|--|-----|
| <b>Table des matières</b>  | iii |
| <b>Liste des figures</b>   | vii |
| <b>Liste des tableaux</b>  | ix  |
| <b>Remerciements</b>   | xi  |
| <b>Introduction</b>  | 1   |
| <b>1 Synthèse bibliographique</b>  | 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  |
| <b>2 Sites d'études et méthodologies employées</b>                         | 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 <sub>2</sub> . . . . .                             | 48  |
| 2.3.2 Les mesures de CH <sub>4</sub> . . . . .                             | 51  |
| 2.3.3 Le calcul des flux . . . . .   | 52  |
| 2.4 Facteurs contrôlants . . . . .   | 53  |
| 2.4.1 acquisitions automatisées . . . . .                                  | 53  |
| 2.4.2 acquisitions manuelles . . . . .                                     | 54  |
| <b>3 Bilan de C de la tourbière de La Guette</b>                           | 55  |
| 3.1 Introduction . . . . .   | 56  |
| 3.2 Procédure expérimentale et analytique . . . . .                        | 57  |
| 3.2.1 Méthodes de mesures . . . . .  | 57  |
| 3.2.2 Modélisation du bilan de C . . . . .                                 | 59  |
| 3.2.3 Estimation de l'erreur associée aux flux et aux bilans . . . . .     | 63  |
| 3.3 Résultats . . . . .  | 64  |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 3.3.1    | Cinétique des facteurs contrôlant et des flux sur la tourbière de La Guette . . . . .    | 64         |
| 3.3.2    | Sélection des modèles . . . . .  | 72         |
| 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 . . . . .  | 83         |
| 3.4      | Discussion . . . . .   | 88         |
| 3.4.1    | Estimations des flux . . . . .   | 88         |
| 3.4.2    | Estimations du bilan net de l'écosystème . . . . .                                       | 91         |
| 3.4.3    | Sensibilité et limitations du bilan . . . . .  | 92         |
| 3.4.4    | Bilan de CO <sub>2</sub> et végétation . . . . .   | 93         |
| 3.4.5    | Variabilité du recouvrement végétal . . . . .  | 93         |
| 3.4.6    | Représentativité locale du modèle . . . . .  | 94         |
| 3.4.7    | perspectives . . . . .   | 94         |
| <b>4</b> | <b>Effets de l'hydrologie sur les flux de GES</b>  | <b>95</b>  |
| 4.1      | Introduction . . . . .   | 96         |
| 4.2      | Procédure expérimentale . . . . .  | 98         |
| 4.2.1    | Expérimentation A . . . . .  | 98         |
| 4.2.2    | Expérimentation B . . . . .  | 99         |
| 4.2.3    | traitement . . . . .   | 99         |
| 4.3      | Résultats . . . . .  | 101        |
| 4.3.1    | Expérimentation A . . . . .  | 101        |
| 4.3.2    | Expérimentation B . . . . .  | 104        |
| 4.3.3    | tendances générales . . . . .  | 107        |
| 4.4      | Discussion . . . . .   | 107        |
| 4.4.1    | Comparaison aux mesures <i>in-situ</i> . . . . .   | 107        |
| 4.4.2    | Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de gaz . . . . .                 | 109        |
| 4.4.3    | Effet cycles multiples . . . . .   | 110        |
| <b>5</b> | <b>Variation journalière de la respiration de l'écosystème (article)</b>                 | <b>111</b> |
| 5.1      | Introduction . . . . .   | 112        |
| 5.1.1    | Study sites . . . . .  | 114        |
| 5.1.2    | Data acquisition . . . . .   | 114        |
| 5.1.3    | Data synchronisation . . . . .   | 115        |
| 5.1.4    | Sensitivity of ER to temperature . . . . .   | 115        |
| 5.1.5    | Testing difference between daytime and nighttime ER sensitivity to temperature . . . . . | 116        |
| 5.1.6    | Physico-chemical characterisation of the peat . . . . .                                  | 116        |
| 5.2      | Results . . . . .  | 117        |
| 5.2.1    | Air temperature and ER variability . . . . .   | 117        |
| 5.2.2    | ER and soil temperature synchronisation . . . . .  | 119        |
| 5.2.3    | Model implementation . . . . .   | 120        |
| 5.2.4    | ER and temperature relationship . . . . .  | 120        |
| 5.2.5    | Q <sub>10</sub> evolution . . . . .  | 122        |
| 5.2.6    | Daytime and nighttime differences . . . . .  | 122        |
| 5.2.7    | Peat characterisation . . . . .  | 125        |
| 5.3      | Discussion . . . . .   | 125        |

|                                    |  |            |
|------------------------------------|--|------------|
| 5.3.1                              | ER differences between sites . . . . .   | 125        |
| 5.3.2                              | Time-delay between temperature and ER . . . . .  | 128        |
| 5.3.3                              | Synchronising ER and temperature improves ER sensitivity to temperature representation . . . . . | 129        |
| 5.3.4                              | Differences between daytime and nighttime ER measurements .                                      | 129        |
| 5.3.5                              | $Q_{10}$ sensitivity to temperature depth and synchronisation . .                                | 130        |
| 5.4                                | Conclusions . . . . .  | 130        |
| <b>Conclusions et perspectives</b> |  | <b>133</b> |
| 5.5                                | Bilan du bilan (de C)? . . . . .   | 134        |
| 5.5.1                              | Modélisation saisonnière et mesures horaires . . . . .   | 135        |
| 5.6                                | L'hydrologie . . . . .   | 136        |
| 5.6.1                              | Résilience de la tourbe par rapport aux 2 années sèches qui précèdent le BdC . . . . .           | 136        |
| 5.7                                | Ouverture vers d'autre méthodes de mesures . . . . .   | 137        |
| 5.8                                | perspectives . . . . .   | 138        |
| 5.9                                | idées . . . . .  | 138        |
| <b>Références bibliographiques</b> |  | <b>150</b> |
| <b>Index</b>                       |  | <b>151</b> |
| <b>Annexes</b>                     |  | <b>153</b> |
| A                                  | Photos supplémentaires . . . . .   | 154        |
| B                                  | protocole végétation . . . . .   | 154        |
| C                                  | Le projet CARBIODIV . . . . .  | 157        |
| D                                  | package m70r . . . . .   | 157        |



# 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 <sup>e</sup> 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 <sup>e</sup> 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 <sub>2</sub> 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 sphaignes en g m <sup>-2</sup> an <sup>-1</sup> . 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 <sup>-2</sup> an <sup>-1</sup> ), en fonction de la température moyenne annuelle dans la littérature. Les couleur 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 . . . . .   | 47 |
| 2.7  | Mesures de CO <sub>2</sub> . . . . .  | 50 |
| 2.8  | SPIRIT . . . . .  | 51 |
| 3.1  | Répartition des 20 placettes de mesures suivant un échantillonnage aléatoire stratifié. . . . .   | 57 |
| 3.2  | Cas idéaux de distribution des résidus (source ?) . . . . .   | 62 |
| 3.3  | Partitionnement des placettes en fonction de leur similarité en termes de composition végétale (pourcentage des strates muscinales, herbacées et arbustives) . . . . .  | 63 |
| 3.4  | Évolution du niveau de la nappe moyen des 20 embases mesuré pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015) . . . . .   | 65 |
| 3.5  | 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 . . . . .  | 65 |
| 3.6  | Évolution de la conductivité pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015) . . . . .  | 66 |
| 3.7  | Évolution du pH pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015) . . . . .   | 66 |
| 3.8  | Évolution de la concentration en carbone organique dissous dans l'eau du sol pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015) . . . . .  | 67 |
| 3.9  | Évolution du niveau de PPB, RE et ENE pendant la période de mesure. Moyenne des 20 embases de mars 2013 à février 2015. . . . .   | 68 |
| 3.10 | Évolution des flux de méthane moyen (N ?) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015) . . . . .   | 69 |
| 3.11 | Relations entre les flux de gaz et une sélection de facteurs contrôlant . . . . .   | 70 |
| 3.12 | PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.3 . . . . .  | 71 |
| 3.13 | PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.5 . . . . .  | 74 |
| 3.14 | RE modèles avec Tair . . . . .  | 76 |
| 3.15 | RE modèles avec Tair . . . . .  | 77 |
| 3.16 | CH4 modèle H . . . . .  | 78 |
| 3.17 | Flux de CO <sub>2</sub> interpolé à partir de PPB-1 et PPB-2 . . . . .  | 80 |
| 3.18 | Flux de CO <sub>2</sub> interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3 . . . . .  | 81 |
| 3.19 | Flux de CO <sub>2</sub> interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3 . . . . .  | 81 |
| 3.20 | Distribution de l'erreur standard (en gris) par placette et des paramètres des modèles RE-1 et RE-3 (en noir) . . . . .   | 85 |
| 3.21 | Distribution de l'erreur standard par placette (en gris) et des paramètres du modèle PPB-2 (en noir) . . . . .  | 86 |
| 3.22 | 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. . . . .   | 87 |
| 3.23 | 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). . . . . | 92 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 4.1 | Prélèvement des mésocosmes (en haut). Mésocosmes installés et protégés de la pluie (en bas) . . . . .   | 100 |
| 4.2 | Schéma d'un mésocosme . . . . .   | 101 |
| 4.3 | Expérimentation A : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH <sub>4</sub> , 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. . . . .   | 102 |
| 4.4 | Expérimentation B : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH <sub>4</sub> , 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. . . . .   | 105 |
| 4.5 | Relations entre les flux de GES et le niveau de la nappe . . . . .  | 108 |
| 5.1 | Ecosystem Respiration (ER), air and peat temperature, in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT). . . . .  | 118 |
| 5.2 | Time delay between temperature at different depths and ER, in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT) . . . . .  | 119 |
| 5.3 | Profile of R <sup>2</sup> 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. . . . .   | 123 |
| 5.4 | Profile of Q <sub>10</sub> 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). . . . .   | 124 |
| 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). . . . .   | 126 |
| 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. . . . . | 137 |
| 7   | Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure. . . . .   | 154 |
| 8   | Calibration de la biomasse en fonction de la hauteur . . . . .  | 155 |
| 9   | Scanne des feuilles . . . . .   | 155 |
| 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 . . . . .  | 156 |
| 11  | Planche de graphes permettant le diagnostique des mesures de flux de CO <sub>2</sub> . . . . .  | 157 |



# 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. . . . .   | 79  |
| 3.2 | Bilan annuel des flux, en $\text{gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ , en fonction des modèles utilisés.   | 83  |
| 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   | 83  |
| 3.4 | Sensibilité relative (en %) du bilan de $\text{CO}_2$ (ENE) en réponse à une variation de $\pm 10\%$ de chacun des paramètres des modèles. . . . .   | 84  |
| 3.5 | Bilan des flux de $\text{CO}_2$ en $\text{gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ , en utilisant PPB-2 et RE-3 . .   | 87  |
| 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). . . . .   | 121 |
| 5.2 | Peat chemical properties as a function of depth in cm : content (%) N, C, H, S, the total, retention and effective porosity, $\Phi_T$ , $\Phi_R$ , $\Phi_E$ 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 $\text{g.cm}^{-3}$ . . . . . | 127 |



# Remerciements

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



# <sup>1</sup> Introduction

---

## <sup>2</sup> Contexte général

<sup>3</sup> Vers 1610, Jan Baptist Van Helmont, chimiste, physiologiste et médecin, découvre  
<sup>4</sup> le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) qu'il nomme « gaz sylvestre » (Philippe de Souabe-  
<sup>5</sup> Zyriane, 1988). À cette époque pré-industrielle (avant 1800), les concentrations en  
<sup>6</sup>  $\text{CO}_2$  sont généralement estimées à 280 ppm<sup>1</sup> (Siegenthaler et Oeschger, 1987). En  
<sup>7</sup> 1957, Charles David Keeling, scientifique américain, met au point et utilise pour la  
<sup>8</sup> première fois, un analyseur de gaz infra-rouge pour mesurer la concentration de  $\text{CO}_2$   
<sup>9</sup> de l'atmosphère sur l'île d'Hawaii, à Mauna Loa. La précision et la fréquence im-  
<sup>10</sup> portante de ses mesures lui permirent de voir pour la première fois les variations  
<sup>11</sup> journalières et saisonnières des concentrations en  $\text{CO}_2$  atmosphérique, mais égale-  
<sup>12</sup> ment à plus long terme leur tendance haussière (Harris, 2010). Depuis l'époque pré-  
<sup>13</sup> industrielle les concentration en  $\text{CO}_2$  ont en effet légèrement augmenté et son alors  
<sup>14</sup> estimée à moins de 320 ppm. Ce constat a probablement joué un rôle dans la prise de  
<sup>15</sup> conscience, par la communauté scientifique, de l'importance et de l'intérêt de l'étude  
<sup>16</sup> du changement climatique et plus largement des changements globaux. En 2013, le  
<sup>17</sup> Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) a publié  
<sup>18</sup> son 5<sup>e</sup> rapport sur le changement climatique qui appuie une nouvelle fois sur l'im-  
<sup>19</sup> portance des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) sur le climat (Stocker *et al.*,  
<sup>20</sup> 2013). Au printemps 2014, la barre symbolique des 400 ppm a été dépassée dans tout  
<sup>21</sup> l'hémisphère nord selon un communiqué de l'Organisation Météorologique Mondiale  
<sup>22</sup> ([http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press\\_releases/pr\\_991\\_fr.html](http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_991_fr.html)).

<sup>23</sup> À l'échelle globale, l'humanité en brûlant des combustibles fossiles et en produisant  
<sup>24</sup> du ciment, émet dans l'atmosphère environ  $7,8 \text{ PgC an}^{-1}$  ( $7,8 \times 10^{15} \text{ gC an}^{-1}$ ) (Ciais  
<sup>25</sup> *et al.*, 2014). Les flux « naturels » entre l'atmosphère et la biosphère sont un ordre de  
<sup>26</sup> grandeur supérieur : 98 et  $123 \text{ PgC an}^{-1}$  pour la respiration ( $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$  principale-  
<sup>27</sup> ment) et la photosynthèse au sens large (Bond-Lamberty et Thomson, 2010; Beer *et al.*,  
<sup>28</sup> 2010). L'importance de ces flux, renforce la nécessité de les comprendre, et si possible  
<sup>29</sup> de les prédire car une modification de leur dynamique même faible pourrait avoir des

---

1. Partie par million

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

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

---

## **57 Objectif de la thèse et approche mise en oeuvre**

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

63 Pour atteindre ces objectifs, nos travaux ont été articulés autour de deux axes  
64 principaux : Dans un premier temps, l'**observation** régulière des flux de gaz ( $\text{CO}_2$   
65 et  $\text{CH}_4$ ) ainsi que d'un certain nombre de paramètres environnementaux servant à  
66 la caractérisation des variabilités spatiales et temporelles, ainsi qu'à l'étude des fac-  
67 teurs contrôlant. Certains facteurs contrôlant sont, dans un second temps, étudiés plus  
68 spécifiquement à travers un volet **expérimentation**. Ce dernier doit permettre une  
69 meilleure compréhension des processus clés avec notamment l'impact de l'hydrologie.

70 Le document est structuré de la façon suivante :

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

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

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



<sup>89</sup> 1 Synthèse bibliographique

<sup>90</sup>

|  |           |
|--|-----------|
| <sup>91</sup> <b>1.1 Les tourbières et le cycle du carbone . . . . .</b>                 | <b>8</b>  |
| <sup>92</sup> 1.1.1 Zones humides et tourbières : définitions et terminologies . . . . . | 8         |
| <sup>93</sup> 1.1.2 Tourbières et fonctions environnementales . . . . .                  | 14        |
| <sup>94</sup> 1.1.3 Les tourbières et les changements globaux . . . . .                  | 16        |
| <sup>95</sup> <b>1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants . . . . .</b>  | <b>20</b> |
| <sup>96</sup> 1.2.1 GES et tourbières . . . . .  | 20        |
| <sup>97</sup> 1.2.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières . . . . .              | 22        |
| <sup>98</sup> 1.2.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux . . . . .                   | 26        |
| <sup>99</sup> 1.2.4 Bilans de C à l'échelle de l'écosystème . . . . .                    | 33        |
| <sup>100</sup> 1.2.5 Méthodologies, mesures et estimation des flux . . . . .             | 36        |
| <sup>101</sup> <b>1.3 Objectifs du travail . . . . .</b>                                 | <b>39</b> |

<sup>102</sup>

<sup>103</sup>

<sup>104</sup>

## 1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

---

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

### 111 1.1 Les tourbières et le cycle du carbone

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

#### 114 1.1.1 Zones humides et tourbières : définitions et terminologies

##### 115 Définitions

116 Les tourbières font partie d'un ensemble d'écosystèmes plus large que l'on appelle  
117 les zones humides (*wetlands* en anglais). Ces zones humides ne sont ni des écosystèmes  
118 terrestres au sens strict, ni des écosystèmes aquatiques. Elles sont à la frontière entre  
119 ces deux mondes et sont caractérisées par un niveau de nappe élevé, proche de la surface  
120 du sol, voire au dessus. Cette omniprésence de l'eau joue fortement sur l'aération du  
121 milieu et constraint, de façon plus ou moins importante, l'accès à l'oxygène. Les zones  
122 humides ont été définie en 1971, lors de la convention dite de RAMSAR<sup>1</sup> de la façon  
123 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 fagnes<sup>2</sup>, 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 :

140 Écosystème dans lequel un processus de tourbification est actif.

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

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

### TOURBE :

151 «Accumulation sédentaire<sup>3</sup> de matériel composé d'au moins 30 % (matière  
sèche) de matières organiques mortes.»

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

152 Le seuil de 30 % est souvent utilisé pour rapprocher sa définition de celle d'un sol  
153 organique (histosol) au sens large, dans lesquels sont classés la majorité des sols tour-  
154 beux (selon la classification). D'autres définitions existent, faisant la distinction entre  
155 sols organiques et tourbes avec un seuil à 75 % ([Andrejko et al., 1983](#)) ou 80 % ([Landva  
et al., 1983](#)). Il est également nécessaire de préciser que, au delà de la classification  
157 utilisée, ce que les écologues considèrent comme de la tourbe contient généralement  
158 80 % de matières organiques au minimum ([Rydin et Jeglum, 2013a](#)). Ce processus de  
159 formation est appelé la tourbification ou turfogénèse et les matières organiques accumu-  
160 lées proviennent majoritairement de la végétation. On définit les matières organiques  
161 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'autres<sup>4</sup>.

162

**<sup>163</sup> Distribution des tourbières à l'échelle mondiale**

<sup>164</sup> Ces variations de définitions ajoutées aux limites floues qui peuvent exister entre  
<sup>165</sup> certains écosystèmes tourbeux et non-tourbeux rendent la cartographie de ces écosys-  
<sup>166</sup> tèmes délicate. Les estimations généralement citées évaluent la surface occupée par les  
<sup>167</sup> tourbières à environ 4 000 000 km<sup>2</sup> ([Lappalainen, 1996](#)). Cette surface correspond à 2  
<sup>168</sup> à 3 % de l'ensemble des terres émergées du globe. Plus de 85 % d'entre elles sont si-  
<sup>169</sup> tuées dans l'hémisphère nord, majoritairement dans les zones boréales et sub-boréales  
<sup>170</sup> ([Strack, 2008](#)) (Figure 1.1). Ce sont sur ces écosystèmes que sera focalisé ce travail, lais-  
<sup>171</sup> sant de côté les tourbières tropicales dont le fonctionnement est distinct et spécifique  
<sup>172</sup> (**Réf needed**).

**<sup>173</sup> La formation des tourbières**

<sup>174</sup> L'atterrissement et la paludification sont les deux processus principaux permettant  
<sup>175</sup> la formation des tourbières (Figure 1.2). Il s'agit pour le premier du comblement pro-  
<sup>176</sup> gressif d'une zone d'eau stagnante (Figure 1.2). Ce comblement est généralement lié à  
<sup>177</sup> l'action combiné d'apports exogènes et d'une végétation colonisant les eaux en formant  
<sup>178</sup> des tremblants<sup>5</sup>. La paludification est la formation de tourbe directement sur un sol  
<sup>179</sup> 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](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

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

### 183 Classifications

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

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

195 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 \(2013b\)](#)

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

### 205 1.1.2 Tourbières et fonctions environnementales

#### 206 Puits de carbone

207 Par définition les tourbières stockent ou ont stocké du carbone. Cette fonction puits  
 208 de carbone rend ces écosystèmes importants vis-à-vis des changements globaux et ce  
 209 malgré la faible surface qu'ils représentent (pour rappel 2 à 3 % des terres émergées).  
 210 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 <sub>2</sub> atmosphérique | 750 – 800          | Robert et Saugier (2003)  |
| Permafrost                    | 1700               |   |

211 270 et 455 Gt C (Tableau 1.1). Cela représente 10 à 25 % du carbone présent dans les  
 212 sols et entre 30 et 60 % du stock de carbone atmosphérique. Ce stock est un héritage  
 213 datant des 10 derniers milliers d'années, l'holocène, période pendant laquelle se sont  
 214 formées la majorité des tourbières (Yu *et al.*, 2010) (Figure 1.4).

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

**232 Biodiversité dans les tourbières**

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

**245 Autres fonctions environnementales**

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

**251 1.1.3 Les tourbières et les changements globaux**

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

256 **Les contraintes anthropiques**

257 Les interactions entre les Hommes et les zones humides au sens large et les tourbières  
258 en particulier remontent probablement à l'aube de l'humanité. Des chemins de rondins  
259 néolithique aux crannogs de l'époque romaine ([Buckland, 1993](#)), de grandes décou-  
260 vertes archéologiques ont été faites dans les écosystèmes tourbeux témoins d'époques  
261 révolues. L'utilisation de la tourbe et des tourbières a dû commencer relativement tôt,  
262 mais c'est à partir du 17<sup>e</sup> siècle que le drainage de ces écosystèmes, pour les convertir  
263 en terres agricoles, s'est intensifié. Au 19<sup>e</sup> siècle, l'apparition de machines permettant  
264 une récolte industrialisée de la tourbe a développé son utilisation comme combustible.  
265 Enfin depuis le milieu du 20<sup>e</sup> une part importante de ces écosystèmes a été drainée  
266 pour développer la sylviculture. Aujourd'hui l'exploitation principale de la tourbe est  
267 liée à son utilisation comme substrat horticole ([Lappalainen, 1996; Chapman et al.,](#)  
268 [2003](#)). Ces utilisations les ont fortement perturbés car elles nécessitent généralement  
269 de drainer ces écosystèmes, notamment pour pouvoir y faire rouler des engins méca-  
270 nisés Aujourd'hui la surface de tourbières altérées est estimée à 500 000 km<sup>2</sup> environ,  
271 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 km<sup>2</sup> à 600 km<sup>2</sup>  
274 ([Lappalainen, 1996; Manneville, 1999](#)).

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

278 **Les contraintes climatiques**

279 Comme nous l'avons dit, le stock de C accumulé par les tourbières s'est majori-  
280 tairement constitué pendant l'Holocène. À cette époque déjà ces écosystèmes étaient  
281 influencés par le climat, et leur développement n'a pas été linéaire sur ces douze der-  
282 niers milliers d'années. Il est reconnu que le développement des tourbières est très  
283 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 <sup>2</sup> ) | 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            |

<sup>284</sup> *et al.*, 2009). Plus particulièrement entre il y a 12 000 et 8000 ans, période pendant  
<sup>285</sup> laquelle on recense la plus grande proportion d'initiation de tourbières (Figure 1.4).  
<sup>286</sup> Cette période coïncide avec le maximum thermique holocène (HTM), période pendant  
<sup>287</sup> laquelle le climat était plus chaud qu'aujourd'hui ([Kaufman et al., 2004](#)). Ce constat  
<sup>288</sup> peut sembler paradoxal : en effet, dans la littérature concernant les tourbières et le  
<sup>289</sup> réchauffement climatique actuel, il est craint que ces écosystèmes ne deviennent des  
<sup>290</sup> sources de carbone. Cependant ces même auteurs qui ont montré cette relation entre  
<sup>291</sup> le HTM et le développement important des tourbières, ne préjugent pas de l'effet du  
<sup>292</sup> réchauffement actuel. Notamment [Jones et Yu \(2010\)](#) expliquent que pendant cette pé-  
<sup>293</sup> riode de maximum thermique, existe également une saisonnalité très importante, avec  
<sup>294</sup> des été chauds et des hivers froid, qui a dû en minimisant la respiration hivernale de ces  
<sup>295</sup> écosystèmes, jouer un rôle important dans leur développement. Cette forte saisonnalité  
<sup>296</sup> n'est pas attendue lors du réchauffement actuel. L'effet estimé dans les hautes latitudes  
<sup>297</sup> semble plus important pendant l'hiver et l'automne, et tendrait donc à minimiser cette  
<sup>298</sup> saisonnalité ([Christensen et al., 2007](#)). Les effets directs attendus du réchauffement  
<sup>299</sup> dans les hautes latitudes à l'horizon 2100, sont une augmentation des températures de  
<sup>300</sup> 2 à 8 °C dans les zones boréales, et de 2 à 6 °C dans les zones tempérées, ainsi qu'une  
<sup>301</sup> augmentation probable des précipitations (Figure 1.5). De façon plus indirecte est at-  
<sup>302</sup> tendue la fonte du permafrost, l'augmentation de l'intensité et de la fréquence de feux  
<sup>303</sup> et des changements dans les compositions des communautés végétales ([Christensen](#)  
<sup>304</sup> *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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> 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

---

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

## 309 1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs 310 contrôlants

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

### 316 1.2.1 GES et tourbières

317 Dans l'atmosphère le carbone est principalement présent dans l'atmosphère sous  
318 forme de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de méthane ( $\text{CH}_4$ ).

319 La concentration en  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère fluctuait avant l'ère industrielle entre  
320 180 et 290 ppm. En 1750 au début de l'ère industrielle sa concentration était de 280 ppm  
321 environ avant d'augmenter pour atteindre 391 ppm aujourd'hui (moyenne annuelle en  
322 2011) ([Ciais et al., 2014](#)). Différents processus permettent d'extraire du  $\text{CO}_2$  de l'at-  
323 mosphère, la photosynthèse, la dissolution du  $\text{CO}_2$  dans l'océan et enfin l'altération de  
324 silicate et les réactions avec le carbonate de calcium. Ces processus s'effectuent avec des  
325 échelles de temps différentes, en conséquence après une émission de  $\text{CO}_2$ , il ne reste que  
326 40 % de cette émission après 100 ans, mais il reste toujours plus de 20 % après 1000 ans  
327 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 CO<sub>2</sub> 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).

328 La concentration en méthane de l'atmosphère est estimée à 350 ppb<sup>6</sup> il y a 18 000 ans  
 329 environ lors de la dernière glaciation, à 720 ppb en 1750, et à 1800 ppb aujourd'hui  
 330 (ou plutôt en 2011) (Ciais *et al.*, 2014). À l'inverse du CO<sub>2</sub> sa durée de vie dans  
 331 l'atmosphère est limitée : moins de 10 ans (Lelieveld *et al.*, 1998; Prather *et al.*, 2012).  
 332 Malgré cela son potentiel de réchauffement global<sup>7</sup> (PRG) est important notamment  
 333 à court terme, 72 à 20 ans. À plus long terme son effet relativement au CO<sub>2</sub> diminue  
 334 et atteint 25 à l'horizon 100 ans. Les zones humides sont la première source naturelle  
 335 de CH<sub>4</sub> atmosphérique avec un flux à l'échelle globale estimé entre 145 et 285 Tg an<sup>-1</sup>  
 336 (Lelieveld *et al.*, 1998; Wuebbles et Hayhoe, 2002; Ciais *et al.*, 2014) (Tableau ?). Les  
 337 tourbières de l'hémisphère nord comptent pour 46 Tg an<sup>-1</sup> (Gorham, 1991) (**pas de**  
 338 **source plus récente ?**).

339 À l'échelle globale, le stockage de C par les tourbières, prenant en compte à la fois  
 340 le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub>, est estimé à 70 Tg an<sup>-1</sup> (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 CO<sub>2</sub>. Le PRG du CO<sub>2</sub> vaut donc 1 par définition.



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

### <sup>341</sup> 1.2.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières

#### <sup>342</sup> De l'atmosphère à l'écosystème

<sup>343</sup> Avant de stocker et de conserver du carbone, le faut le capturer. Ce transfert du  
<sup>344</sup> carbone de l'atmosphère à la tourbe se fait sous la forme de CO<sub>2</sub>, assimilé lors de la  
<sup>345</sup> photosynthèse. Principalement par les végétaux supérieurs, et éventuellement, bien que  
<sup>346</sup> dans de moindre proportions, par des algues, des lichens ou des bactéries photosynthé-  
<sup>347</sup> tiques ([Girard \*et al.\*, 2011](#)). On peut écrire la réaction de photosynthèse de la façon  
<sup>348</sup> suivante :



<sup>349</sup> Si la photosynthèse est le processus majeur d'assimilation du CO<sub>2</sub>, il existe d'autres  
<sup>350</sup> voies métaboliques permettant la capture du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. Par exemple les

351 micro-organismes chemolithotrophes (**expliquer**) sont capables d'assimiler le CO<sub>2</sub> en  
 352 utilisant l'énergie issue de l'oxydation de composés inorganiques, ce que l'on appelle la  
 353 chimiosynthèse, mais leur importance est moindre.

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

**PRODUCTION PRIMAIRE BRUTE (PPB) :**

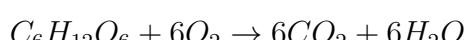
Quantité de carbone extraite de l'atmosphère et transformée en matières  
 356 organiques par l'écosystème principalement via la photosynthèse. Ce flux  
 est exprimé en quantité de carbone par unité de surface et de temps.

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

362 Il n'y a pas de flux direct de CH<sub>4</sub> de l'atmosphère vers les écosystèmes terrestres.  
 363 90 % du CH<sub>4</sub> présent dans l'atmosphère est extrait en réagissant avec des radicaux  
 364 hydroxyles, cette réaction à lieu majoritairement dans la troposphère.

365 **De l'écosystème à l'atmosphère**

366 Les sources de carbone émises par les tourbières vers l'atmosphère sont multiples.  
 367 D'abord différents gaz peuvent être émis, notamment le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub>, éventuellement  
 368 du N<sub>2</sub>O. Le processus majeur est la production de CO<sub>2</sub> par respiration qui au niveau  
 369 cellulaire, peut être écrite sous la forme :



370 Mais certains de ces gaz peuvent être produit par différentes sources, ainsi le CO<sub>2</sub>  
 371 est produit par différents processus dont la respiration aérobie (le plus gros contribu-  
 372 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

---

373 encore l'oxydation du méthane. Les principales sources d'émissions du CO<sub>2</sub> sont re-  
374 présentées dans la figure 1.7. À l'échelle macroscopique là, ou plutôt, les respirations  
375 sont généralement séparées en deux. D'un côté la respiration végétale, que ce soit celle  
376 des feuilles, des tiges, des racines et que l'on appelle la **respiration autotrophe**<sup>8</sup>. De  
377 l'autre rassemblé sous le vocable de **respiration hétérotrophe**<sup>9</sup>, la respiration de la  
378 rhizosphère, liée à l'émission d'exsudats par les racines, la décomposition des litières  
379 et des matières organiques, la respiration de la faune et l'oxydation du CH<sub>4</sub> par les  
380 organismes méthanotrophes. L'ensemble de ces respirations est défini comme :

### RESPIRATION DE L'ÉCOSYSTÈME (RE) :

Quantité de carbone émise sous forme de CO<sub>2</sub> par l'écosystème dans l'at-  
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.

382 On distingue la respiration de l'écosystème de celle du sol en définissant la respiration  
383 du sol (RS) comme l'ensemble des respirations de la colonne de sol, à l'exclusion de la  
384 partie aérienne ([Luo et Zhou, 2006a](#)). Cependant, dans la littérature la respiration du  
385 sol semble parfois être considérée comme équivalente à la respiration de l'écosystème,  
386 ou du moins cette terminologie est parfois utilisée de façon synonyme à la respiration  
387 de l'écosystème ([Raich et Schlesinger, 1992](#)). Les études discriminant RS et RE montrent  
388 ainsi que dans des sols tourbeux RS compte pour plus de 60 % de RE [Lohila et al.](#)  
389 ([2003](#)). La production de CO<sub>2</sub> est donc un signal multi-sources intégré sur l'ensemble  
390 de la colonne de tourbe. Le transport du CO<sub>2</sub> produit se fait par diffusion suivant le  
391 gradient de concentration, fort dans le sol et plus faible dans l'atmosphère. C'est cette  
392 multitude de processus qui rend l'estimation de ce flux difficile, en effet chacune des  
393 respirations n'aura pas la même sensibilité vis à vis de facteurs contrôlant.

394 Conséquence du niveau de nappe élevé des tourbières, le développement d'une zone  
395 anoxique importante dans la colonne de sol favorise la production de CH<sub>4</sub>. 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.

396 duit par des Archaea méthanogènes, des organismes anaérobies vivants sous le ni-  
 397 veau de la nappe. En moyenne les flux de CH<sub>4</sub> mesurés dans les tourbières s'étendent  
 398 de 0 à plus de 0,96 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, avec généralement des flux compris entre 0,0048 et  
 399 0,077 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ([Blodau, 2002](#)). Le CH<sub>4</sub> est principalement produit à partir d'acé-  
 400 tate (CH<sub>3</sub>COOH) ou de dihydrogène (H<sub>2</sub>), ces deux composés étant dérivés de la dé-  
 401 composition préalable de matières organiques ([Lai, 2009](#)).



402 Le CH<sub>4</sub> produit est transporté dans l'atmosphère par diffusion, ébullition ou à travers  
 403 certaines plantes ([Joabsson \*et al.\*, 1999](#); [Colmer, 2003](#)). Pendant ce transport le CH<sub>4</sub>  
 404 peut être oxydé par des organismes méthanolotrophes. Cette transformation produit  
 405 tour à tour différents composés (méthanol, formaldéhyde, formate) aboutissant à la  
 406 production de CO<sub>2</sub> ([Whalen et Peirce, 2005](#)).



407 On définit le flux de CH<sub>4</sub> comme :

FLUX DE CH<sub>4</sub> (F<sub>CH<sub>4</sub></sub>) :

408 Quantité de carbone émise sous forme de CH<sub>4</sub> 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.

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

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

### 417 1.2.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux

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

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

#### 434 La photosynthèse

435 À l'échelle d'espèces végétales, la quantité de carbone assimilable par la photosyn-  
436 thèse est fonction de la quantité de lumière reçue (Long et Hällgren, 1993). La quantité  
437 de carbone assimilée augmente d'abord de façon linéaire avec le rayonnement, avant  
438 d'être limitée par la régénération d'une enzyme, la Rubisco <sup>10</sup>, nécessaire à la fixation  
439 du CO<sub>2</sub> (Figure 1.8). Les limitations de l'assimilation, que ce soit la pente initiale de  
440 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)

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

---

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

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

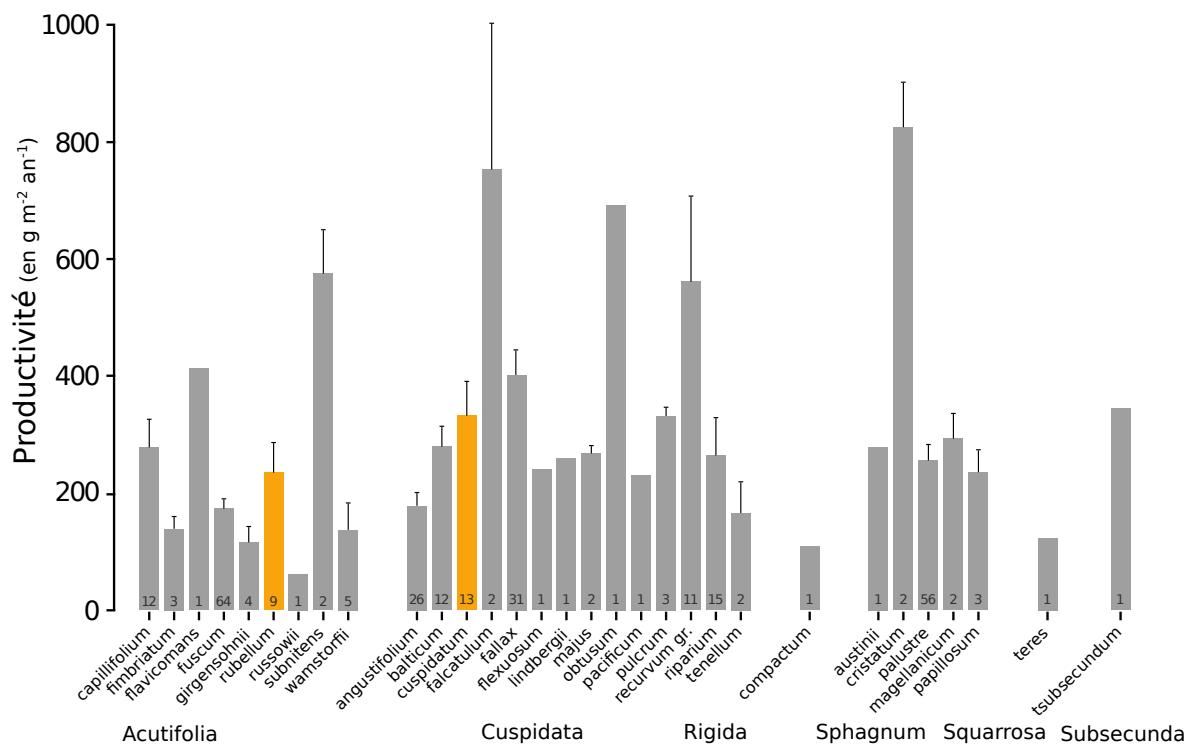


FIGURE 1.9 – Productivités moyennes des espèces de sphaignes en  $\text{g m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ . Les barres d'erreurs représentent l'erreur standard. Le nombre d'observation est indiqué par les nombres à l'intérieur des barres. Les espèces en orange sont celles rencontrées sur le site d'étude. Modifié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

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

500 **La RE**

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

514 À l'échelle de l'écosystème de nombreuses études ont mis en évidence une corré-  
515 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,  
516 communautés et des conditions environnementales qui jouent sur la respiration, font  
517 qu'aucune équation ne fait réellement consensus. Malgré tout, la majorité d'entre-elles  
518 décrivent une augmentation exponentielle de la respiration avec la température. Ainsi  
519 dans les tourbières, des études *in-situ* ont montré que dans des conditions plus chaudes,  
520 mais également plus sèches étant donné que ces deux conditions sont difficilement sépa-  
521 rables sur le terrain, la RE a tendance à augmenter ([Aurela et al., 2007](#); [Cai et al., 2010](#);  
522 [Ward et al., 2013](#)). Des études à base de mésocosmes<sup>11</sup> prélevés sur le terrain ont égale-  
523 ment montré la relation entre les variation de RE et celle de la température([Updegraff](#)  
524 *et al.*, 2001; [Weedon et al., 2013](#)).

526 Le niveau de nappe, conditionnant l'accès à l'oxygène, joue également un rôle im-  
527 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 rhizosphère<sup>12</sup> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 référence<sup>13</sup> (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

549 un effet à la fois de l'augmentation de la respiration et de la diminution de la pho-  
550 tosynthèse ([Strack et Zuback, 2013](#)). [Lund et al. \(2012\)](#) montrent également que sur  
551 un même site une baisse du niveau de la nappe deux années différentes entraînera une  
552 baisse de l'ENE dans les deux cas, mais que dans l'un des cas cette baisse est contrôlée  
553 par une augmentation de la respiration et que dans l'autre elle est contrôlée par une di-  
554 minution de la photosynthèse. Enfin de façon un peu plus isolée [Ballantyne et al. \(2014\)](#)  
555 ne notent pas d'effet d'une baisse du niveau de la nappe sur l'ENE car l'augmentation  
556 de la respiration est compensée par une augmentation de la photosynthèse. La réponse  
557 du CO<sub>2</sub> vis-à-vis d'une variation du niveau de la nappe n'est donc pas triviale.

### 558 Le CH<sub>4</sub>

559 La production du CH<sub>4</sub>, par des *Archaea* méthanogènes principalement à partir de  
560 dihydrogène et d'acétate, est contrôlée par la **disponibilité** de ces **substrats** ([Segers,](#)  
561 [1998](#)). L'ajout de substrats à destination des méthanogènes (acétate, glucose, étha-  
562 nol) tend à augmenter les émissions de CH<sub>4</sub> ([Coles et Yavitt, 2002](#)). Le **niveau de la**  
563 **nappe** est un autre facteur contrôlant les flux de CH<sub>4</sub>. Généralement plus le niveau  
564 est important plus la zone potentielle de production du CH<sub>4</sub> est importante et plus les  
565 émissions sont fortes ([Pelletier et al., 2007](#)). Par contre une augmentation du niveau  
566 de la nappe au dessus de la surface peut conduire à une diminution des émissions de  
567 CH<sub>4</sub> ([Bubier, 1995](#)). [Pelletier et al. \(2007\)](#) montrent également que les flux sont plus  
568 importants lorsque le CH<sub>4</sub> est mesuré dans des zones avec **végétation**, et plus particu-  
569 lièrement des carex. Ce lien avec la végétation est la conséquence d'une adaptation de  
570 certaines espèces aux conditions de saturations en eau qui peuvent faciliter l'échange  
571 de gaz entre l'atmosphère et l'écosystème grâce à un espace intercellulaire agrandi,  
572 l'Aerenchyme ([Rydin et Jeglum, 2013c](#)). Enfin la **température** joue généralement un  
573 rôle important, augmentant la vitesse de production. La sensibilité à la température de  
574 la production de CH<sub>4</sub> varie selon le processus considéré et la communauté de métha-  
575 nogènes associés ([Segers, 1998](#)). La température peut également faciliter le transport  
576 du CH<sub>4</sub> par ébullition ou via la végétation ([Lai, 2009](#)).

577 Pour résumer, à l'échelle de l'écosystème un même facteur peut influer sur différents  
578 flux mais un facteur peut également influer sur un flux de différentes façons. Parmi ces  
579 facteurs, l'effet du niveau de la nappe sur les flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> reste difficile à  
580 prédire. Il contrôle la proportion des zones oxiques et anoxiques de la colonne de sol et  
581 donc la proportion de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> produit. Il influe également sur la végétation, que  
582 ce soit à court terme (stress hydrique), ou à long terme (changement de communautés  
583 végétales). Le niveau de la nappe, s'il monte, peut par exemple augmenter ou diminuer  
584 la PPB, selon sa hauteur de départ et la végétation présente sur le site. Pour un même  
585 niveau moyen, il semble également que plus la variation du niveau est importante plus  
586 les flux seront fort (lesquels (**Réf needed**)). Des effets de chasse ont également été  
587 observés après simulation d'événements pluvieux. La question du niveau de la nappe  
588 est donc primordiale et sera explorée dans le chapitre 4.

#### 589 1.2.4 Bilans de C à l'échelle de l'écosystème

590 Si l'étude d'un facteur spécifique, comme l'hydrologie, est nécessaire afin de mieux  
591 comprendre son fonctionnement spécifique, l'étude d'un écosystème dans son ensemble  
592 l'est tout autant si l'on souhaite intégrer toute sa complexité naturelle. Le fonctionne-  
593 ment naturel d'une tourbière active tend à piéger du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans l'éco-  
594 système, dans la tourbe. Ce fonctionnement vient de ce que les entrées de carbone, la  
595 PPB, sont plus importantes que les sorties, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>. Ce déséquilibre entre les flux de  
596 carbone, ce bilan, s'il est positif indique que l'écosystème fonctionne comme un puits  
597 de carbone, tandis que s'il est négatif il fonctionne comme une source.

598 Par convention, dans ce document les flux (RE, PPB et F<sub>CH<sub>4</sub></sub>) sont exprimés en  
599 valeur absolue afin de faciliter l'étude de leurs variations. Les bilans seront établis  
600 en prenant l'écosystème comme référence, le carbone entrant dans l'écosystème est  
601 compté positivement et le carbone sortant négativement. Les flux RE et F<sub>CH<sub>4</sub></sub> seront  
602 donc comptés négativement et la PPB positivement. Par la suite l'abréviation PPB et  
603 le mot photosynthèse seront employés de façon inter-changeable de même que RE et  
604 respiration et se rapportera à ces flux tels que définis dans les encadrés précédents, sauf

605 mention contraire.

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

### 609 **Approche archive et temps long**

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

### 625 **Bilans de carbone contemporains**

626 La seconde approche pour estimer le bilan de carbone d'écosystèmes est d'en esti-  
627 mer les flux actuels de carbone entrant et sortant. Les flux principaux dans le bilan de  
628 carbone d'une tourbière ont d'ors et déjà été décrits. Il s'agit de la PPB, de la RE et du  
629 flux de CH<sub>4</sub>. Cependant d'autres flux existent, notamment le flux de carbone organique  
630 dissout (COD), de carbone organique particulaire (COP), de carbone inorganique dis-  
631 sout (CID), de Composés Organiques Volatiles (COV), et de monoxyde de carbone

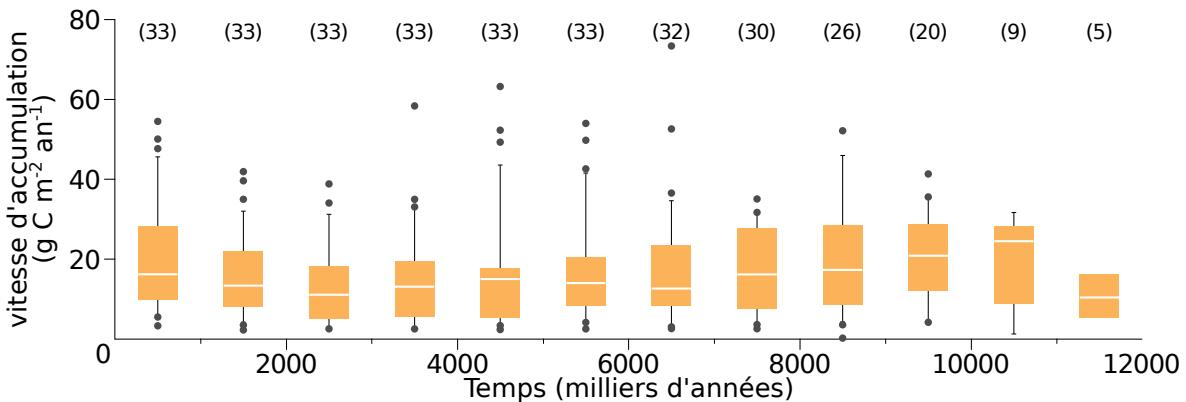


FIGURE 1.10 – Vitesse apparente d’accumulation du carbone à long terme durant l’Holocène. Les chiffres entre parenthèses représentent le nombre de mesures. Modifié d’après [Yu et al. \(2009\)](#)

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

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

634 Avec :

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

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

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

### 651 1.2.5 Méthodologies, mesures et estimation des flux

#### 652 Mesure des flux de gaz

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

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

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

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

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

### 1.3. Objectifs du travail

---

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

### 698 Estimation des flux

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

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

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

### <sup>716</sup> 1.3 Objectifs du travail

<sup>717</sup> Dans ce contexte les objectifs de ce travail sont donc (i) de caractériser la varia-  
<sup>718</sup> bilité spatio-temporelle des flux et d'établir le bilan de carbone de la tourbière de La  
<sup>719</sup> Guette, (ii) de préciser l'effet du niveau de la nappe sur les émissions lors de cycles  
<sup>720</sup> de dessiccations réhumectations. Pour ce faire une approche axée sur l'observation et  
<sup>721</sup> l'expérimentation a été mise en oeuvre :

- <sup>722</sup> — Dans un premier temps, a été mis en place un suivi sur la tourbière de La  
<sup>723</sup> Guette permettant d'évaluer les flux et d'étudier leurs variations saisonnières et  
<sup>724</sup> spatiales sur l'ensemble de l'écosystème. Ces estimations de flux ont ensuite pu  
<sup>725</sup> être utilisées afin d'estimer le bilan de carbone de la tourbière.
- <sup>726</sup> — Dans un second temps, à travers des expérimentations en mésocosmes et sur le  
<sup>727</sup> terrain, l'effet du niveau de la nappe sur les flux de GES a été exploré, particu-  
<sup>728</sup> lièrement lors de cycles de dessiccation-réhumectations.
- <sup>729</sup> — Enfin un suivi des flux à haute fréquence sur plusieurs tourbières a été réalisé  
<sup>730</sup> afin de déterminer les éventuelles différences de sensibilité des émissions de CO<sub>2</sub>  
<sup>731</sup> entre le jour et la nuit et de tester à cette échelle une méthode d'estimation de  
<sup>732</sup> la RE basée sur la synchronisation entre les signaux de flux et de température.



## <sup>733</sup> 2 Sites d'études et méthodologies employées

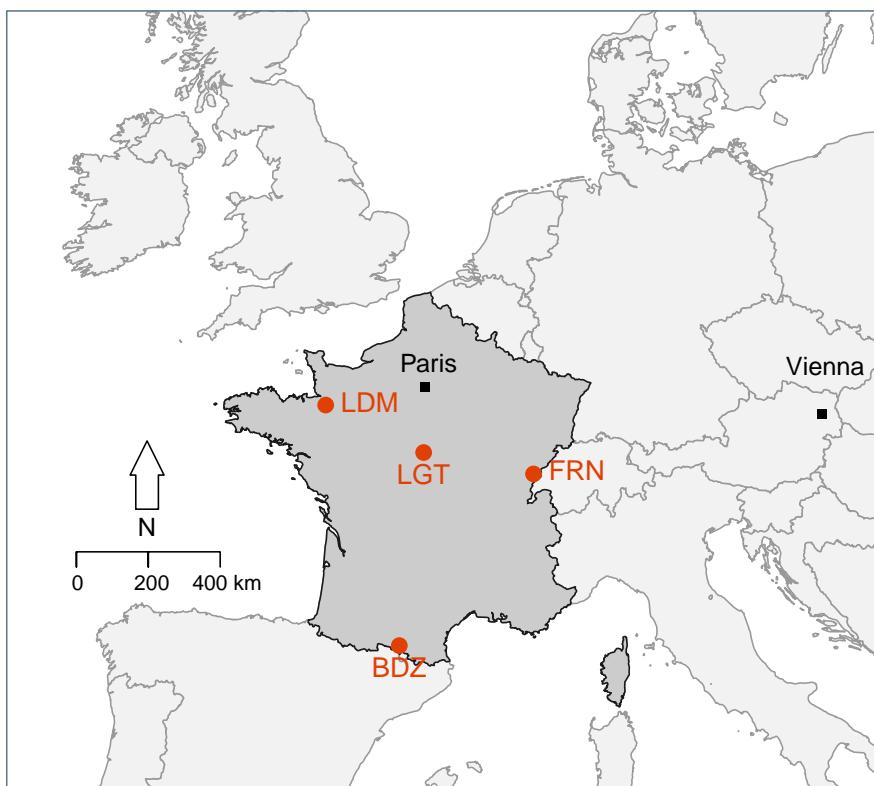
<sup>734</sup>

|                |   |           |
|----------------|---|-----------|
| <sup>735</sup> | <b>2.1 Présentation de la tourbière de La Guette . . . . .</b>      | <b>42</b> |
| <sup>736</sup> |   |           |
| <sup>737</sup> | <b>2.2 Autres sites du service national d'observation . . . . .</b> | <b>47</b> |
| <sup>738</sup> |   |           |
| <sup>739</sup> | <b>2.3 Mesures de flux de gaz . . . . .</b>                         | <b>48</b> |
|                | 2.3.1 Les mesures de CO <sub>2</sub> . . . . .                      | 48        |
| <sup>740</sup> | 2.3.2 Les mesures de CH <sub>4</sub> . . . . .                      | 51        |
| <sup>741</sup> | 2.3.3 Le calcul des flux . . . . .                                  | 52        |
| <sup>742</sup> | <b>2.4 Facteurs contrôlants . . . . .</b>                           | <b>53</b> |
| <sup>743</sup> | 2.4.1 acquisitions automatisées . . . . .                           | 53        |
| <sup>744</sup> | 2.4.2 acquisitions manuelles . . . . .                              | 54        |
| <sup>745</sup> |   |           |

<sup>746</sup>

## 2.1 Présentation de la tourbière de La Guette

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



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

FIGURE 2.1 – Site d'études SNOT

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

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

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

774 Ces perturbations, ou au moins une partie d'entre elles, ont probablement favorisé  
775 l'envahissement du site par une végétation vasculaire, notamment arborée et composée  
776 de pins (*Pinus sylvestris*) et de bouleaux (*Betula verrucosa* et *pubescens*). [Viel et al.](#)  
777 ([2015](#)) a pu calculé, grâce à l'étude de photos aérienne, la vitesse de fermeture du site,  
778 entre 1945 et 2010, estimée à  $2020 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$  avant l'incendie de 1976 et à  $3469 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$   
779 après. La tourbière est également envahie de façon importante par la molinie bleue  
780 (*Molinia caerulea*) de la famille des *Poaceae* (Figure [2.3c](#)). Leur présence favorisant la  
781 dégradation des matières organiques ([Gogo et al., 2011](#)). Sont également présentes sur  
782 le site un certain nombre d'espèces caractéristiques des tourbières comme les sphaignes,  
783 principalement *Sphagnum cuspidatum* et *Sphagnum rubellum*, qui forment des tapis.  
784 Un tapis de sphaignes en cours de formation est visible sur la photo [2.3a](#). Sur cette  
785 même photo sont également visible des Linaigrettes à feuilles étroites (*Eriophorum*  
786 *augustifolium*), une plante de la famille des *Cyperaceae* caractéristique des marais et  
787 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

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

796 Au cours des dernières années, les précipitations sont relativement différentes avec  
797 deux années plus sèches que la moyenne avant 2013 et deux années plus humides en  
798 2013 et 2014 (Figure 2.4). On observe également cette dualité vis-à-vis du niveau de  
799 la nappe. Avant 2013 les étés sont marqués par des étiages importants avec des baisses  
800 du niveau de nappe allant jusqu'à -60 cm en 2012 (Figure 2.5). Après 2013, les étiages  
801 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

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

## 806 2.2 Autres sites du service national d'obser- 807 vation

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

## 2.3. Mesures de flux de gaz

---

816        Au sein du SNOT et à travers les différentes expérimentations et observations réalisées sur les sites, de nombreuses mesures ont été effectuées : des mesures de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> ainsi que d'un certain nombre de facteurs contrôlant. Les méthodologies utilisées de façon transverse aux différentes expérimentations sont décrites ci-après, celles plus spécifiques le seront dans le chapitre qui les concerne.

### 821      2.3    Mesures de flux de gaz

#### 822      2.3.1    Les mesures de CO<sub>2</sub>

823        Toutes les mesures de flux de CO<sub>2</sub> présentées par la suite ont été faite avec les mêmes matériels et le même protocole. Les chambres utilisées sont en plexiglass et ont été conçue (LPC2E) et fabriquées (ISTO) au CNRS. Ce sont des chambres transparentes, cylindriques, de 30 cm de diamètre pour 30 cm de hauteur. Les mesures de concentration en CO<sub>2</sub> à proprement parler ont été faite à l'aide d'une sonde Vaisala CARBOCAP® GMP 343. La sonde est directement insérée dans la chambre ainsi qu'une sonde Vaisala HUMICAP® HMP 75 mesurant d'humidité et la température dans la chambre (Figures 2.7, photographies).

831        Avant toute mesure, des embases sont installées sur le site. Ce sont des cylindres de PVC d'une hauteur de 15 cm pour 30 cm de diamètres, insérés dans le sol sur 8 à 10 cm. La partie basale et enterrée de ces cylindres (sur 7 cm) a été préalablement percée d'une quarantaine de trous (1 cm de diamètre) afin de minimiser les impacts de l'embase sur le développement racinaire et permettre les écoulements d'eau.

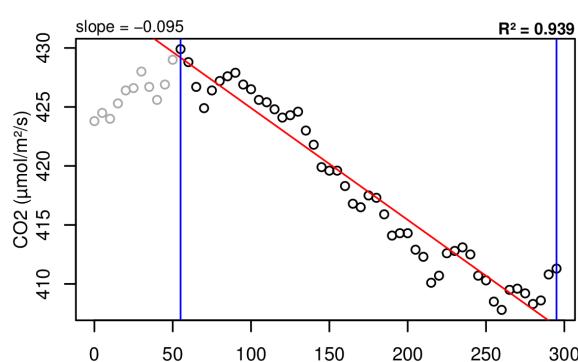
836        La méthode mise en œuvre est celle de la chambre statique fermée, aucun système de pompe n'est donc utilisé. Ceci permet d'avoir un système de mesure relativement léger, facilement transportable et permettant une mise en oeuvre sur l'ensemble du site d'étude. Une mesure se déroule de la façon suivante : La chambre est posée sur l'embase, l'analyseur de CO<sub>2</sub>, et la sonde humidité/température sont insérées à l'intérieur de cette dernière. Un ventilateur de faible puissance est également positionné à

l'intérieur de la chambre au préalable afin d'homogénéiser l'air. 1 à 3 min de stabilisation sont nécessaires après la pose de la chambre afin d'éviter les effets pouvant y être liés le plus souvent la perturbation d'un gradient de concentration. L'enregistrement est ensuite lancé, les données (concentration en CO<sub>2</sub>, température, humidité) sont acquises toutes les 5 s pendant 5 min. La mesure se déroule donc sur une période de temps relativement courte afin de minimiser les perturbations possibles et de s'éloigner des conditions naturelles extérieures. Dans ce but les mesures ont parfois été manuellement raccourcies, 2 à 3 min d'acquisition, si une pente claire se dégageait rapidement. Ceci notamment lorsque les conditions météorologiques, chaudes et ensoleillées, laissaient supposer une différence importante vis-à-vis des conditions extérieures. Généralement, deux acquisitions de CO<sub>2</sub> sont faites à la suite sur une même embase. La première, avec la chambre transparente nue, permettant l'enregistrement de l'ENE (Figure 2.7-a). La seconde avec la chambre recouverte d'une chaussette de tissu occultant, isolant la chambre de la lumière, permettant d'interrompre la photosynthèse et donc d'enregistrer les respirations (RE) (Figure 2.7-b).

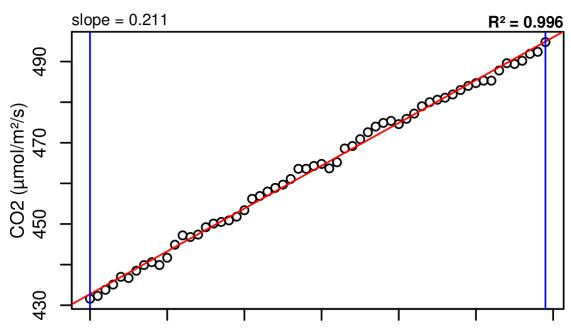
De nombreux écueils peuvent rendre une mesure inexploitables. D'abord le placement de la chambre, cela peut sembler trivial mais positionner la chambre au milieu d'herbacées et de bruyères n'est pas toujours évident. Plus anecdotiquement des sphagnes gelées, recouvrant les bords de l'embase rendent la pose de la chambre difficile voire impossible. Enfin selon l'heure de la journée des gradients de concentrations peuvent être présent et augmenter localement les concentrations de CO<sub>2</sub> de façon importante allant jusqu'à saturer la sonde.

Au vu du volume de données acquises et souhaitant garder l'intérêt de mesures manuelles, à savoir le contrôle humain des flux et des conditions de mesure, il a été nécessaire de développer un outil de traitement facilitant le contrôle et le calcul des flux. Ceci afin d'éviter de recourir à des seuils arbitraires (typiquement une valeur de R<sup>2</sup>) pour le contrôle qualité des données, mais également de permettre une reproductibilité et un traçage des modifications effectuées sur les données brutes. Ce travail est présenté dans l'annexe D.

## 2.3. Mesures de flux de gaz



(a) Mesure de l'échange net de l'écosystème



(b) Mesure de la respiration de l'écosystème

FIGURE 2.7 – Mesures de CO<sub>2</sub>



FIGURE 2.8 – SPIRIT

### <sup>871</sup> 2.3.2 Les mesures de CH<sub>4</sub>

<sup>872</sup> Les mesures de CH<sub>4</sub> ont été réalisée avec une chambre aux caractéristiques similaires  
<sup>873</sup> à celles utilisées pour les mesures de CO<sub>2</sub> à l'exception de l'interface avec l'analyseur. En  
<sup>874</sup> effet la taille de ce dernier ne permettait pas de l'insérer directement dans la chambre  
<sup>875</sup> comme l'analyseur de CO<sub>2</sub>. La méthode de la chambre dynamique fermée a donc été  
<sup>876</sup> utilisée pour réaliser ces mesures, elle diffère donc légèrement de celle utilisée pour le  
<sup>877</sup> CO<sub>2</sub> puisqu'elle nécessite la mise en oeuvre d'un système de pompe pour transporter  
<sup>878</sup> le gaz jusqu'à l'analyseur. L'instrument utilisé pour analyser la concentration en CH<sub>4</sub>  
<sup>879</sup> est le SPIRIT (SPectromètre Infra Rouge In-situ Troposphérique) (Figure 2.8).

<sup>880</sup> Le SPIRIT est un spectromètre infra-rouge développé par le LPC2E. La spectro-  
<sup>881</sup> métrie infra-rouge se base sur la mesure de l'absorption d'un rayonnement infrarouge  
<sup>882</sup> par des molécules. Pour une molécule, cette absorption est variable selon les longueurs  
<sup>883</sup> d'ondes permettant de la caractériser, son intensité étant fonction de la concentration  
<sup>884</sup> (Loi de Beer-Lambert) Cet instrument profite de l'expertise acquise par le laboratoire

## 2.3. Mesures de flux de gaz

---

885 dans le domaine de la métrologie infra-rouge, notamment avec le développement de son  
886 ancêtre le SPIRALE (SPectroscopie Infra Rouge par Absorption de Lasers Embarqués).  
887 Plus petit et plus léger (100 kg), le SPIRIT a été développé en différentes versions,  
888 fonction des usages. Il existe actuellement une version sol et une version avion de  
889 l'appareil. Les capacités du SPIRIT sont principalement liées à deux éléments. Pre-  
890 mièrement l'invention d'une cellule à réflexion multiple par le LPC2E ([Robert, 2007](#)),  
891 permettant d'adapter facilement la longueur du parcours optique en fonction de la  
892 concentration des gaz à mesurer. Deuxièmement l'utilisation de lasers à cascades quan-  
893 tique (QCL), dont la puissance permet d'augmenter le nombre de réflexion et la sen-  
894 sibilité des mesures d'absorption. Les QCL installés émettent séquentiellement dans  
895 le moyen infra-rouge (2,5 à 25 µm), dans une gamme spécifique aux espèces que l'on  
896 souhaite mesurer. Ce choix est dicté par l'absorbance à ces longueurs d'ondes d'un  
897 grand nombre d'espèces d'intérêt et l'intensité importante de leurs raies d'absorption.  
898 Après son émission, le laser est divisé en deux : La première partie traverse une cellule  
899 de référence, contenant un gaz de concentration connue. La seconde partie traverse une  
900 cellule de mesure, contenant le gaz à mesurer. Les deux parties du laser débouchent  
901 finalement sur les détecteurs. Le spectre d'absorption est divisé par le spectre de réfé-  
902 rence, ce qui permet conserver uniquement le signal lié à l'absorption moléculaire. Ce  
903 spectre est ensuite comparé à un spectre simulé afin de déterminer les concentrations en  
904 gaz. Le fonctionnement détaillé du SPIRIT-sol est décrit dans [Guimbaud \*et al.\* \(2011\)](#).

### 905 2.3.3 Le calcul des flux

906 Que ce soit pour le CO<sub>2</sub> ou le CH<sub>4</sub>, le flux de gaz est calculé à l'aide de l'équation  
907 suivante :

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

908 Avec :

909 F : le flux en µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

- 910 X : la concentration en gaz mesuré en  $\mu\text{mol mol}^{-1}$   
911 P : la pression atmosphérique en  $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$   
912 R : la constante des gaz parfait en  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$   
913 T : la température dans la chambre en K  
914 V : le volume de la chambre en  $\text{m}^3$   
915 S : la surface occupée par l'embase en  $\text{m}^2$

## 916 2.4 Facteurs contrôlants

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

### 922 2.4.1 acquisitions automatisées

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

### **2.4.2 acquisitions manuelles**

<sup>933</sup> Les variables acquises manuellement, spécifiques à chaque expérimentation, seront

<sup>935</sup> détaillées dans leurs chapitres respectifs

### <sup>936</sup> 3 Bilan de C de la tourbière de La Guette

<sup>937</sup>

|                |   |               |
|----------------|---|---------------|
| <sup>938</sup> | <b>3.1 Introduction</b>   | <sup>56</sup> |
| <sup>939</sup> | <b>3.2 Procédure expérimentale et analytique</b>                                      | <sup>57</sup> |
| <sup>940</sup> | 3.2.1 Méthodes de mesures   | <sup>57</sup> |
| <sup>941</sup> | 3.2.2 Modélisation du bilan de C  | <sup>59</sup> |
| <sup>942</sup> | 3.2.3 Estimation de l'erreur associée aux flux et aux bilans                          | <sup>63</sup> |
| <sup>943</sup> | <b>3.3 Résultats</b>  | <sup>64</sup> |
| <sup>944</sup> | 3.3.1 Cinétique des facteurs contrôlant et des flux sur la tourbière<br>de La Guette  | <sup>64</sup> |
| <sup>945</sup> | 3.3.2 Sélection des modèles   | <sup>72</sup> |
| <sup>946</sup> | 3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle<br>de l'écosystème | <sup>80</sup> |
| <sup>947</sup> | 3.3.4 Variabilité spatiale du bilan   | <sup>83</sup> |
| <sup>948</sup> | <b>3.4 Discussion</b>   | <sup>88</sup> |
| <sup>949</sup> | 3.4.1 Estimations des flux  | <sup>88</sup> |
| <sup>950</sup> | 3.4.2 Estimations du bilan net de l'écosystème  | <sup>91</sup> |
| <sup>951</sup> | 3.4.3 Sensibilité et limitations du bilan   | <sup>92</sup> |
| <sup>952</sup> | 3.4.4 Bilan de CO <sub>2</sub> et végétation  | <sup>93</sup> |
| <sup>953</sup> | 3.4.5 Variabilité du recouvrement végétal   | <sup>93</sup> |
| <sup>954</sup> | 3.4.6 Représentativité locale du modèle   | <sup>94</sup> |
| <sup>955</sup> | 3.4.7 perspectives  | <sup>94</sup> |
| <sup>956</sup> |   |               |
| <sup>957</sup> |   |               |
| <sup>958</sup> |   |               |
| <sup>959</sup> |   |               |
| <sup>960</sup> |   |               |

## 961 3.1 Introduction

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



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

## 984 3.2 Procédure expérimentale et analytique

### 985 3.2.1 Méthodes de mesures

#### 986 Mesures de flux de gaz

987 Les mesures des flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> ont été effectuées en utilisant la méthode  
 988 décrite dans la partie 2.3. En juin 2011, 20 placettes ont été installées<sup>1</sup> selon un échan-  
 989 tillonnage aléatoire stratifié : La surface de la tourbière a été divisée selon une grille de  
 990 20 mailles et un point choisi aléatoirement dans chaque maille localise chaque placette.  
 991 La taille de la maille a été ajustée de manière à avoir vingt 20 carrés sur la surface de  
 992 la tourbière. Cette méthode permet de conserver un échantillonnage aléatoire tout en

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

### 3.2. Procédure expérimentale et analytique

---

993 étant assuré d'avoir une représentativité spatiale du site homogène. Les placettes, déli-  
994 mitées par des piquets, occupaient une surface de 4 m<sup>2</sup> (2×2 m), à l'intérieur de laquelle  
995 ont été installé de façon permanente un piézomètre et une embase permettant la mesure  
996 des flux de gaz (Les embases sont décrites dans le chapitre 2, partie 2.3.1). Usuelle-  
997 ment les placettes sont séparées en groupes micro-topographiques (Figure 1.3), avec des  
998 embases positionnées sur les buttes (*hummock*), les trous (*hollows*) et les zones d'eau  
999 libre (*pool*) (Alm *et al.*, 1997; Waddington et Roulet, 2000). Ou encore selon différent  
1000 traitements, réhabilité/non réhabilité, exploité/non exploité, manipulé/non manipulé  
1001 (Bortoluzzi *et al.*, 2006; Strack et Zuback, 2013). Ceci a l'avantage de permettre une  
1002 distinction fine des capacités sources/puits mais a l'inconvénient du placement proche  
1003 des embases les unes des autres limitant la représentativité spatiale des mesures. Elles  
1004 peuvent également être séparées en zone dans la tourbière, haut-marais *versus* bas-  
1005 marais, ou réhabilité *versus* non-réhabilité. Afin de gagner en représentativité spatiale,  
1006 la taille du site le permettant, il a donc été décidé de positionner des placettes sur  
1007 l'ensemble du site.

1008 Les flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> sont mesurés. Des tests effectués sur la tourbière ayant  
1009 montré des émissions nulles de N<sub>2</sub>O, ce gaz n'a pas été étudié. Les mesures de CO<sub>2</sub>  
1010 ont été effectuées de mars 2013 à février 2015, avec une fréquence quasiment mensuelle  
1011 (20 campagnes, pour 24 mois de mesures). Les mesures de CH<sub>4</sub> ont été effectuées avec  
1012 une fréquence et sur un nombre d'embases inférieur (12 campagnes, 5 embases). Ceci  
1013 a été déterminé par la difficulté de déploiement *in-situ* de l'instrument SPIRIT. Il est  
1014 lourd, difficilement transportable dans un milieu tourbeux et nécessite entre chaque  
1015 déplacement un temps de mise en marche/arrêt important : plus de 30 min.

1016 Les facteurs contrôlant mesurés manuellement sont la pression atmosphérique, le  
1017 rayonnement photosynthétique actif (*photosynthetically active radiation*, PAR), les tem-  
1018 pératures du sol à différentes profondeurs, la végétation (pourcentage de recouvrement),  
1019 le niveau de la nappe d'eau. Des prélèvements d'eau ont été effectués chaque mois pour  
1020 mesurer le pH et la conductivité (mesures effectuées sur le terrain après les mesures de  
1021 flux). Les échantillons ont été congelés pour la mesure ultérieure de la concentration

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

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

Avec :

—  $\sum R_{max}$  La somme des recouvrements maximum par strates.

L'ensemble de ces mesures nécessitant d'accéder aux placettes régulièrement, des planches de bois ont été utilisées comme pontons mobiles pour limiter les perturbations. La dispersion des placettes sur l'ensemble du site a rendu impossible une installation plus permanente.

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

### 3.2.2 Modélisation du bilan de C

#### Estimation du bilan et variabilité temporelle

Pour estimer le bilan de carbone du site il est nécessaire d'établir des modèles reliant des flux mesurés ponctuellement avec des variables explicatives mesurées à haute fréquence (e.g. relation entre la respiration de l'écosystème et la température de l'air). Ces relations empiriques permettront d'interpoler les données acquises mensuellement sur l'ensemble des deux années de mesure et de reconstituer ainsi une chronique de flux dont l'intégration dans le temps permettra d'estimer une quantité sur l'année. Pour établir ces modèles empiriques les données acquises ont été moyennées par campagne

### 3.2. Procédure expérimentale et analytique

---

1047 de mesure. Ceci permettant, dans un premier temps, de s'affranchir de la variabilité  
1048 spatiale des flux pour se concentrer sur la variabilité temporelle. Les relations entre  
1049 flux et facteurs contrôlant ont ensuite été étudiées deux à deux.

1050 La RE, et l'ENE sont mesurés directement sur le terrain. Cependant afin d'établir  
1051 le bilan de C tout en gardant une discrimination entre flux d'entrée et de sortie la RE et  
1052 la PPB (obtenue grâce à l'équation  $PPB = ENE - RE$ ) ont été modélisé séparément.  
1053 Les flux en phase gazeuse ont été modélisés en partant d'équations usuellement utilisées  
1054 et dans lesquelles la température est le facteur contrôlant majeur. Puis les résidus<sup>2</sup> de  
1055 ces modèles de base ont ensuite été étudiés en fonction des facteurs de contrôle restant.  
1056 Dans le cas où une tendance est visible, le facteur est intégré.

1057 Les modèles ont été comparés avec différents indicateurs : Le coefficient de dé-  
1058 terminaison ( $R^2$ ), l'erreur standard normalisée (*Normalised Root Mean Square Error*,  
1059 NRMSE) et le critère d'information d'Akaike (*Akaike Information Criterion*, AIC). Le  
1060  $R^2$  est utilisé comme indicateur de la proportion de la variabilité des données expliquée  
1061 par le modèle, sa valeur est comprise entre 0 et 1. La RMSE et sa normalisation par la  
1062 moyenne NRMSE sont utilisés comme indicateur de l'écart entre les données mesurées  
1063 et les données modélisées. L'AIC permet de déterminer la pertinence de l'ajout d'un  
1064 paramètre sur la représentation des données par le modèle.

1065 La température a été choisie comme base de départ à la construction des modèles  
1066 de RE et PPBsat, à la fois car c'est le facteur de contrôle le plus souvent invoqué et à  
1067 la fois car les corrélations avec les flux étaient les plus forte. Concernant la respiration  
1068 de l'écosystème, les températures utilisées dans la littérature sont variables. La tem-  
1069 pérature la plus utilisée est la température du sol à -5 cm (Ballantyne *et al.*, 2014).  
1070 La température de l'air et la température du sol à -10 cm sont aussi régulièrement  
1071 utilisées (Bortoluzzi *et al.*, 2006; Kim et Verma, 1992). Cette profondeur, -5 cm, est  
1072 régulièrement utilisée car c'est dans la tourbe, proche de la surface que la respiration  
1073 du sol est la plus importante. (**Réf needed**) C'est également à des profondeurs rela-  
1074 tivement faibles que se situent la majorité des racines (**Réf needed**). La respiration

---

2. Valeurs moyennes - Valeurs moyennes estimées

liée aux racines (autotrophe et hétérotrophe stimulée par les exsudats racinaires) peut contribuer à la respiration de l'écosystème pour 35 à 60 % (Silvola *et al.*, 1996; Crow et Wieder, 2005). La RE est estimée directement à partir des données acquises moyennées en partant de la température connue pour contrôler une grande partie de ce flux. Les modèles les plus fréquemment utilisés (linéaire, exponentiel, arrhénius) ont été testés.

Pas de consensus émerge de la littérature quant aux facteurs contrôlant les émissions de CH<sub>4</sub>. La température, (Alm *et al.*, 1999; Bubier *et al.*, 1995), le niveau de la nappe (Bubier *et al.*, 1993) et/ou la végétation (Bortoluzzi *et al.*, 2006) peuvent être utilisés isolément ou conjointement.

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

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

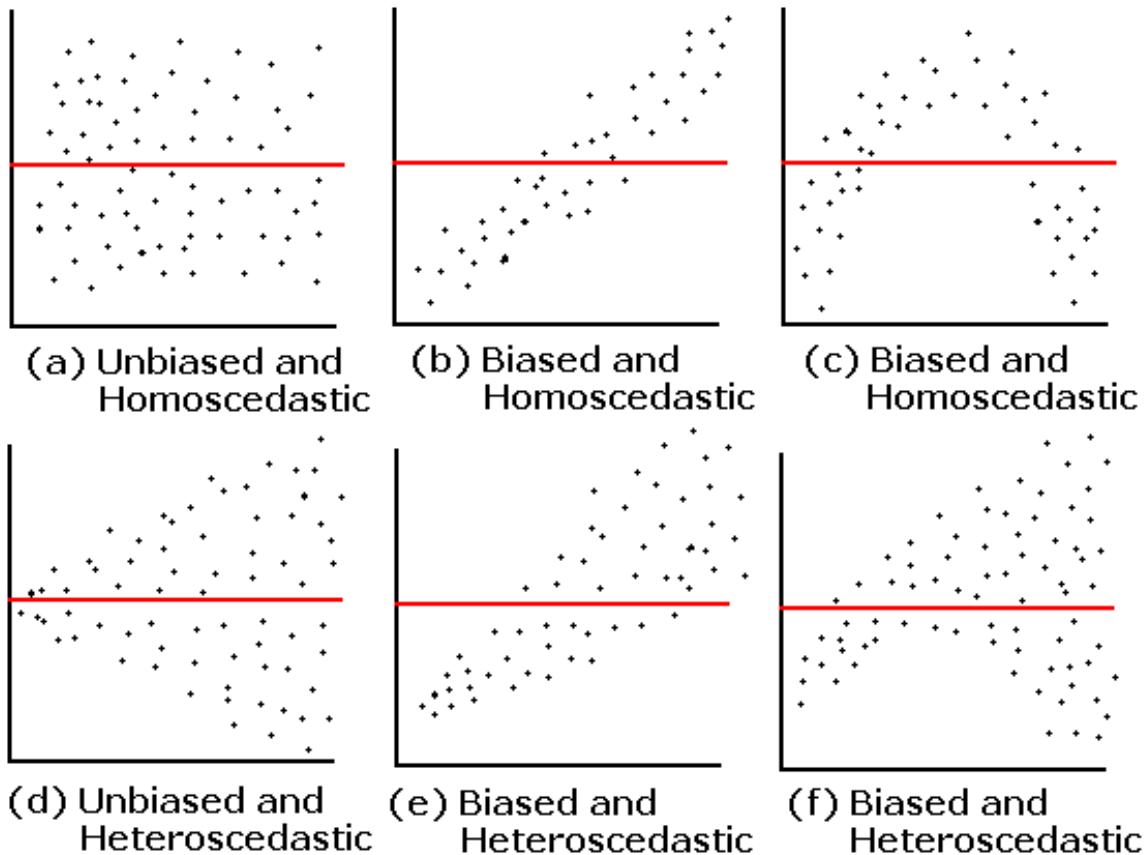


FIGURE 3.2 – Cas idéaux de distribution des résidus (source ?)

<sup>1104</sup> sont par la suite exprimés en  $\text{gC m}^{-2}$  par période de temps (souvent l'année).

### <sup>1105</sup> Étude de la variabilité spatiale

<sup>1106</sup> Deux approches ont été testées afin de caractériser la variabilité spatiale des flux et  
<sup>1107</sup> du bilan. La première consiste à calibrer par placette les modèles sélectionnés lors de la  
<sup>1108</sup> modélisation à l'échelle de l'écosystème. Cette opération permet ainsi calculer des flux  
<sup>1109</sup> par placette et éventuellement un bilan. L'inconvénient de cette méthode étant le faible  
<sup>1110</sup> nombre de points permettant la calibration des modèles conduisant éventuellement à  
<sup>1111</sup> une forte erreur sur l'estimation des paramètres voire à la non convergence des modèles.  
<sup>1112</sup> La seconde approche permet de palier en partie à ce souci en calibrant les modèles à  
<sup>1113</sup> partir de groupes de placettes. Ces ensembles de placette ont été fait en regroupant  
<sup>1114</sup> les placettes ayant la composition végétale la plus proche. Ce choix se justifie par  
<sup>1115</sup> le fait que la végétation joue un rôle important tout en étant délicate à prendre en  
<sup>1116</sup> compte. La température, plus facile à mesurer et le niveau de la nappe, qui n'a que

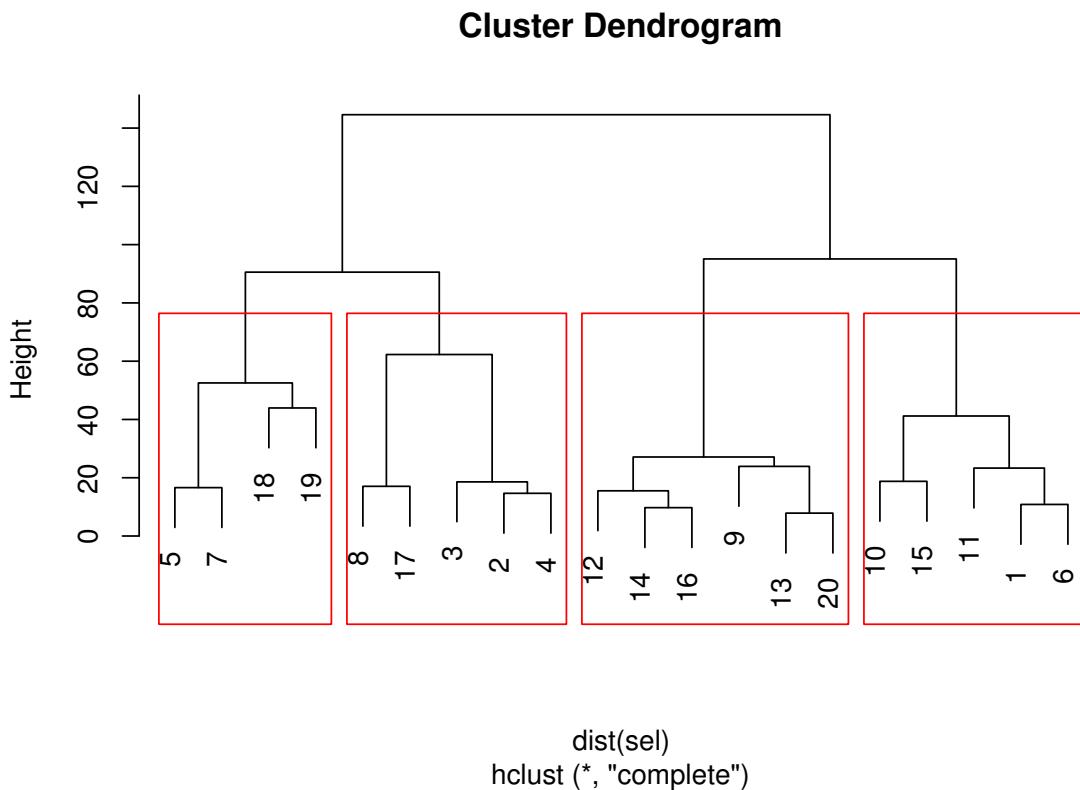


FIGURE 3.3 – Partitionnement des placettes en fonction de leur similarité en termes de composition végétale (pourcentage des strates muscinales, herbacées et arbustives)

peu varié, semblait des choix moins pertinent. Le partitionnement à été faite via une 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).

### 3.2.3 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

### 3.3. Résultats

---

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
- $\chi_{flux}$  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  $-10\text{ cm}$  avec  $-9,2 \pm 7,6$  et  $-7,1 \pm 4,8\text{ cm}$  respectivement pour 2013 et 2014. Ces observations sont cohérentes avec les mesures haute fréquence (Figure 2.5), et confirment l'étiage particulièrement haut de ces 2 années vis-à-vis des précédentes.

La température de l'air mesurée manuellement montre une variabilité saisonnière

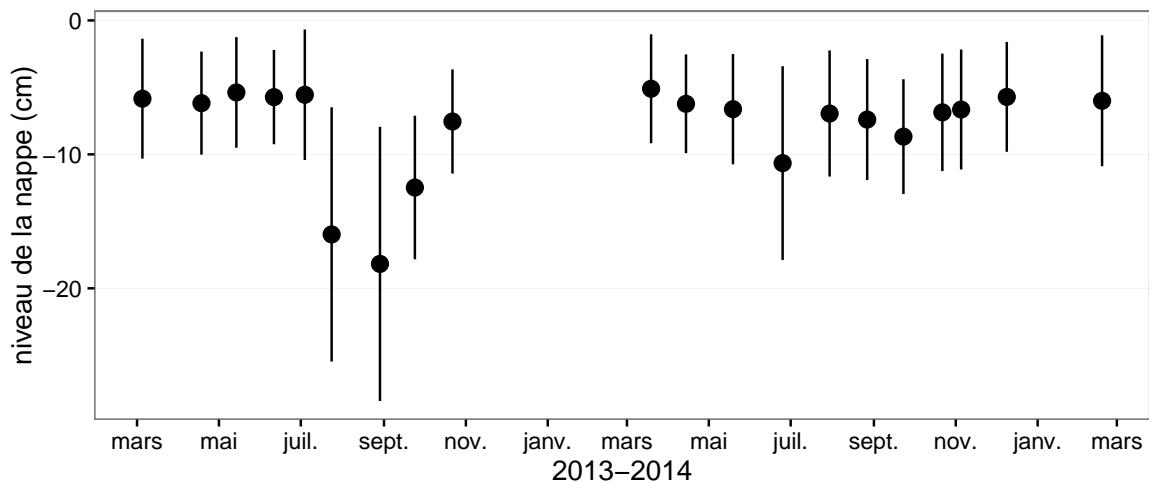


FIGURE 3.4 – Évolution du niveau de la nappe moyen des 20 embases mesuré pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

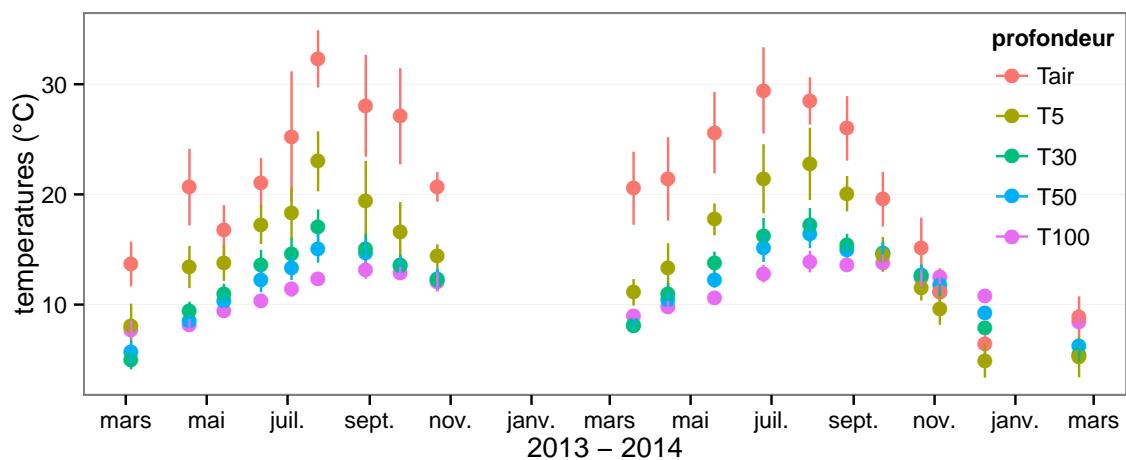


FIGURE 3.5 – Évolution des températures de l'air (Tair) et du sol à -5, -30, -50 et -100 cm (T5, T30, T50 et T100 respectivement) moyenne mesurée lors des campagnes de terrain de mars 2013 à février 2015

### 3.3. Résultats

---

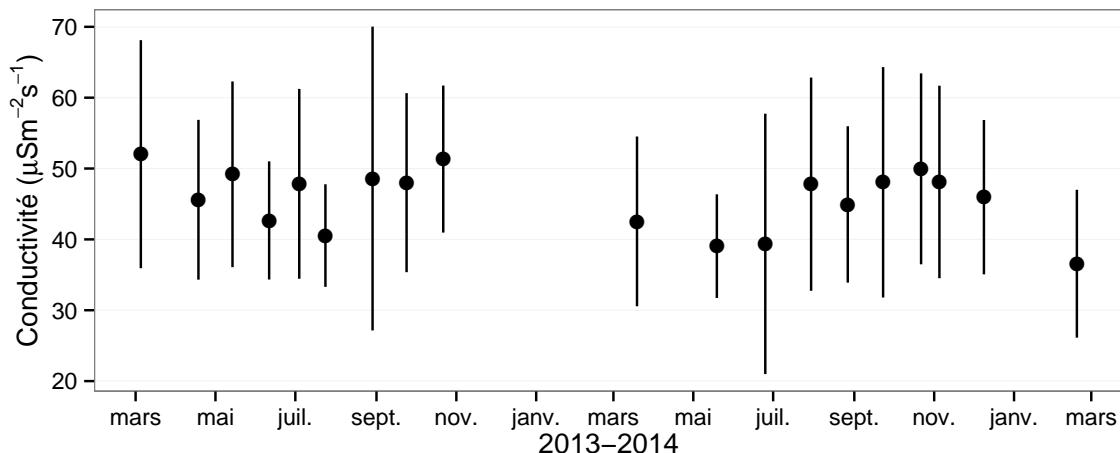


FIGURE 3.6 – Évolution de la conductivité pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

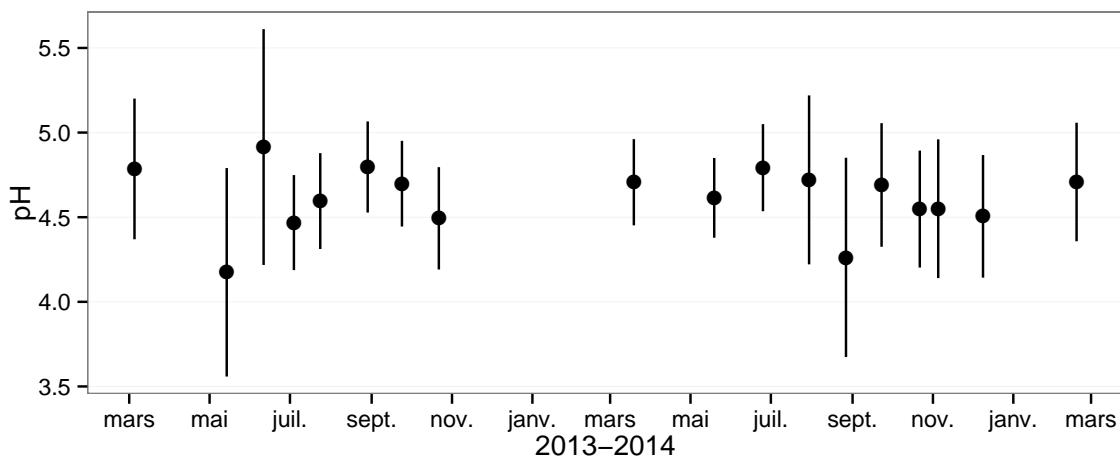


FIGURE 3.7 – Évolution du pH pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

1150 cohérente avec celle mesurées par la station météo. La variabilité saisonnière de la  
 1151 température est également visible dans le sol avec cependant un amortissement et une  
 1152 diminution de la variabilité avec la profondeur (figure 3.5)

1153 La conductivité moyenne mesurée sur le site varie entre 35 and 55  $\mu\text{S m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (fi-  
 1154 gure 3.6).

1155 En moyenne le pH mesuré sur la tourbière de La Guette est compris entre 4 et 5  
 1156 (figure 3.7). Ces valeurs sont cohérentes avec la classification en *poor-fen* du site .

1157 La concentration en carbone organique dissout présente dans l'eau de la tourbière  
 1158 est compris en moyenne entre 10 et 30  $\text{mg L}^{-1}$  (figure 3.8).

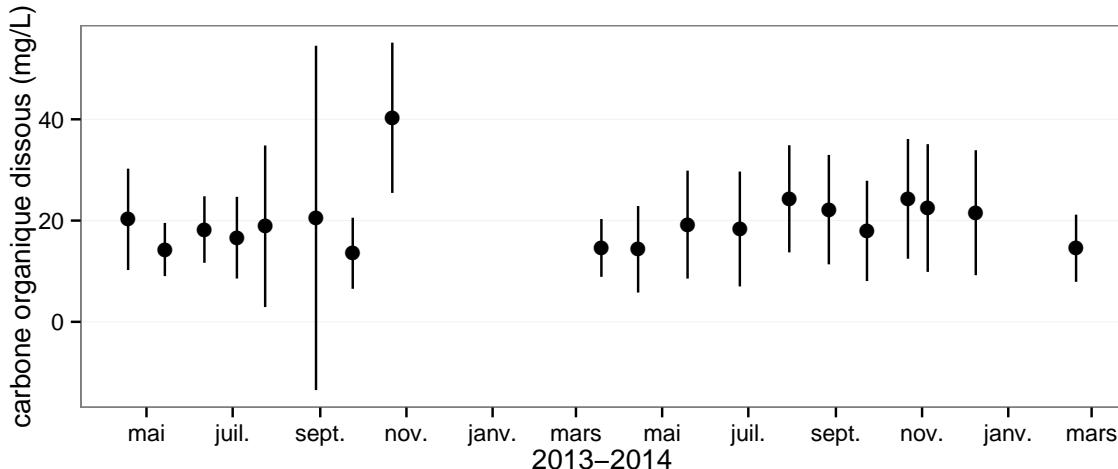


FIGURE 3.8 – Évolution de la concentration en carbone organique dissous dans l'eau du sol pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

### 1159 Les flux de carbone

1160 L'ensemble des mesures de CO<sub>2</sub> s'étendent de mars 2013 à février 2015. Cependant  
 1161 de novembre 2013 à février 2014 les mesures ont été interrompues suite à des problèmes  
 1162 techniques. Les deux saisons de végétation, ont pu être mesurées dans leur ensemble,  
 1163 permettant d'avoir un jeu de données représentatif sur le fonctionnement de l'écosys-  
 1164 tème. À noter également que pour l'ensemble des flux, la déviation standard augmente  
 1165 avec les valeurs mesurées.

1166 En 2013, les valeurs de la PPB (flux de CO<sub>2</sub> entrant dans l'écosystème) augmentent  
 1167 au printemps et une partie de l'été avec un maximum de  $12,80 \pm 4,91 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$   
 1168 atteint fin juillet, avant de diminuer à partir d'août (Figure 3.9a). En 2014 la PPB  
 1169 maximale est atteinte en juin ( $13,16 \pm 4,70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), soit environ un mois plus tôt  
 1170 que l'année précédente. Puis pendant l'été et l'automne les valeurs décroissent jusqu'à  
 1171 être proche de 0. En moyenne les valeurs de la PPB sont de  $7,12 \pm 5,19 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$   
 1172 en 2013 et de  $6,56 \pm 4,72 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en 2014 (Figure 3.9a).

1173 La RE (flux de CO<sub>2</sub> sortant de l'écosystème) en 2013 augmente pendant le prin-  
 1174 temps et une partie de l'été (Figure 3.9b). Elle atteint un maximum de  $9,43 \pm 3,48 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$   
 1175 en juillet avant de diminuer. En 2014 la RE atteint, comme la PPB, son maximum plus  
 1176 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

### 3.3. Résultats

---

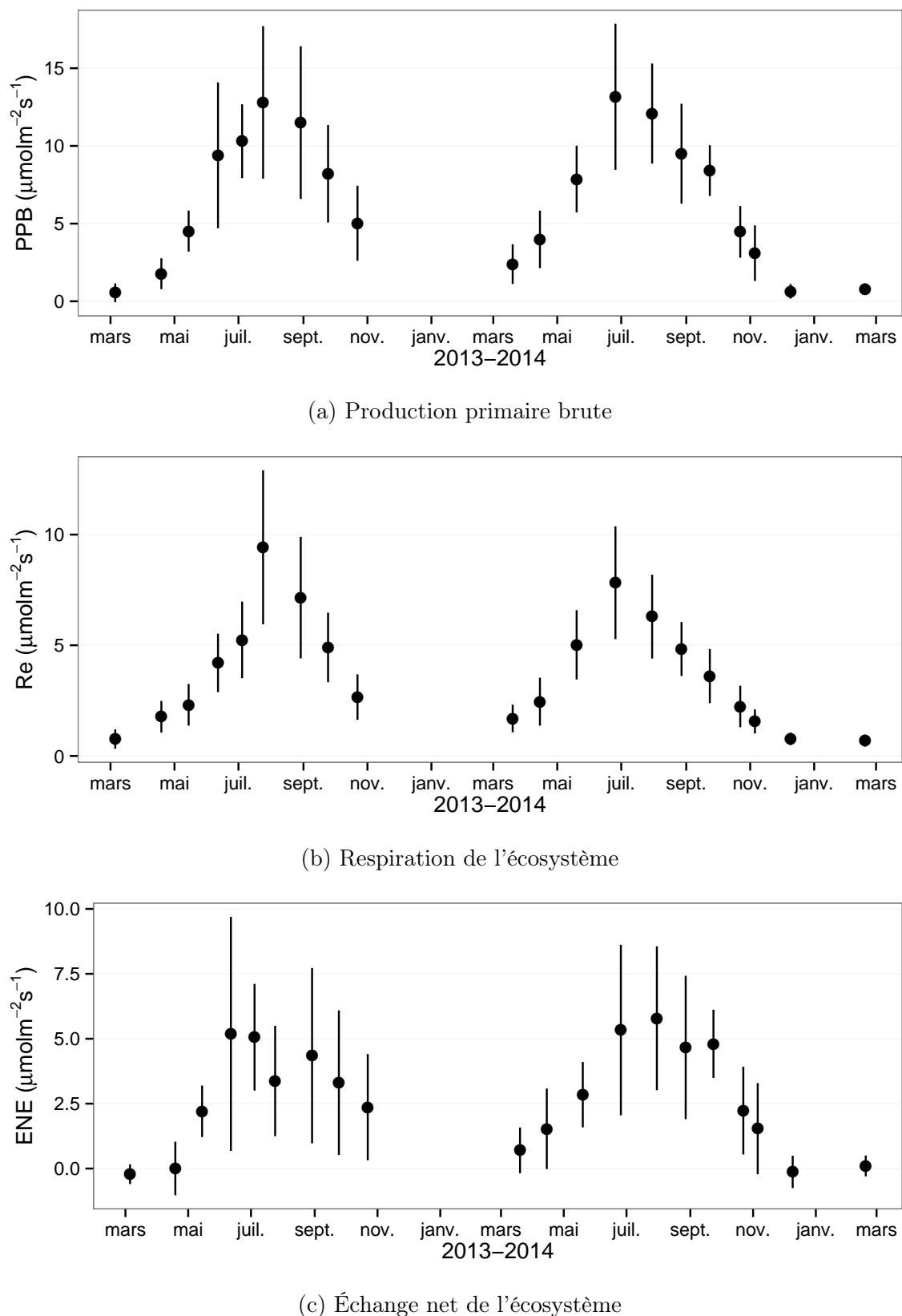


FIGURE 3.9 – Évolution du niveau de PPB, RE et ENE pendant la période de mesure. Moyenne des 20 embases de mars 2013 à février 2015.

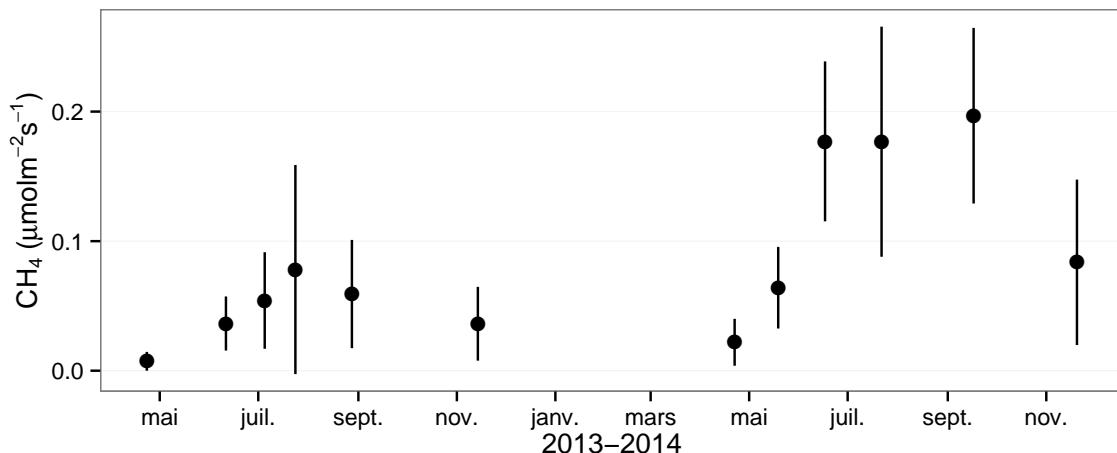


FIGURE 3.10 – Évolution des flux de méthane moyen (N?) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

des valeurs nulles. La moyenne annuelle de RE en 2013 est de  $4,27 \pm 3,16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , ce qui est légèrement supérieure à celle de 2014 :  $3,63 \pm 2,56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Figure 3.9b).

Concernant l'ENE (bilan des flux de CO<sub>2</sub> entrant et sortant), elle augmente en 2013 jusque  $5,19 \pm 4,51 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , avec un maximum en juin, avant de diminuer jusqu'à la fin de l'année. Cependant, cette baisse est moins uniforme que celle des deux flux précédents, avec notamment une augmentation de l'ENE entre juillet et août 2013. Ceci étant, il faut également noter les valeurs importantes de la déviation standard particulièrement en juin et en août. En 2014, l'ENE maximum est atteinte en juillet avec  $5,79 \pm 2,77 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  avant qu'elle ne décroisse. Cette baisse est cependant plus homogène qu'en 2013. les moyennes de l'ENE en 2013 et 2014 sont très proches et sont 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 3.9c).

Les flux de CH<sub>4</sub> comme ceux du CO<sub>2</sub> montrent une variabilité saisonnière importante. Cependant les flux de CH<sub>4</sub> mesurés sont un ordre de grandeur en dessous de ceux mesurés pour le CO<sub>2</sub> (Figure 3.10). À l'inverse de ce dernier, l'importance des flux de CH<sub>4</sub> mesurés en 2013 et 2014 est différente. En 2013 les flux sont moins importants qu'en 2014 avec des maximums de  $0,078$  et  $0,196 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  respectivement.

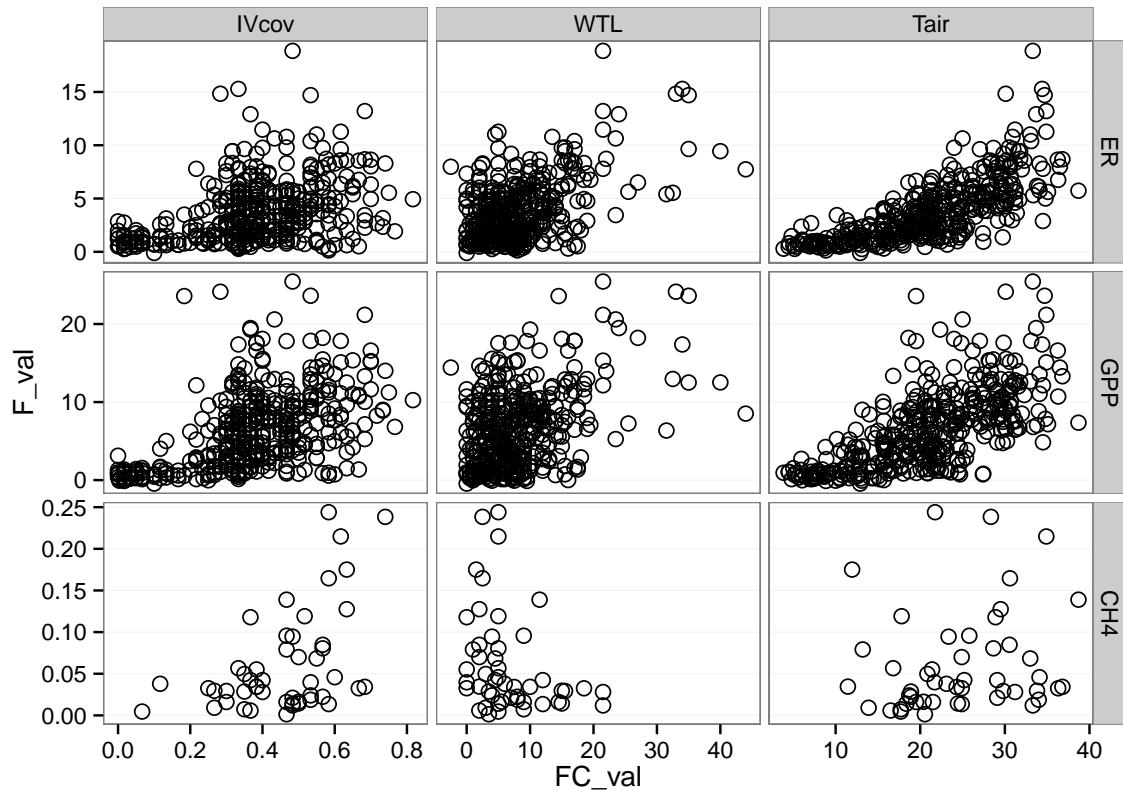


FIGURE 3.11 – Relations entre les flux de gaz et une sélection de facteurs contrôlant

<sub>1193</sub> **Les relations flux gazeux et facteurs contrôlant**

<sub>1194</sub> Comme précisé précédemment, le niveau de la nappe n'a que peu varié pendant les  
<sub>1195</sub> deux années de mesures. De ce fait aucune relation claire ne se distingue entre les flux  
<sub>1196</sub> et le niveau de la nappe que ce soit pour le CO<sub>2</sub> (PPB et RE) ou le CH<sub>4</sub> (Figure 3.11).  
<sub>1197</sub> La PPB et la RE présentent cependant des relations avec la température de l'air,  
<sub>1198</sub> et l'indice de végétation, même si pour ce dernier les tendances sont moins claires,  
<sub>1199</sub> particulièrement pour la RE (Figure 3.11). Le CH<sub>4</sub> quant à lui ne présente pas de  
<sub>1200</sub> relation avec la température de l'air, mais une tendance exponentielle est visible vis-à-  
<sub>1201</sub> vis de l'indice de végétation (Figure 3.11). (**CH<sub>4</sub> et Température dans la tourbe ?**)

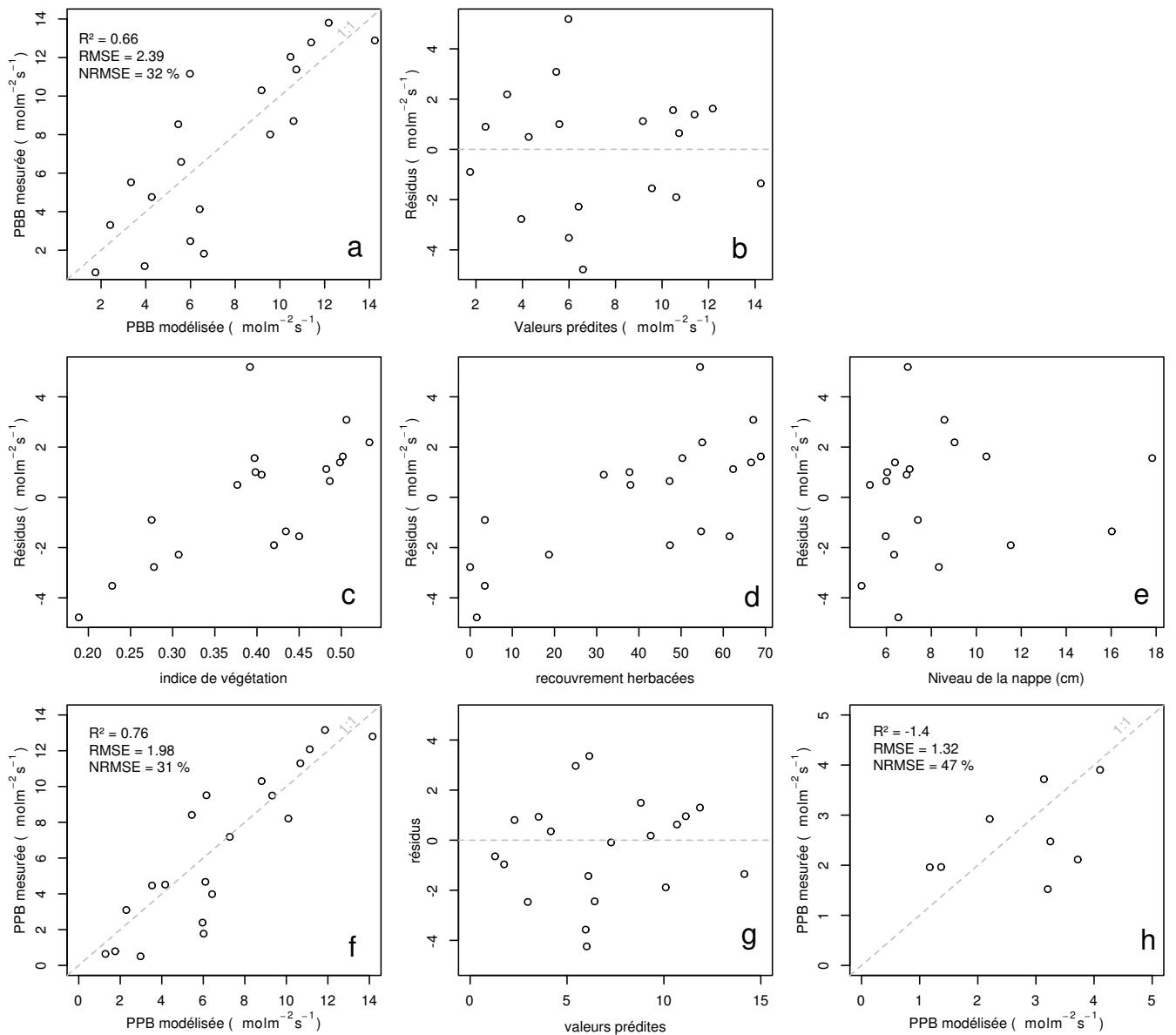


FIGURE 3.12 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.3

**3.3.2 Sélection des modèles****La Production Primaire Brute**

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

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

Avec :

- $a$  la vitesse de transport des électrons photosynthétique à lumière saturante
- $b$  la température optimale pour ce transport
- $c$  la différence de température à laquelle à laquelle PPBsat vaut  $e^{-1}$  de sa valeur à la température optimale

À partir de ce potentiel à lumière saturante, la PPB est estimée en prenant en compte la luminosité. On utilise l'équation 3.4 proposée par (Bubier *et al.*, 1998) et régulièrement et majoritairement utilisée (Bortoluzzi *et al.*, 2006; Worrall *et al.*, 2009) :

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

L'utilisation de l'équation de June seule, avec la température de l'air comme variable explicative de la PPBsat, permet d'expliquer 66 % des variations observées avec une erreur standard de l'estimation de 32 % (Figure 3.12-a). Les résidus de ce modèle se répartissent de façon relativement homogène et non biaisée (Figure 3.12-b). Corrélos avec l'indice de végétation IV, ils présentent une tendance linéaire croissante (Figure 3.12-c). On observe la même tendance avec le recouvrement de la strate herbacée avec une dispersion des points plus importante (Figure 3.12-d). Par contre aucune tendance particulière n'est visible vis-à-vis du niveau de la nappe (Figure 3.12-e) Le recouvrement

des sphaignes (non présenté) ne montre également, aucune tendance avec les résidus de cette équation. La PPB calculée à partir de l'équation 3.3 montre une erreur standard de 31 %, du même ordre de grandeur que celle de PPBsat (Figure 3.12-f) et les résidus se répartissent de façon relativement homogène et non biaisée (Figure 3.12-g). Cependant l'évaluation du modèle sur les données de tests montre une erreur standard de l'estimation plus forte qui atteint 47 % (Figure 3.12-h). Par ailleurs une forte incertitude est présente concernant l'estimation des paramètres qui ont tous une erreur standard importante, parfois plus importante que la valeur du paramètre, et une faible significativité (Tableau 3.1). Afin de prendre en compte la tendance linéaire entre les résidus et l'indice de végétation (IV) le modèle est adapté pour y intégré une fonction linéaire de la végétation :

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

Cette nouvelle équation permet d'expliquer une part plus importante des variations de PPBsat ( $R^2 = 0,85$ ) et augmente la proximité entre les données mesurées et les données modélisées : l'erreur standard diminue à 21 %. (Figure 3.13-a). Les résidus de cette équation semblent répartis de façon moins homogène que précédemment. On observe notamment un resserrement des points autour de zéro à l'exception d'un point de valeur supérieur à 4. Le biais reste malgré tout léger au regard de l'amélioration apportée. Aucune tendance claire ne se dégage des résidus lorsqu'ils sont mis en relation avec des facteurs contrôlant tel que les recouvrements végétaux (sphaignes, herbacées), ou le niveau de la nappe (Figure 3.13-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 para-

### 3.3. Résultats

---

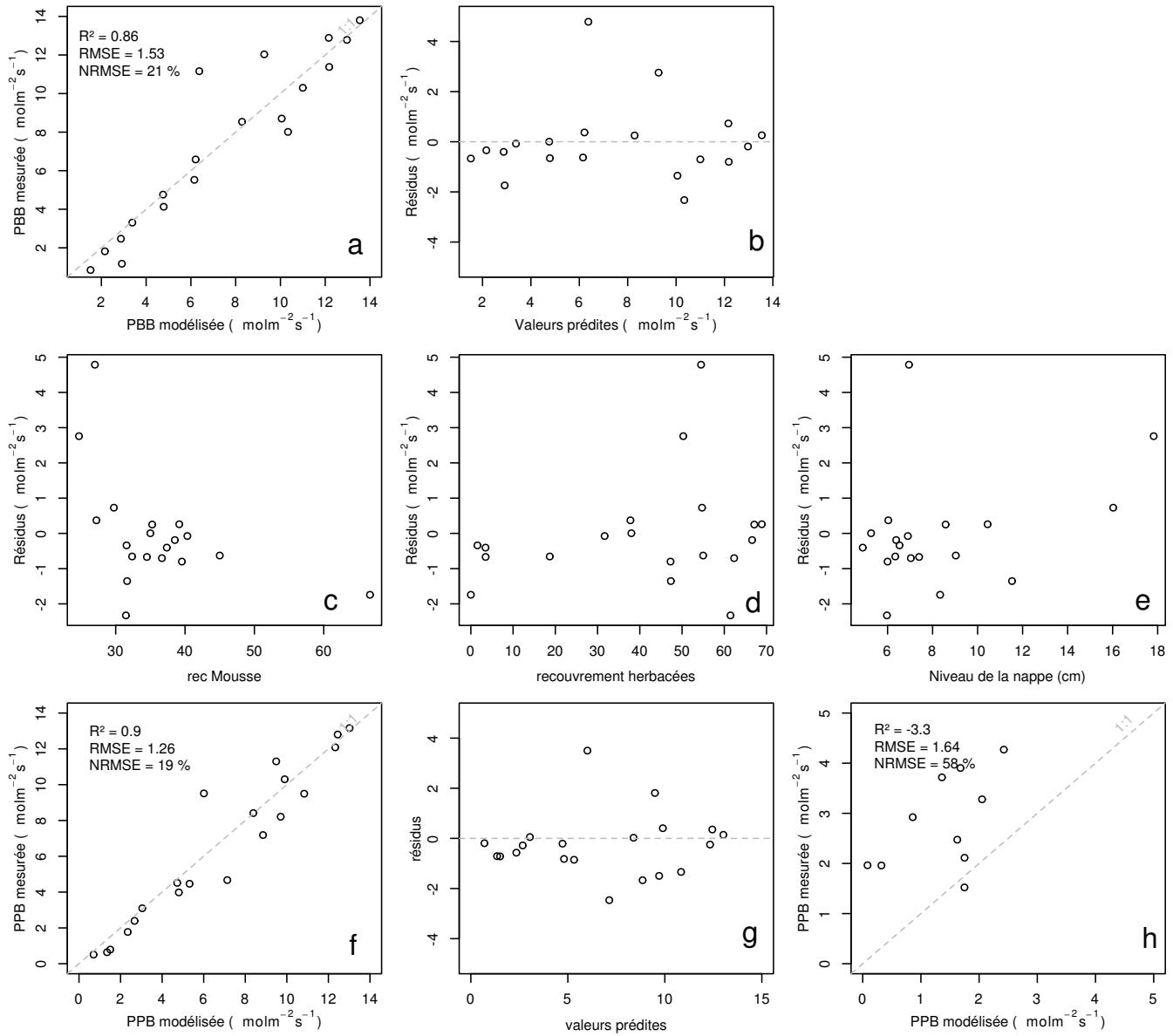


FIGURE 3.13 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.5

1252 mètres de l'équation. Dans la suite du texte le modèle permettant d'estimer la PPB à  
 1253 partir des équations 3.3 et 3.4 sera nommé PPB-1 et celui utilisant les équations 3.5 et  
 1254 3.4 sera nommée PPB-2.

## 1255 La Respiration de l'Écosystème

1256 L'estimation de la RE s'effectue avec l'équation :

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

1257 La température de l'air utilisée dans un modèle exponentiel permet d'expliquer 90 %  
 1258 des variations de la respiration de l'écosystème avec une erreur standard de 18 % (Fi-  
 1259 gure 3.14-a). Les résidus de cette équation semblent répartis de façon non-biaisée, pas  
 1260 de tendance dans le nuage de point (Figure 3.14-b). L'évaluation de ce modèle montre  
 1261 une erreur standard de 35 % avec une tendance à sous-estimer les valeurs mesurées.  
 1262 Une légère tendance, moins claire que pour la PPBsat, est visible entre les résidus et  
 1263 l'indice de végétation ainsi qu'avec le recouvrement de la strate herbacée. Très souvent  
 1264 utilisée, la température à -5 cm donne des résultats proche mais moins bons notam-  
 1265 ment avec une hétéroscédasticité des résidus (**Fig Annexe ? nope : M&M**). On adapte  
 1266 l'équation 3.6 pour intégrer le signal de végétation :

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

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

1267 Les calibrations de ces nouvelles équations sont présentées dans la figure 3.14-a,b et  
 1268 3.14-d,e respectivement. Dans les deux cas, l'erreur diminue pour avoisiner 13 %, avec  
 1269 des résidus qui se répartissent de façon non-biaisée. L'évaluation de ces deux équations  
 1270 montre cependant des différences : D'un côté l'équation 3.7 ne permet pas de diminuer  
 1271 l'erreur standard qui vaut 34 %, et est donc très proche des 35 % calculé pour l'évalua-  
 1272 tion du modèle n'intégrant pas la végétation. De l'autre l'évaluation de l'équation 3.8

### 3.3. Résultats

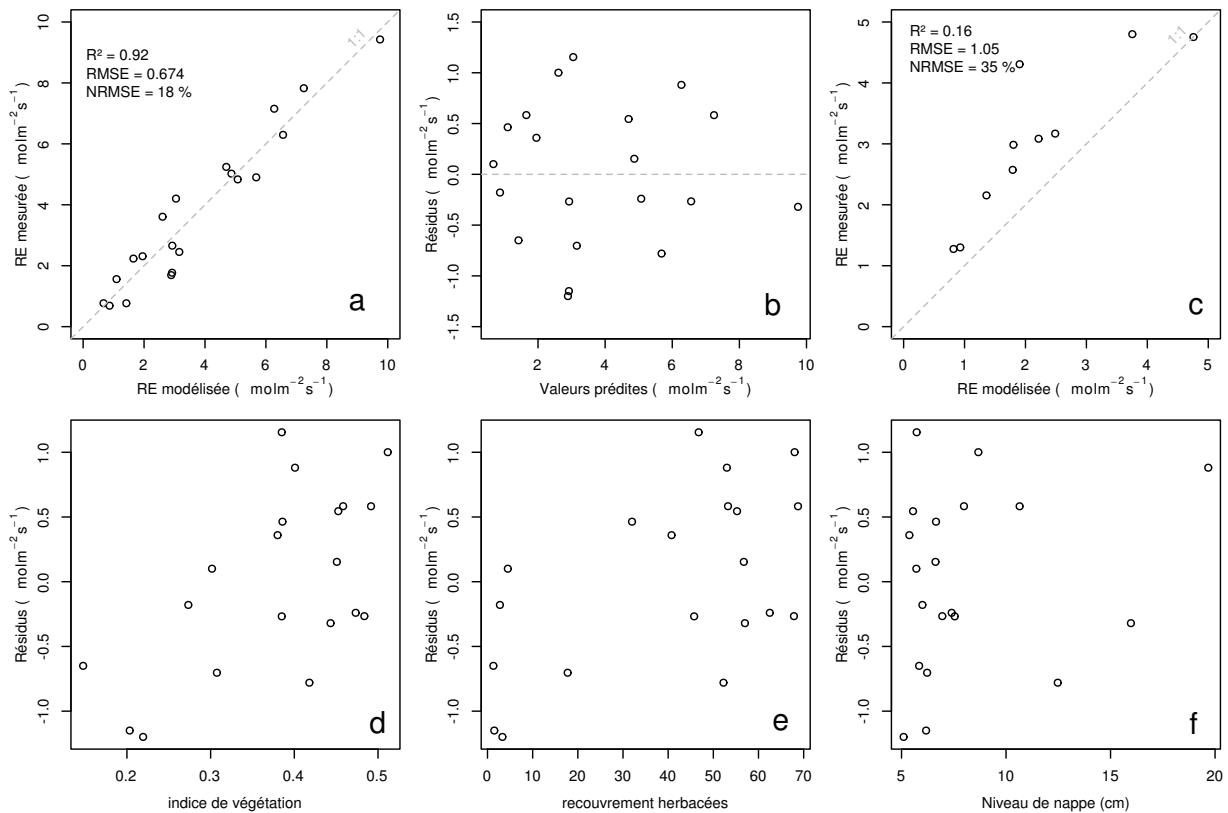


FIGURE 3.14 – RE modèles avec Tair

montre une erreur standard plus faible s'établissant à 23 %. Les paramètres des différentes équations sont présentés dans le tableau 3.1, les modèles RE-1, RE-2, et RE-3 correspondent respectivement aux équations 3.6, 3.7 et 3.8. À l'inverse de la PPB les paramètres des modèles de la RE ont, à l'exception du paramètre c du modèle RE-2, une significativité importante et une erreur standard faible.

### 1278 Le flux de CH<sub>4</sub>

Les relations entre les facteurs contrôlant mesurés et le CH<sub>4</sub> sont moins claires que celles concernant le CO<sub>2</sub>. La corrélation la plus importante est liée à la végétation ( $R^2 = \text{XX}$ , Figure 3.11). Le CH<sub>4</sub> est également corrélé avec les températures, faiblement avec les températures de surface, mais de manière plus importante avec les températures du sol à plus forte profondeur ( $R^2 = \text{XX}$ , Figure 3.11). Enfin il est anti-corrélé ( $R=-0.51$ ) avec le niveau de la nappe. Les relations CH<sub>4</sub> et végétation ont donc pu être modélisées avec

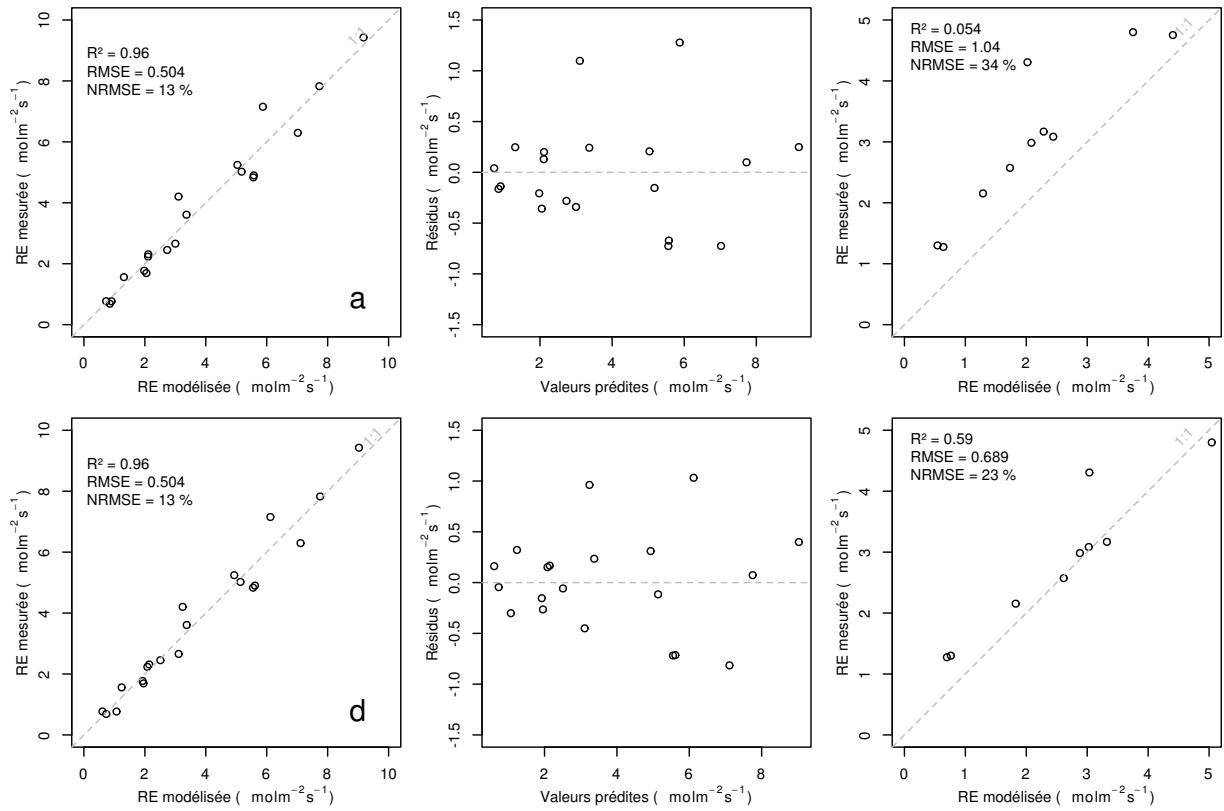


FIGURE 3.15 – RE modèles avec Tair

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

1286       Avec les données acquises, l'indice de végétation est le meilleur prédicteur (Fi-  
 1287       gure 3.16), il explique 78 % de la variabilité du CH<sub>4</sub> avec une erreur standard de 32 %.  
 1288       Aucune tendance ne semble se dégager entre les résidus de cette équation et les facteurs  
 1289       contrôlant mesurés. L'évaluation de cette équation montre une tendance à sous-estimer  
 1290       les flux de CH<sub>4</sub> et une erreur standard qui double par rapport à la phase de calibration  
 1291       en atteignant 68 %. Les détails de l'estimation des paramètres de l'équation 3.9 est  
 1292       visible dans le tableau 3.1 sous le nom FCH4.

### 3.3. Résultats

---

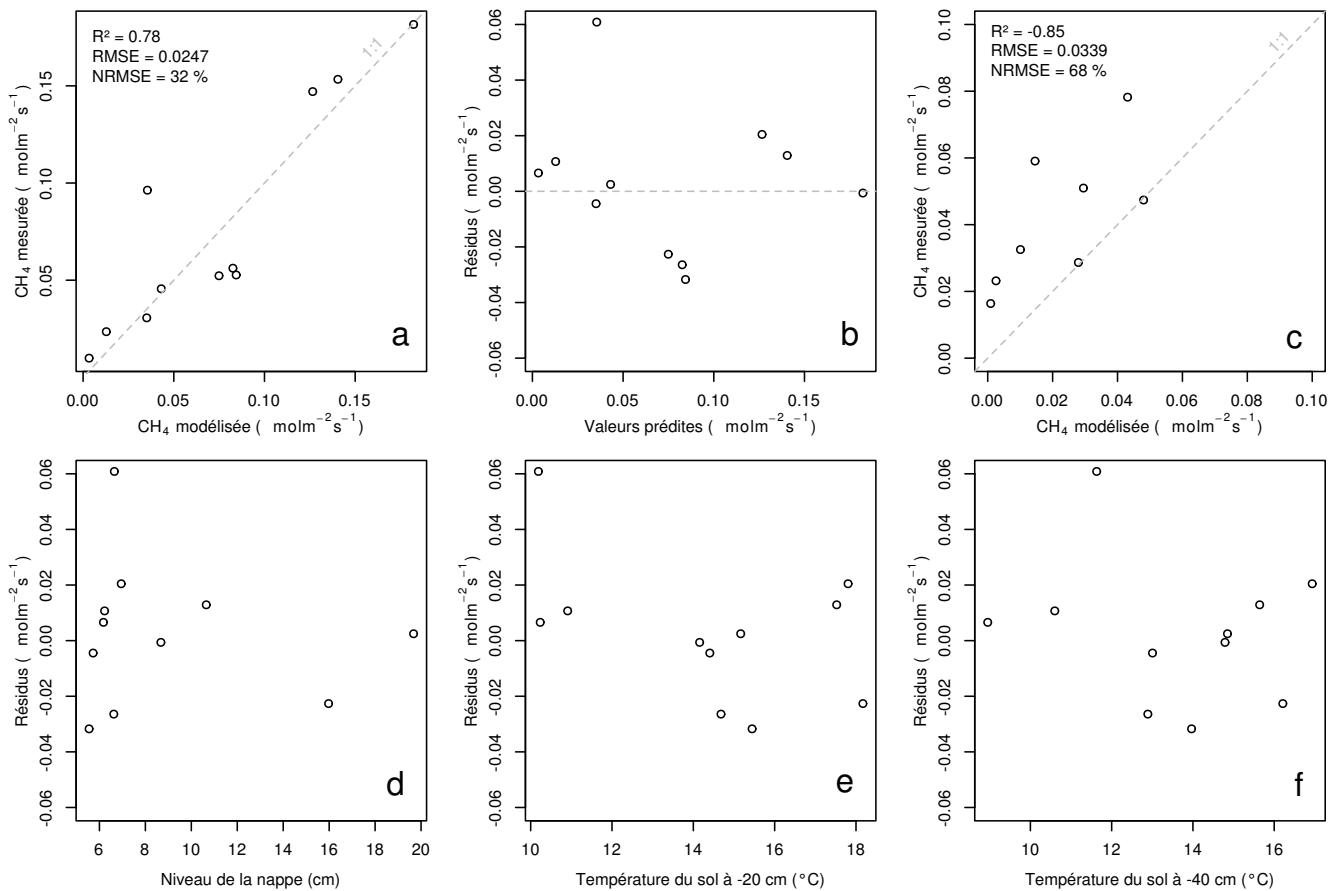


FIGURE 3.16 – CH<sub>4</sub> modèle H

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 |

### 3.3. Résultats

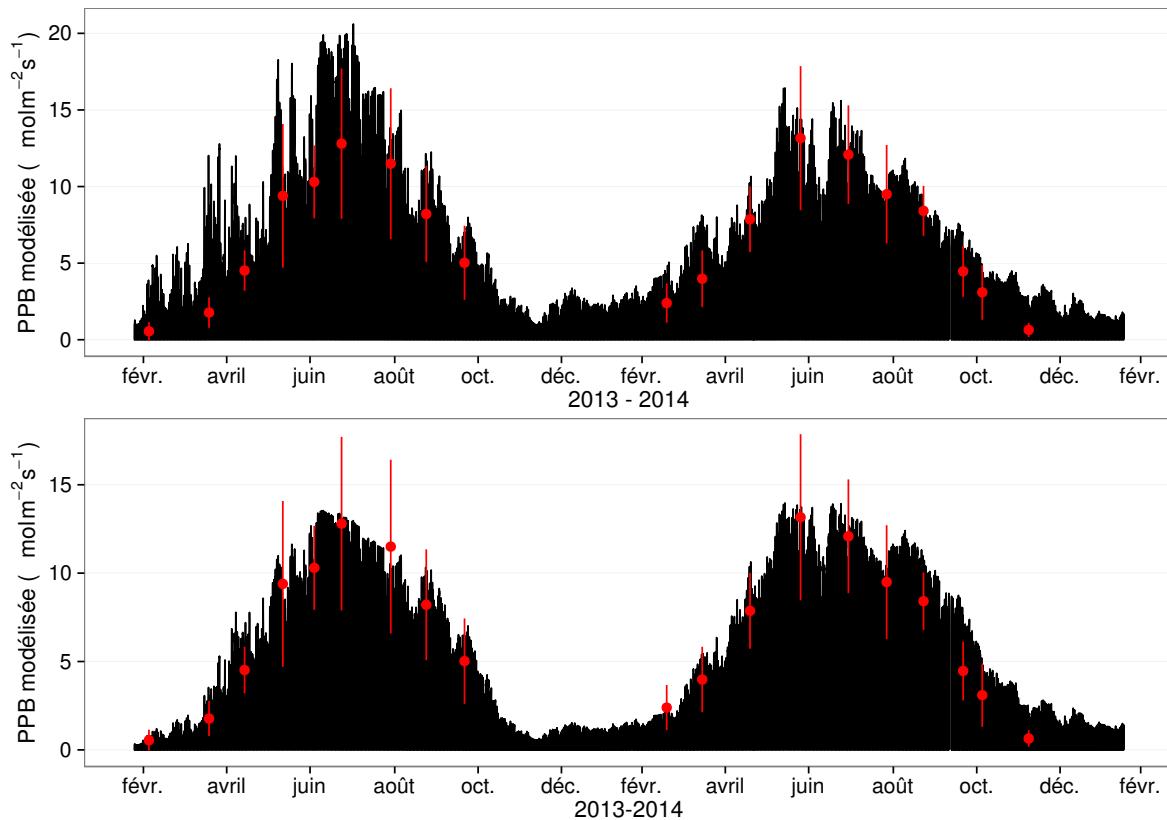


FIGURE 3.17 – Flux de CO<sub>2</sub> interpolé à partir de PPB-1 et PPB-2

#### <sup>1293</sup> Le COD

#### <sup>1294</sup> 3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle <sup>1295</sup> de l'écosystème

<sup>1296</sup> L'interpolation des flux de PPB montrent une variabilité saisonnière proche de  
<sup>1297</sup> celle mesurée sur le terrain (Figure 3.17). Les valeurs mesurées les plus grandes (partie  
<sup>1298</sup> supérieure de la barre rouge sur la figure 3.17) ne semblent pas atteinte par le modèle  
<sup>1299</sup> PPB-2 à l'inverse du modèle PPB-1 (courbes noires sur la figure 3.17). Dans les deux  
<sup>1300</sup> cas les modèles semblent sur-estimer la valeur de PPB mesurées fin 2014.

<sup>1301</sup> Pour la RE, l'interpolation suit également les variations saisonnières mesurées men-  
<sup>1302</sup> suellement (Figure 3.18). Les gammes de valeurs mesurées sont très proche des gammes  
<sup>1303</sup> interpolées : les valeurs interpolées fluctuent dans les limites des barres d'erreurs. L'in-  
<sup>1304</sup> terpolation des flux de la RE est très proche quel que soit le modèle utilisé (Figure 3.18).  
<sup>1305</sup> L'intégration de la végétation dans les modèles RE-2 et RE-3 diminue la RE maximum

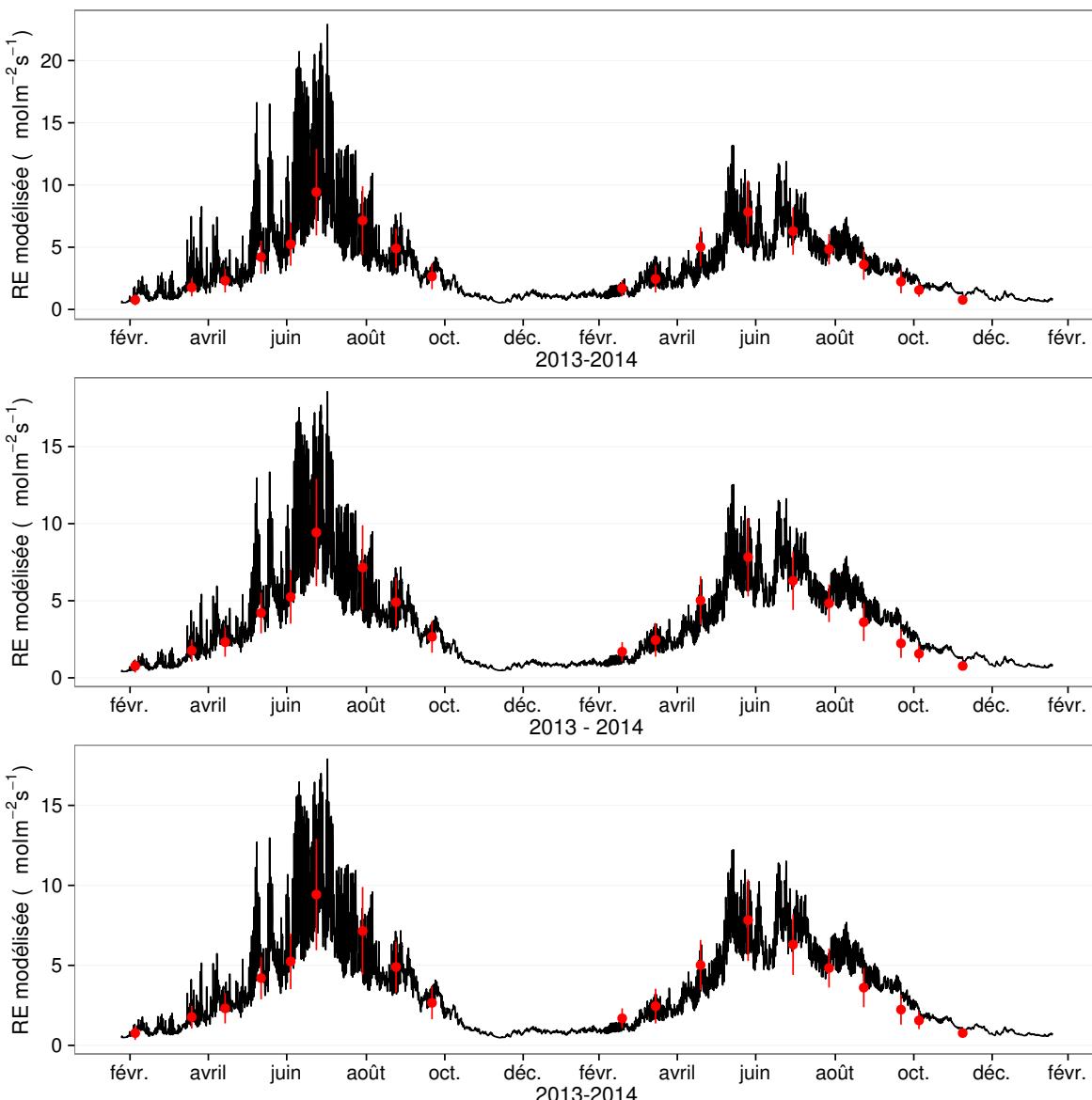


FIGURE 3.18 – Flux de CO<sub>2</sub> interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3

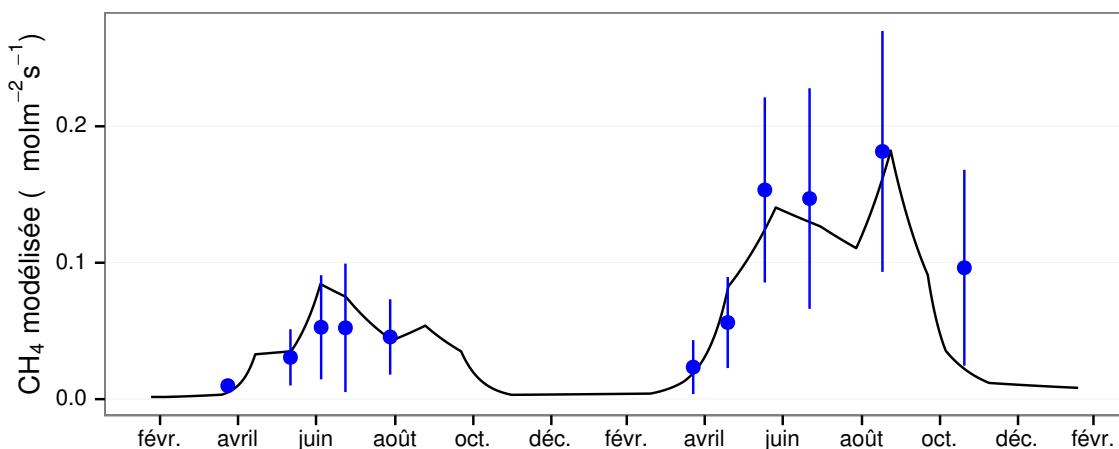


FIGURE 3.19 – Flux de CO<sub>2</sub> interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3

### 3.3. Résultats

---

1306 modélisée en 2013 par rapport au modèle RE-1.

1307 Les flux de CH<sub>4</sub> interpolés (Figure 3.19), suivent également une cyclicité saisonnière.

1308 L'estimation du CH<sub>4</sub> semble rendre compte dans les grandes lignes de la différence de  
1309 flux mesurée entre 2013 et 2014.

1310 Les flux interpolés à l'heure puis sommés par années sont présentés dans le ta-  
1311 bleau 3.2 pour les différents modèles. Sur les deux années, selon le modèle utilisé, le  
1312 flux total entrant via la PPB est estimé à 1070 et 1290 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> pour PPB-2 et  
1313 PPB-1 respectivement. Dans le détail on observe une différence entre les deux modèles :  
1314 Celui utilisant uniquement la température de l'air (PPB-1) présente un stockage plus  
1315 important en 2013 qu'en 2014. Tandis que le modèle prenant en compte la végétation  
1316 (PPB-2) stocke moins de carbone en 2013 qu'en 2014. L'intégration de la végétation  
1317 minimise également l'erreur standard de l'estimation, la divisant approximativement  
1318 par deux.

1319 La différence de comportement, entre les années de mesures, liée à l'intégration de  
1320 la végétation est également visible sur l'estimation de la RE. La prise en compte de la  
1321 végétation (modèles RE-2 et RE-3) conduit à une respiration plus forte en 2014 qu'en  
1322 2013 à l'inverse de RE-1. La différence entre l'estimation de la RE en 2013 et en 2014  
1323 diminue avec l'intégration de la végétation. Elle passe de 102 pour RE-1 à 78 puis  
1324 41 pour RE-2 et RE-3. Malgré ces différences, on observe une grande proximité dans  
1325 les valeurs des flux interpolés sur les 2 années, quel que soit le modèle, avec un écart  
1326 maximum de 25 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>.

1327 Les flux de CH<sub>4</sub> estimés ont une erreur importante et sont beaucoup plus faible que  
1328 les flux de la PPB ou de la RE. Le flux de CH<sub>4</sub> est au moins deux fois plus important  
1329 en 2014 qu'en 2013.

1330 Les bilans issus des différentes combinaisons de modèles (à l'exception de RE-3, non  
1331 présenté car très proche de RE-2) varient de -233 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> à +12 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>  
1332 stocké dans la tourbière (tableau 3.3). L'intégration de la végétation dans la modélisa-  
1333 tion de PPB fait baisser les bilans de carbone dans le négatif (système source) au-delà  
1334 de -200 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>, avec une différence entre les bilans de 220 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> environ.

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

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

<sup>1335</sup> La différence sur les bilans quand les modèles de RE utilisent ou non la végétation est  
<sup>1336</sup> moindre : environ  $26 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$  (tableau 3.3).

### <sup>1337</sup> Évaluation du bilan

<sup>1338</sup> L'analyse de sensibilité, consistant à faire varier chaque paramètre des modèles  
<sup>1339</sup> de  $\pm 10\%$ , les combinaisons de modèles PPB-1, PPB-2, RE-1 et RE-3 ont été testé  
<sup>1340</sup> (Tableau 3.4). Le modèle RE-2, très proche du modèle RE-3 n'a pas été testé. **Attente**  
<sup>1341</sup> **du COD, les valeurs du tableau sont fausse pour le moment**

### <sup>1342</sup> 3.3.4 Variabilité spatiale du bilan

#### <sup>1343</sup> Calibration par groupe de placette

<sup>1344</sup> La classification hiérarchique a permis de distinguer 4 groupes de végétation (Fi-  
<sup>1345</sup> gure 3.3). Dans le groupe Mousse, la strate muscinale est majoritaire avec un recou-  
<sup>1346</sup> vrement moyen de 91 %, moins de 35 et 15 % de recouvrement pour les herbacées et les  
<sup>1347</sup> arbustes respectivement. Le groupe Mix est le plus homogène avec un recouvrement

### 3.3. Résultats

---

Tableau 3.4 – Sensibilité relative (en %) du bilan de CO<sub>2</sub> (ENE) en réponse à une variation de ±10 % de chacun des paramètres des modèles.

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

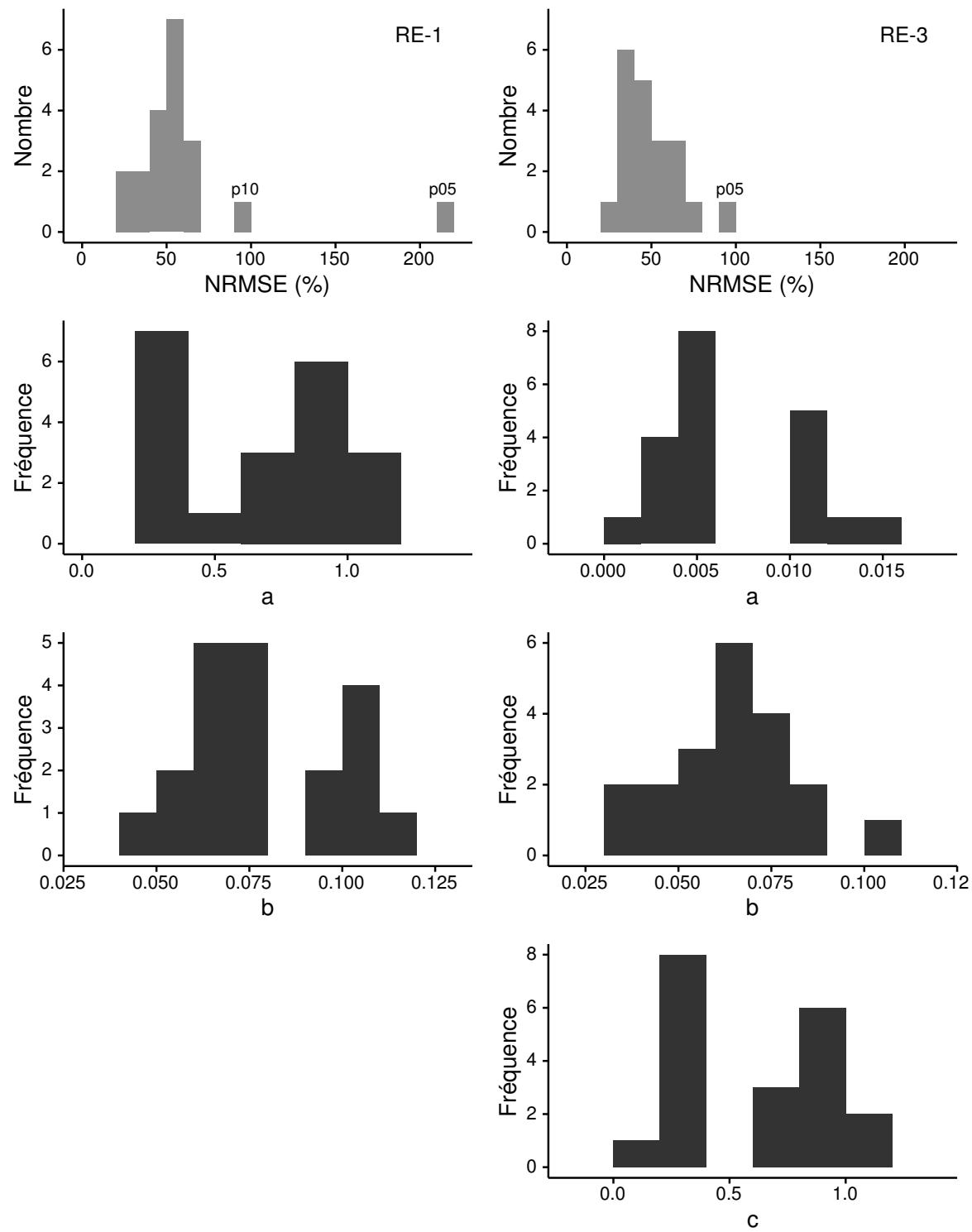


FIGURE 3.20 – Distribution de l'erreur standard (en gris) par placette et des paramètres des modèles RE-1 et RE-3 (en noir)

### 3.3. Résultats

---

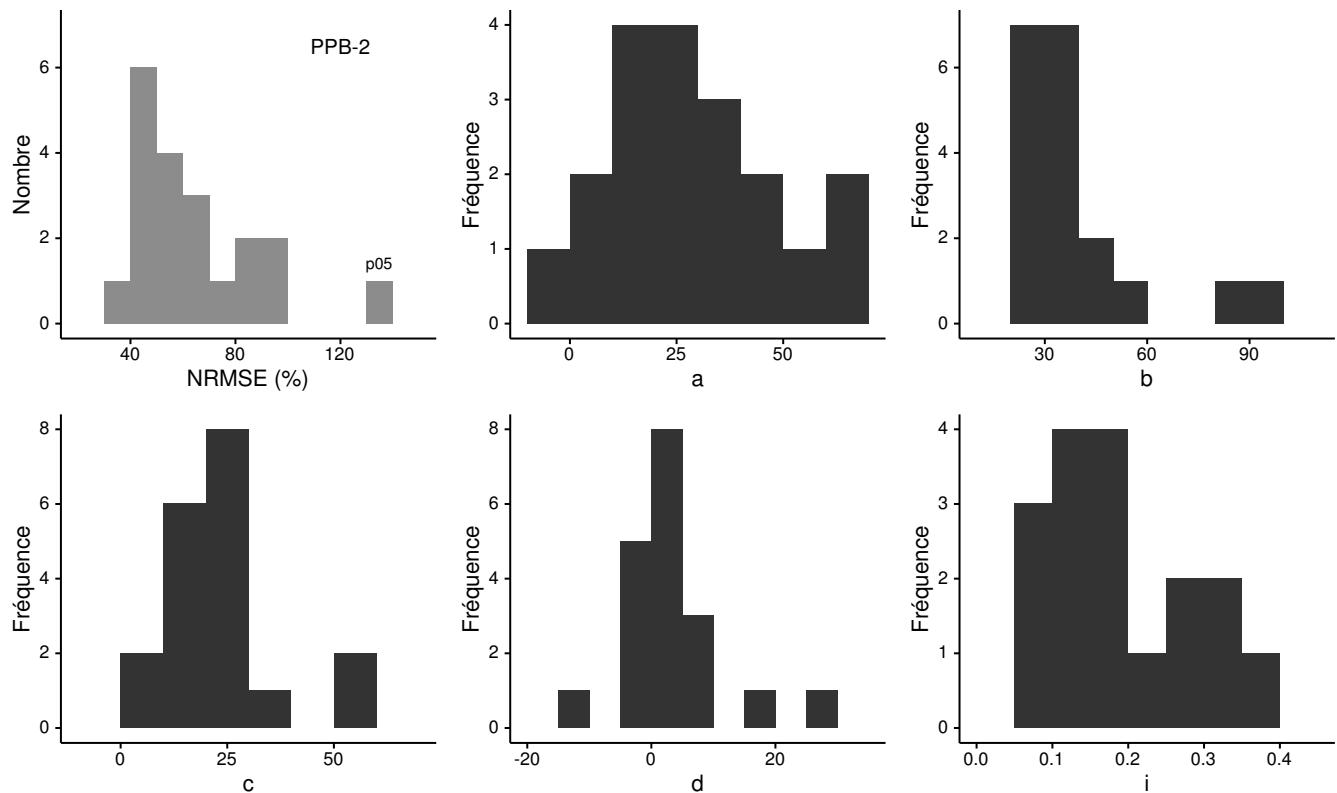


FIGURE 3.21 – Distribution de l’erreur standard par placette (en gris) et des paramètres du modèle PPB-2 (en noir)

1348 moyen des strates muscinale et arbustives de 63 et 58 % chacune. C'est également le  
 1349 groupe où il y a de moins d'herbacées avec un recouvrement de 24 %. La strate herbacée  
 1350 est majoritaire dans le Herbe avec un recouvrement moyen de 63 %, la strate arbus-  
 1351 tive y est peu présente (19 % en moyenne) et la strate muscinale y est pour ainsi dire  
 1352 absente (1 %). La strate muscinale est également absente, ou presque, dans le groupe  
 1353 Arbuste (1 %). Groupe dans lequel la strate arbustive est majoritaire avec de 65 % de  
 1354 recouvrement moyen, et la strate herbacée avec 33 % (Figure 3.22).

1355 Les bilans de CO<sub>2</sub> calculés par groupe de végétations sont présentés dans le ta-  
 1356 bleau 3.5. On constate que du point de vue de l'ENE les groupes Mousse et Mix sont  
 1357 relativement proche, et que le groupe Arbuste est du même ordre de grandeur bien  
 1358 qu'avec une ENE un peu plus élevée. Le groupe Herbe est le seul groupe présentant  
 1359 une ENE positive, du même ordre de grandeur que les précédentes en valeur abso-  
 1360 lue. Dans le détail, la RE est la plus forte, supérieure à 1200 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>, dans les  
 1361 groupes Mix et Arbuste. Elle est plus faible dans les groupes Mousse et Herbe (environ

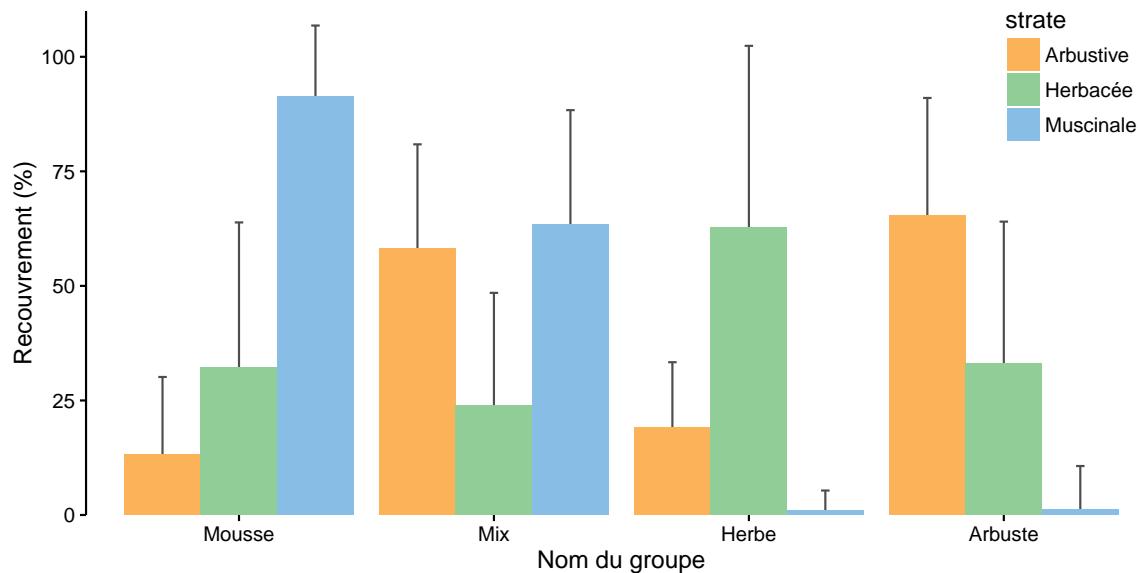


FIGURE 3.22 – Recouvrement végétal moyen par strate (en %) des 4 groupes, les groupes sont nommés en fonction de la végétation majoritaire. Les barres d'erreur représentent la déviation standard.

Tableau 3.5 – Bilan des flux de CO<sub>2</sub> en gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>, en utilisant PPB-2 et RE-3

| groupe  | PPB-2 | RE-3 | ENE  |
|---------|-------|------|------|
| Mousse  | 714   | 1023 | -308 |
| Mix     | 1045  | 1385 | -340 |
| Herbe   | 1323  | 1057 | 266  |
| Arbuste | 1002  | 1262 | -260 |

1362 1000 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>). Pour la PPB, la valeur la plus faible est dans le groupe Mousse et  
 1363 la plus forte dans le groupe Herbe avec plus de 1300 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>, soit une différence  
 1364 de plus de 600 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>. Les groupes Mix et Arbuste sont relativement proches  
 1365 avec des valeurs intermédiaires avoisinant 1000 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>.

### 1366 Calibration par placette

1367 Les modèles RE-1, RE-3 et PPB-2 ont pu être calibré par placette. Pour l'ensemble  
 1368 de ces modèles on constate une forte hausse de la NRMSE (Figure 3.20 et 3.21).  
 1369 Concernant la RE, les modèles RE-1 et RE-3 ont des valeurs de NRMSE relativement  
 1370 proche d'environ 50 %, avec deux outliers pour RE-1 et un pour RE-3 (Figure 3.20). Les  
 1371 paramètres varient dans des gammes similaires pour les deux modèles. Ces gammes sont  
 1372 larges et bien supérieure à 10 %. Concernant la PPB, le modèle PPB-2 a également

1373 une NRMSE importante, variant entre 40 et 100 % avec un outlier. Les valeurs des  
1374 paramètres varient également de façon importante (Figure 3.21).

## 1375 3.4 Discussion

### 1376 3.4.1 Estimations des flux

#### 1377 PPB

1378 L'estimation des flux de PPB, est comprise entre 957 et 1322 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> selon  
1379 l'année et le modèle utilisé. Ces valeurs sont très élevées comparées à des tourbières  
1380 boréales comme celles étudiées par (Trudeau *et al.*, 2014) ou encore (Peichl *et al.*, 2014)  
1381 dont les valeurs de PPB sont respectivement comprise entre 123 et 131 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>  
1382 et entre 203 et 503 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>. Une première hypothèse permettant d'expliquer une  
1383 telle différence, est la différence entre les températures moyennes sur les sites. -4,3 °C  
1384 et 1,2 °C respectivement pour Trudeau *et al.* (2014) et Peichl *et al.* (2014). Ces tem-  
1385 pératures sont bien plus faible pour les sites des études pré-citées que sur la tourbière  
1386 de La Guette. Une seconde hypothèse, qui n'exclue pas la première, est la componi-  
1387 tion végétale de ces sites. La tourbière de La Guette est envahie par une végétation  
1388 vasculaire, notamment herbacée. Elle est, par conséquent, plus proche d'une prairie  
1389 tourbeuse que d'une tourbière boréale. En effet les valeurs observées à La Guette sont  
1390 comparables à ce type d'écosystèmes. Jacobs *et al.* (2007) estiment des valeurs de PPB  
1391 comprises entre 400 et 2000 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> avec une moyenne de 1300 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> dans  
1392 des prairies tourbeuses hollandaises. Sur des écosystèmes similaires, au Danemark,  
1393 (Görres *et al.*, 2014) trouve des valeurs de PPB plus importantes encore, entre 1555 et  
1394 2590 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>, mais avec des niveaux de nappe plus faible (< -30 cm). Il semble  
1395 cohérent que les valeurs de la PPB de la tourbières de La Guette soit plus forte que  
1396 celle mesurées dans des tourbières boréales, et moins importantes que celle mesurées  
1397 dans des tourbières utilisées comme prairie permanente. En effet par sa position géo-

graphique, elle subit un climat moins dur que les tourbières boréales, notamment avec des hivers moins longs et froids. De plus la végétation vasculaire qui l'envahie doit favoriser une PPB plus élevée.

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

Les différences observées selon la façon d'estimer la PPB peuvent paraître importante, néanmoins elles sont du même ordre de grandeur que celle rencontré par [Worrall et al. \(2009\)](#) qui compare différentes façons de modéliser des flux de gaz avec des équations différentes (et non pas juste des variations sur un type de modèle). Ces différences sont également liées à 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 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

### 3.4. Discussion

---

1427 ailleurs l'évaluation du modèle PPB-1 renvoie un erreur plus faible que celle du modèle  
1428 PPB-2.

1429 L'ordre de grandeur des flux semble cohérent pour la PPB. La différence nette  
1430 observée entre les modèles PPB-1 et PPB-2 est probablement liée à une sous-estimation  
1431 des flux par ce dernier.

#### 1432 RE

1433 De la même façon que pour la PPB, les flux de la RE sont important si on les  
1434 compare à des tourbières boréales et s'approchent davantage des flux mesurés dans  
1435 les prairies sur sols tourbeux. La RE sur la tourbière de La Guette, comprise entre  
1436 1232 et 1337 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> est plus importante que celle observée par [Peichl et al.](#)  
1437 ([2014](#)); [Trudeau et al.](#) ([2014](#)) (pour reprendre les études citées précédemment) qui  
1438 s'établissent respectivement entre 137 et 443 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> et 206 et 234 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>.  
1439 Elles sont en revanche plus faible que celle mesurées par ([Jacobs et al., 2007](#)), entre 500  
1440 et 2000 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>, ou par ([Görres et al., 2014](#)) : entre 2070 et 3500 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>.

1441 À l'inverse de la PPB, l'intégration de la végétation pour modéliser la RE n'amé-  
1442 liore que peu l'estimation de la RE lors de la phase de calibration : la différence entre  
1443 les valeurs d'erreur standard est de 5 %. En revanche lors de la phase d'évaluation,  
1444 l'utilisation du recouvrement des herbacées semble améliorer l'estimation de façon plus  
1445 importante avec une différence de 11 % entre les valeurs d'erreur standard. Contraî-  
1446 rement à la PPB la différence apportée par l'intégration de la végétation (RE-2 ou  
1447 RE-3) est du même ordre de grandeur en 2013 et en 2014. Sur les 2 années, l'effet  
1448 de l'intégration de la végétation est limité avec une différence de 25 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> au  
1449 maximum (entre ER-1 et ER-3), soit moins de 2 % du flux. Encore une fois l'intérêt  
1450 de l'évaluation est mis en avant puisqu'il permet de distinguer des modèles très proche  
1451 lors de la calibration.

1452 Les incertitudes sur l'estimation des paramètres RE sont beaucoup moins impor-  
1453 tante que celle de la PPB. L'estimation des paramètres des modèles, à l'exception du  
1454 paramètre c du modèles RE-2, ont une p-value inférieure à 0.05 (Tableau [3.1](#)). L'erreur

1455 calculée lors de l'évaluation de ces modèles, si elle augmente par rapport à la cali-  
1456 bration, reste faible particulièrement pour le modèle RE-3 ou elle vaut moins de 25 %  
1457 (Figure 3.15–f). La RE semble donc mieux contrainte que la PPB, avec une estimation  
1458 des paramètres plus fiable et une différence entre les estimations issues des modèles  
1459 plus limitée.

1460 **CH<sub>4</sub>**

1461 Les flux de CH<sub>4</sub> sont faibles comparés aux flux de CO<sub>2</sub>. Les valeurs mesurées sont  
1462 plus forte que celles comprises entre 0 et 0,03 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> et mesurée par [Bortoluzzi  
et al. \(2006\)](#). Pour 2013 les valeurs mesurées sont proches de celle mesurée par [Long  
et al. \(2010\)](#). L'absence d'étiage en 2014 explique peut-être le doublement des flux en  
1465 minimisant la zone aérobie et les possibilités d'oxydation du CH<sub>4</sub> ([Lai, 2009](#)).

1466 Les faibles variations du niveau de nappe sont probablement à l'origine de l'absence  
1467 de relation entre ce dernier et les flux de CH<sub>4</sub>. Ces observation vont dans le même  
1468 sens que les observations faites par [Trudeau et al. \(2012\)](#) et (à développer, de ref ds  
1469 trudeau2012)

1470 **COD**

1471 **3.4.2 Estimations du bilan net de l'écosystème**

1472 D'une manière générale, les bilans sont principalement contraints par les flux de  
1473 CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub> ne jouant qu'un rôle marginal en termes de quantité de carbone. Ces ob-  
1474 servations sont cohérentes avec d'autres études comme [Bortoluzzi et al. \(2006\); Worrall  
et al. \(2009\)](#). La forte variabilité entre les différents bilans est à attribuer en grande  
1476 majorité à l'erreur sur l'estimation du flux de PPB.

1477 Les bilans annuels ont des comportements différents en 2013 et en 2014. En 2013  
1478 l'écart entre les deux estimations les plus extrêmes est de 462 gC m<sup>-2</sup>. Cet écart est  
1479 lié principalement à la prise en compte de la végétation (utilisation de PPB-2 au lieu  
1480 de PPB-1). En comparaison l'écart observé entre estimations extrêmes est quatre fois  
1481 plus faible en 2014 (120 gC m<sup>-2</sup>).

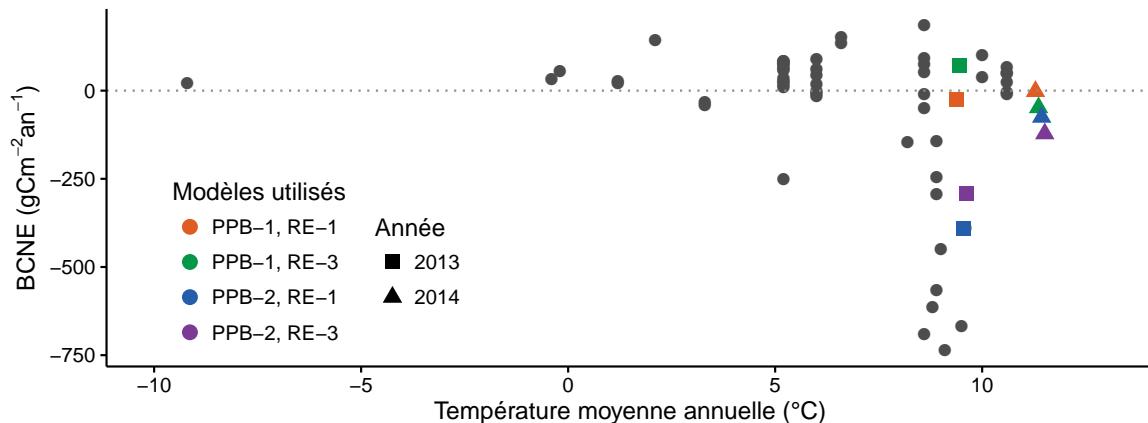


FIGURE 3.23 – Relation entre le Bilan de Carbone Net de l’Écosystème (BCNE) et la température moyenne annuelle (en °C) dans la littérature (en gris) et pour ces travaux. La ligne de tirets sépare les écosystèmes stockant du carbone (au dessus) de ceux libérant du carbone (en dessous).

1482 Selon le bilan considéré, la tourbière de La Guette stocke de faible quantité de  
 1483 C de l’ordre d’une dizaine de grammes par mètre carré, ou émet du carbone dans  
 1484 l’atmosphère de l’ordre de 14 à de 233 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>. Ces valeurs, si on les compare à  
 1485 celle mesurées dans des prairies tourbeuses, ne sont pas aberrante en valeur absolue  
 1486 (Figure 3.23). Elle reste cependant sujette à caution. En effet il est probable que le  
 1487 modèle PPB-2 sous-estime la PPB et donc sur-estime les pertes de carbone par la  
 1488 tourbière. Les modèles utilisant PPB-1 sont plus proches les uns des autres et semble  
 1489 indiquer que, si la tourbière semble fonctionner plutôt comme une source de carbone,  
 1490 c’est de façon plus légère. Ce constat est également cohérent avec les observations de  
 1491 terrain, qui montre un niveau de nappe particulièrement élevé pendant les deux années  
 1492 de mesure en comparaison avec les précédentes.

1493 Pour résumer, il est probable que la tourbière de La Guette fonctionne actuellement  
 1494 plutôt comme une légère source de carbone.

### 1495 3.4.3 Sensibilité et limitations du bilan

1496 Les incertitudes les plus fortes du bilan sont sur les flux de CH<sub>4</sub> avec une erreur  
 1497 standard de 32 % lors de la calibration et de 68 % lors de la validation. Cette différence  
 1498 importante montre que l'estimation des flux de CH<sub>4</sub> à l'aide de l'indice de végétation

1499 à permis l'estimation de sa contribution au bilan de carbone de l'écosystème pour les  
1500 années 2013 et 2014, mais que son utilisation dans d'autres conditions (année sèche,  
1501 haute MAT) est fortement limitée. L'importance faible du CH<sub>4</sub> dans le bilan de carbone  
1502 de la tourbière rend ces erreurs moins critiques que celles faite sur l'estimation de la  
1503 PPB. Les incertitudes importantes sur la PPB, sont mises en évidence par les fortes  
1504 variations des flux interpolés selon l'équation utilisée. Elles sont la source des variations  
1505 observées en termes de bilan. L'ajout d'un indice de végétation diminue d'incertitude  
1506 des paramètres du modèle, mais cet apport n'est pas reflété par l'évaluation, malgré la  
1507 similarité de la végétation. À l'inverse la RE est bien contrainte. Sur les 2 années la  
1508 différence entre les différentes équations utilisées ne dépassent pas 25 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>.

1509       **sensibilité du bilan au variation des paramètres**

1510       Outre ces aspects ce bilan de carbone est aussi limité par sa représentativité. Ainsi  
1511 la strate arborée fortement présente dans certaines zones n'est pas directement prise  
1512 en compte. De la même manière une partie restreinte de la tourbière mais néanmoins  
1513 présente est constitué de touradons dont l'effet n'a pas été pris en compte.

1514       **3.4.4 Bilan de CO<sub>2</sub> et végétation**

1515       **3.4.5 Variabilité du recouvrement végétal**

1516       Si quelques placettes proche géographiquement ont des recouvrement végétaux voi-  
1517 sins (les placettes p18 et p19 ; p02, p03 et p04 ; p12, p14 et p16) les autres ne présentent  
1518 pas un tel lien. Par ailleurs, au sein d'une même classe peuvent être rassemblées des  
1519 placettes très éloignées spatialement, les placette p01 et p15 par exemple ou les pla-  
1520 cettes p02 et p17 ou p09 et p20. Ceci montre une variabilité spatiale importante du  
1521 recouvrement végétal mais également que cette variabilité ne semble pas zonée géogra-  
1522 phiquement, selon un gradient quelconque.

#### 1523 Effet du type de végétation majoritaire sur les flux de CO<sub>2</sub> et le bilan de 1524 CO<sub>2</sub>

1525 Le calcul des bilans avec les différents groupes de végétation permet de mettre en  
1526 évidence des comportements différents des flux selon la végétation majoritaire. Ainsi  
1527 le groupe 3 dans lequel la strate herbacée est la plus importante est celui où la PPB  
1528 est la plus forte. Ce point semble en cohérence avec la croissance annuelle importante  
1529 des herbacées visible sur le terrain. Mais également car la présence d'un Aérenchyme  
1530 permet à la molinie et à la linaigrette d'alimenter leurs racines en oxygène malgré un  
1531 niveau de nappe très élevé ([Taylor et al., 2001](#); ?)). À l'inverse le groupe 1 dans lequel  
1532 la strate muscinale est la plus importante est également le groupe pour lequel la PPB  
1533 est la plus faible. (**Réf needed**)

1534 Pour la RE, ce sont les groupes 3 et 4 qui ont les flux estimés les plus importants  
1535 avec une différence d'environ 200 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> avec les deux autres groupes. Malgré  
1536 leurs différences, le groupe 2 possède une strate muscinale importante alors qu'elle est  
1537 absente dans le groupe 3, ils ont en commun d'avoir une strate arbustive importante.

#### 1538 3.4.6 Représentativité locale du modèle

1539 Distribution des paramètres

1540 Pourquoi certaines placette mieux que d'autres

1541 Concernant la respiration la représentativité locale des modèles calibrés à l'échelle  
1542 de l'écosystème semble plus homogène pour le modèle RE-3 que pour le modèle RE-1.

1543 Une telle comparaison entre PPB-1 et PPB-2 n'a pas été possible car vu le faible  
1544 nombre de données et la qualité relative des modèles PPB par rapport aux modèles  
1545 RE, peu de modèles sont parvenus à converger pour PPB-1 (11 sur 20 placettes) et  
1546 pour PPB-2 (17 sur 20 placettes).

#### 1547 3.4.7 perspectives

1548 cartographie ?

1549 4 Effets de l'hydrologie sur les flux de GES

1550

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 1551 | <b>4.1 Introduction</b>  | 96  |
| 1552 | <b>4.2 Procédure expérimentale</b>                                   | 98  |
| 1553 | 4.2.1 Expérimentation A  | 98  |
| 1554 | 4.2.2 Expérimentation B  | 99  |
| 1555 | 4.2.3 traitement   | 99  |
| 1556 | <b>4.3 Résultats</b>   | 101 |
| 1557 | 4.3.1 Expérimentation A  | 101 |
| 1558 | 4.3.2 Expérimentation B  | 104 |
| 1559 | 4.3.3 tendances générales  | 107 |
| 1560 | <b>4.4 Discussion</b>  | 107 |
| 1561 | 4.4.1 Comparaison aux mesures <i>in-situ</i>                         | 107 |
| 1562 | 4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de gaz | 109 |
| 1563 | 4.4.3 Effet cycles multiples   | 110 |
| 1564 |  |     |
| 1565 |  |     |
| 1566 |  |     |

## 1567 4.1 Introduction

1568 Au cours des deux années de suivis des flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> sur la tourbière de La  
1569 Guette, le niveau de la nappe a très faiblement varié comparé aux années précédentes  
1570 bien plus sèches. En conséquence l'effet des variations de nappe sur les flux n'a pu être  
1571 investigué. Néanmoins l'hydrologie est un facteur contrôlant des flux (**Réf needed**).  
1572 Ainsi de nombreuses études ont reliées les émissions de CO<sub>2</sub> au niveau de la nappe (**Réf  
1573 needed**). Cependant, aucun consensus n'a encore été atteint : La majorité des études  
1574 montrent qu'une tourbière dont le niveau de la nappe est abaissé, soit par un drainage,  
1575 soit par une sécheresse, aura tendance à avoir un ENE plus faible. Par exemple, [Strack  
1576 et Zuback \(2013\)](#) expliquent des valeurs d'ENE plus faibles qu'escompté, par des me-  
1577 sures faites pendant une période relativement sèche. Une observation similaire est faite  
1578 par [Aurela et al. \(2007\)](#) qui mesure un ENE plus faible lors d'une année sèche, sur une  
1579 tourbière à Carex du sud de la Finlande. Ils attribuent la variation de l'ENE à une  
1580 augmentation de la RE et à une baisse de la PPB, dans des conditions plus chaudes  
1581 et plus sèches. [Peichl et al. \(2014\)](#) observent également une baisse de l'ENE lors d'une  
1582 année où le niveau de la nappe baisse de façon importante, au delà de -30 cm. Ils ex-  
1583 pliquent cette baisse par une baisse de la PPB. Cette observation va dans le même sens  
1584 que [Lund et al. \(2012\)](#) qui observent en 2008 une baisse de l'ENE sur une tourbière  
1585 à sphaignes située au sud de la suède. Les mesures de RE faites cette année là étant  
1586 similaires à celles effectuées les autres années, ils lient cette baisse à une diminution de  
1587 la PPB. En 2006, sur la même tourbière, [Lund et al. \(2012\)](#) observent une autre baisse  
1588 de l'ENE. Mais cette fois, les mesures de PPB à leur tour similaires à celle des autres  
1589 années n'expliquent pas cette baisse. À l'inverse de 2008, cette baisse est expliquée par  
1590 une augmentation de la RE. Ces inconsistances apparentes peuvent avoir pour origine  
1591 des types de sécheresse différente : courte et intense pendant la saison de végétation  
1592 de 2006 et d'intensité plus faible mais d'une durée plus longue en 2008. À l'inverse des  
1593 résultats précédemment cités, [Ballantyne et al. \(2014\)](#) dans une étude des effets à long

1594 terme d'une baisse du niveau de la nappe, observent pas d'effets significatifs sur l'ENE  
1595 tandis que les flux de RE et de PPB augmentent tous les deux. Ces études montrent  
1596 que si le niveau de la nappe est reconnu comme un facteur de contrôle des flux de CO<sub>2</sub>,  
1597 il est difficile d'en dégager des liens de cause à effet répétables.

1598 Concernant le méthane, une baisse du niveau de la nappe est généralement liée à  
1599 une baisse des émissions de CH<sub>4</sub>, et inversement, le niveau de la nappe contrôlant la  
1600 proportion des zones où le CH<sub>4</sub> est produit/oxydé (Pelletier *et al.*, 2007). Turetsky  
1601 *et al.* (2008) montrent par ailleurs que selon leur sens, l'effet des variations du niveau  
1602 de nappe sur les flux de CH<sub>4</sub> n'est pas identique. Ils observent ainsi que l'effet est  
1603 plus important lorsque le niveau de la nappe est augmenté que lorsqu'il est diminué ( $\pm$   
1604 10 cm). Ils font l'hypothèse que le niveau de la nappe, en plus de jouer sur la proportion  
1605 production/oxydation, a un effet sur le transfert de chaleur dans le sol. Cette hypothèse  
1606 s'appuie sur l'observation de températures plus élevées, que ce soit celles de l'air ou de  
1607 la tourbe, dans les zones où le niveau de la nappe a été rehaussé. Cependant d'autres  
1608 études, principalement dans des sites où le niveau de la nappe est proche de la surface  
1609 du sol, montrent une absence de relation entre le niveau de la nappe et les émissions  
1610 de méthane, voire une relation inverse, avec des flux plus faibles liés à des niveaux de  
1611 nappe plus élevés (Kettunen *et al.*, 1996; Bellisario *et al.*, 1999; Treat *et al.*, 2007). Là  
1612 encore selon les conditions environnementales, la relation entre les flux de CH<sub>4</sub> et le  
1613 niveau de la nappe n'est pas aisément généralisable.

1614 La vitesse de l'augmentation du niveau de nappe semble également jouer sur les  
1615 flux, des pics de RE ont été observés après la réhumectation rapide. La façon dont  
1616 le niveau de la nappe augmente semble également jouer sur les flux. Strack et Price  
1617 (2009) ont observé qu'une hausse graduelle par le bas de la colonne de sol conduit  
1618 à une baisse de la RE, tandis qu'une hausse rapide simulant un événement pluvieux  
1619 (par le haut) conduisait à un pic de RE. Ce pic de RE après une réhumectation a  
1620 également été observé par McNeil et Waddington (2003). L'objectif de ce chapitre est  
1621 donc d'explorer plus en avant l'effet du niveau de la nappe d'eau sur les émissions de  
1622 GES, effet peu ou pas visible *in-situ*. Plus précisément il s'agit de déterminer l'effet de

## 4.2. Procédure expérimentale

---

cycles de dessication/ré-humectation sur les émissions de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>. On attend donc qu'une baisse du niveau de la nappe une augmentation des flux de RE, avec possiblement un pic d'émission au moment de la réhumectation, et une diminution des flux de méthane. ((Réf needed)cycle multiples effet)

## 4.2 Procédure expérimentale

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

### 4.2.1 Expérimentation A

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

---

**1647 4.2.2 Expérimentation B**

1648 Le 17 avril 2014, six nouveaux mésocosmes ont été prélevés sur la tourbières de  
1649 La Guette et installés près du laboratoire, en suivant le même protocole que pour  
1650 l'expérimentation A. Une station météo a été installée à côté des mésocosmes afin de  
1651 mesurer la température de l'air, l'humidité relative, le rayonnement solaire, la vitesse et  
1652 la direction du vent et les précipitations toutes les 15 minutes. Cette station permettait  
1653 également l'enregistrement des températures mesurées par des sondes (T107) installées  
1654 à -5, -10, et -20 cm. Les conditions météorologiques moins ensoleillée qu'en 2013  
1655 et l'objectif de suivre plusieurs cycles de dessiccation/réhumectation ont nécessité la  
1656 mise en place d'un abaissement manuel du niveau de la nappe. Pendant les phases  
1657 d'assèchement les niveaux de nappes des placettes traitées étaient donc abaissés en  
1658 moyenne de 2,5 cm par jour. Le premier cycle de dessiccation/réhumectation dura du  
1659 30 juin au 6 juillet pour la phase de dessiccation et du 7 au 16 juillet pour la phase de  
1660 réhumectation. Le deuxième cycle dura du 17 au 28 juillet et du 29 juillet au 3 aout,  
1661 Enfin le dernier cycle fut mesuré du 4 au 11 aout pour la dessiccation et du 12 au 14  
1662 aout pour la réhumectation.

**1663 4.2.3 traitement**

1664 Pour les deux expérimentations les variables explicatives sont la température de  
1665 l'air, du sol à -5 cm, le niveau de nappe, et l'humidité du sol. La végétation n'a été  
1666 suivie que lors de l'expérimentation B. Les placettes subissant les cycles de dessiccation  
1667 seront nommées groupe « Dessiccation » et les placettes ne subissant pas les cycles,  
1668 groupe « Contrôle ». Ces deux groupes correspondent aux deux traitements utilisés  
1669 pour l'analyse statistique. Pour le CO<sub>2</sub>, l'analyse a été faite sur les flux moyennés sur  
1670 une journée, les flux ayant été généralement mesuré deux fois par jour. Pour le CH<sub>4</sub>,  
1671 les flux bruts ont été utilisés.

#### 4.2. Procédure expérimentale

---



FIGURE 4.1 – Prélèvement des mésocosmes (en haut). Mésocosmes installés et protégés de la pluie (en bas).

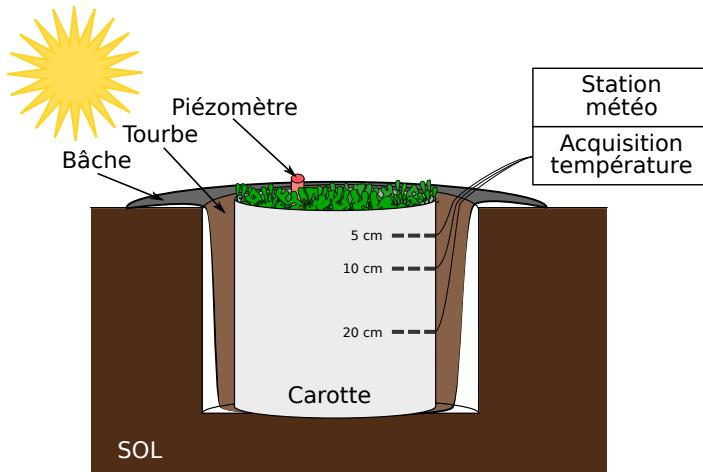


FIGURE 4.2 – Schéma d'un mésocosme

## 4.3 Résultats

### 4.3.1 Expérimentation A

#### Niveau de la nappe

Pendant la phase de dessiccation de l'expérimentation A, on observe une baisse du niveau de la nappe pour les placettes contrôles comme pour les placettes traitements (Figure 4.3–A). Cependant les placettes du groupe Contrôle ont un niveau de nappe relativement élevé jusqu'au 24 juin puis ce niveau baisse fortement alors que les placettes du groupe Dessiccation ont un niveau de nappe qui diminue de façon plus continue sur l'ensemble de la phase. La remontée du niveau de la nappe s'effectue de façon similaire pour les deux groupes. Enfin après la phase de ré-humectation, le niveau de la nappe baisse à nouveau, plus rapidement pour le groupe Dessiccation que pour le groupe Contrôle.

#### Flux de CH<sub>4</sub>

Les émissions de CH<sub>4</sub>, 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 4.3–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

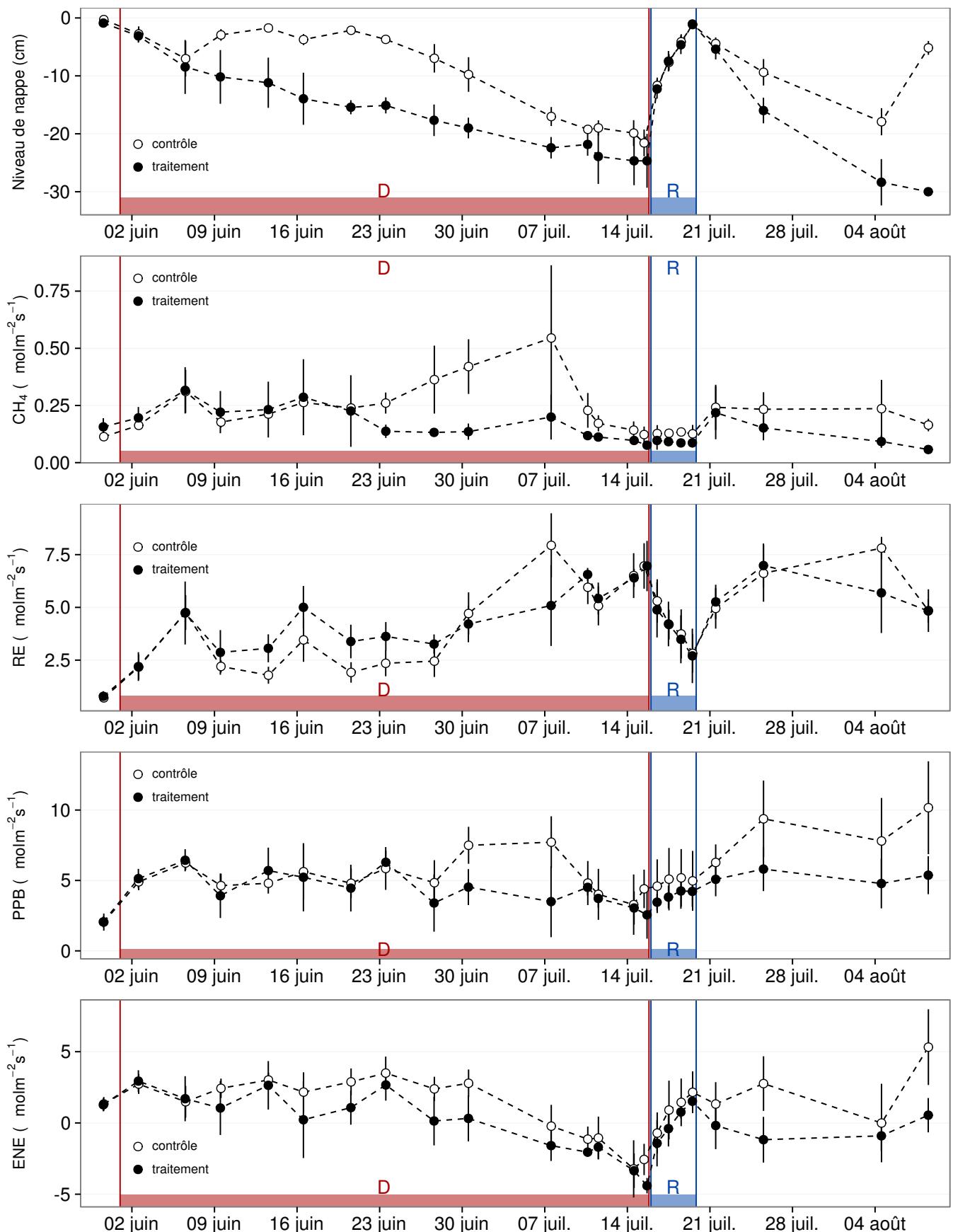


FIGURE 4.3 – Expérimentation A : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux,  $\text{CH}_4$ , RE, PPB, ENE en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent à la phase de dessiccation (D) en rouge et à la phase de réhumectation (R) en 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 CO<sub>2</sub>

Pendant la phase de dessiccation, les valeurs de la RE tendent à augmenter quel que soit le groupe de placettes considéré (Figure 4.3–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 CH<sub>4</sub>. 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 4.3–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 CH<sub>4</sub> 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

---

<sub>1718</sub> dans le groupe de contrôle a des valeurs supérieures à celles du groupe Dessiccation.  
<sub>1719</sub> Après la réhumectation, la PPB augmente pour les deux groupes, avec un maximum de  
<sub>1720</sub>  $5,83 \pm 1,61 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  pour le groupe Dessiccation et de  $10,17 \pm 3,30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$   
<sub>1721</sub> pour le groupe Contrôle.

<sub>1722</sub> L'ENE est systématiquement supérieure pour le groupe Contrôle, avec une cinétique  
<sub>1723</sub> parallèle des flux pour les deux groupes (Figure 4.3–E). Pendant la phase de dessicca-  
<sub>1724</sub> tion, l'ENE reste relativement constante jusque fin juin avec une valeur moyenne pour  
<sub>1725</sub> 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  
<sub>1726</sub> groupe Dessiccation tend à augmenter du 10 au 30 juin environ, avant que les valeurs  
<sub>1727</sub> du groupe de Contrôle ne rejoignent celles du groupe Dessiccation. Au delà du 24 juin,  
<sub>1728</sub> l'ENE baisse fortement pour les deux groupes pour atteindre un minimum proche de  
<sub>1729</sub>  $-4,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Pendant la phase de réhumectation l'ENE monte rapidement pour  
<sub>1730</sub> 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  
<sub>1731</sub> Dessiccation respectivement. Après la réhumectation, l'ENE du groupe Contrôle va-  
<sub>1732</sub> rie en suivant généralement les variations du niveau de nappe. Pour le groupe traité,  
<sub>1733</sub> l'ENE baisse par rapport au maximum atteint lors de la réhumectation puis se stabilise  
<sub>1734</sub> autour de 0.

<sub>1735</sub> L'effet des variations du niveau de la nappe sur la PPB est quasiment nul (Fi-  
<sub>1736</sub> gure 4.5–E), même si la PPB semble diminuer aux plus fortes profondeurs. Les va-  
<sub>1737</sub> riations de la RE sont principalement liée au niveau de la nappe (Figure 4.5–C) Par  
<sub>1738</sub> conséquent, les variation de RE se répercutent sur l'ENE (Figure 4.5–G). Pour le CH<sub>4</sub> il  
<sub>1739</sub> est également difficile de distinguer des tendances générales entre les flux et les niveaux  
<sub>1740</sub> de nappe (Figure 4.5–A).

#### <sub>1741</sub> 4.3.2 Expérimentation B

<sub>1742</sub> Contrairement à l'expérimentation A, le niveau de nappe du groupe Contrôle de  
<sub>1743</sub> l'expérimentation B reste relativement constant pendant l'ensemble de la période de  
<sub>1744</sub> mesure. Le drainage artificiel du groupe Dessiccation permet d'abaisser le niveau de la  
<sub>1745</sub> nappe d'une quinzaine de centimètres en moyenne pour chaque cycle (Figure 4.4–A).

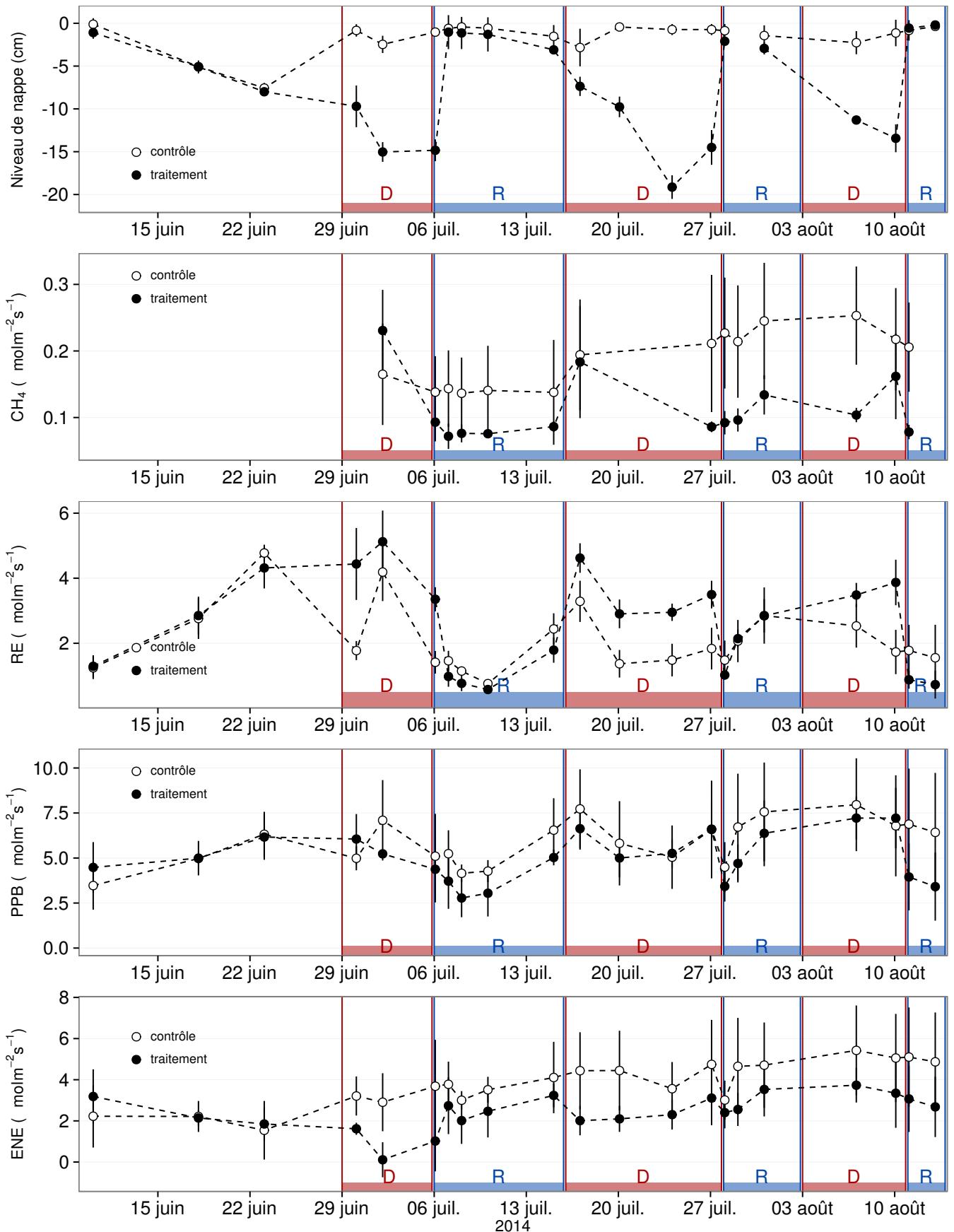


FIGURE 4.4 – Expérimentation B : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux,  $\text{CH}_4$ , RE, PPB, ENE en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent aux phases de dessiccation (D) en rouge et aux phases de réhumectation (R) en bleu.

### 4.3. Résultats

---

1746 Les flux de CH<sub>4</sub> moyen varient entre 0,07 à 0,34 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Les flux du groupe  
1747 Contrôle, à l'exception de la première mesure, sont supérieurs aux flux du groupe Des-  
1748 siccation, (moyennes globales de 0,20 ± 0,06 et 0,11 ± 0,05 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>, respective-  
1749 ment. Les émissions du groupe Contrôle tendent à augmenter sur la période de mesure.  
1750 Une tendance similaire, est également visible pour le groupe Dessiccation. Concernant  
1751 les cycles de dessiccation/réhumectation, il est difficile de dégager des comportements  
1752 communs entre eux, même si l'assèchement conduit à une baisse des émissions (Fi-  
1753 gure 4.4-B) Cette relation, mise en exergue pas un nombre de points très faible, n'ap-  
1754 paraît cependant pas sur l'ensemble des données (Figure 4.5-B). Un pic d'émission de  
1755 CH<sub>4</sub> est également à noter pour chaque cycle pendant la phase de dessiccation.

1756 La RE varie pour les deux groupes entre 0,42 et 5,12 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> (Figure 4.4–  
1757 C)). Avant le démarrage des manipulations du niveau de la nappe, les valeurs des  
1758 deux groupes sont très proches et augmentent tandis que le niveau de nappe diminue.  
1759 Pendant les phases de dessication, les valeurs du groupe Dessiccation sont systéma-  
1760 tiquement supérieures, de 1,5 à 1,8 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>en moyenne par phase, par rapport  
1761 à celle du groupe Contrôle. À l'inverse pendant les phases de réhumectation les flux  
1762 entre les deux groupes sont beaucoup plus proches avec une tendance de la RE du  
1763 groupe Contrôle à être supérieure à celle du groupe Dessiccation. La RE du groupe  
1764 traité est systématiquement plus faible pendant les phases de réhumectations que pen-  
1765 dant les phases de dessications. En moyenne la RE vaut respectivement 2,28 ± 1,00 et  
1766 3,86 ± 0,80 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> pour les groupes Contrôle et Dessiccation pendant les phases  
1767 de dessiccation et 1,70 ± 0,62 et 1,51 ± 0,98 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> pendant les phases de réhu-  
1768 mectation.

1769 Sur l'ensemble de la période de mesure la PPB est comprise entre 2,78 et 7,96 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>.  
1770 Avant le début des traitements les flux des deux groupes sont similaires (Figure 4.4-D).  
1771 À partir de la première phase de dessiccation, la PPB du groupe Contrôle supérieure  
1772 à celle du groupe Dessiccation. Pour les deux groupes, la PPB est plus importante lors  
1773 des phases de dessiccation comparée aux phase de réhumectation, avec des moyennes  
1774 respectives de 6,35 ± 2,19 contre 5,80 ± 2,20 pour le groupe Contrôle et de 5,95 ± 1,46

1775 contre  $4,05 \pm 1,60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  pour le groupe Dessiccation.

1776 Les valeurs d'ENE mesurées sont comprises entre  $0,11$  et  $5,42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , elles ont  
 1777 tendance à augmenter au cours du temps. Passé la période pré-traitements pendant la-  
 1778 quelle les flux de l'ENE sont similaires pour les deux groupes l'ENE du groupe Contrôle  
 1779 est systématiquement supérieure à celle du groupe Dessiccation (Figure 4.4–E). L'évo-  
 1780 lution des deux groupes reste cependant relativement conjointe pendant la période de  
 1781 mesure avec pour le groupe Dessiccation une diminution récurrente de l'ENE au début  
 1782 de chaque phase de dessiccation.

### 1783 4.3.3 tendances générales

1784 Pour les deux expérimentations une relation nette est visible entre le niveau de la  
 1785 nappe et l'ENE qui diminue lorsque le niveau de nappe augmente (Figure 4.5–G,H).  
 1786 La relation inverse est visible, pour les deux expérimentations, entre la RE et le niveau  
 1787 de la nappe (Figure 4.5–C,D). La PPB ne montre aucune tendance quelle que soit  
 1788 l'expérimentation. On peut noter que les valeurs de PPB les plus faibles correspondent  
 1789 aux niveaux de nappe les plus élevés(Figure 4.5–E,F). Pour le méthane, que ce soit  
 1790 pour l'expérimentation A ou B, aucune tendance ne semble se dégager vis à vis du  
 1791 niveau de la nappe (Figure 4.5–A,B).

## 1792 4.4 Discussion

### 1793 4.4.1 Comparaison aux mesures *in-situ*

1794 Les flux moyen de  $\text{CH}_4$  mesurés dans les mésocosmes des deux expérimentations  
 1795 font partie des valeurs hautes mesurées sur le terrain. Certaines campagnes dépassent  
 1796 nettement, en faisant plus que doubler, le maximum de  $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  mesuré en  
 1797 2014 sur la tourbière de La Guette.

1798 Pour le  $\text{CO}_2$  les flux sont généralement dans la gamme des valeurs mesurées sur

#### 4.4. Discussion

---

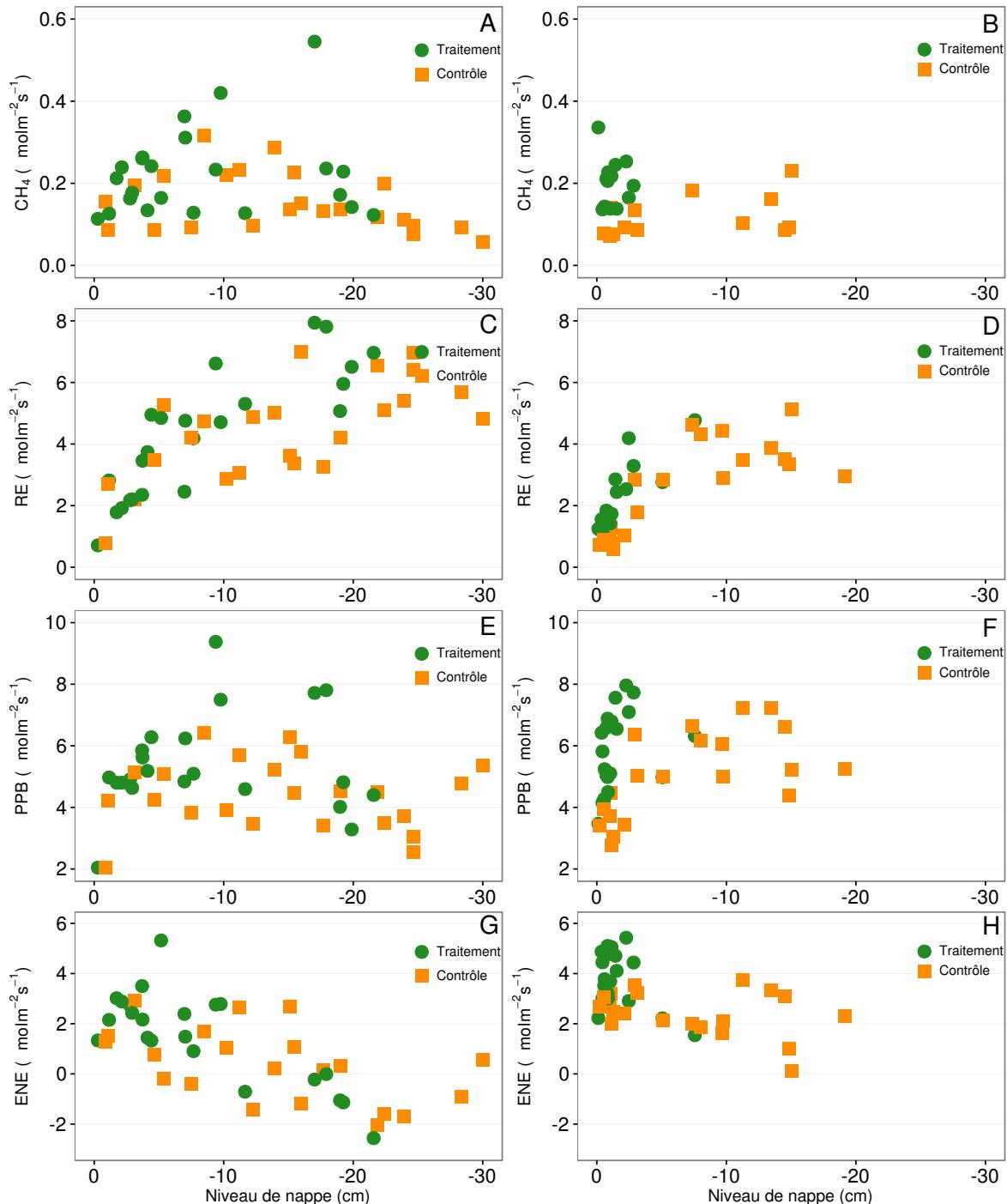


FIGURE 4.5 – Relations entre les flux de GES et le niveau de la nappe

1799 la tourbière de La Guette. Pour l'expérimentation A, l'ENE moyen est plus faible que  
1800 celui mesuré sur le terrain la même année :  $0,81 \text{ contre } 2,85 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Pour l'expé-  
1801 rimentation B en revanche l'ENE moyen vaut  $0,71 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  ce qui est relativement  
1802 proche de celui mesuré sur le terrain :  $2,93 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Les flux de RE et de PPB  
1803 sont moins fort que les flux mesurés sur le terrain mais restent dans leur gamme de  
1804 valeurs. Ces comparaisons sont par ailleurs à relativiser puisque les mesures de flux  
1805 n'ont pas nécessairement lieu aux mêmes moment de la journée.

1806 Comme pour la RE, les flux de PPB sont du même ordre de grandeur que ceux  
1807 mesurés sur le terrain, mais dans la gamme basse : les maxima moyens mesurés dans les  
1808 mésocosmes sont d'environ  $7,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  pour des valeurs de  $13 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  mesuré directement  
1809 sur la tourbière.

#### 1810 4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de 1811 gaz

1812 Les résultats de ces deux expérimentations montrent une augmentation de la RE  
1813 quand le niveau de la nappe diminue. Ceci est en accord avec les résultats d'autres  
1814 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  
1816 de la nappe diminue la PPB. Pas de variations significatives de la PPB avec le niveau de  
1817 la nappe n'est visible dans les données présentées, même si une légère tendance semble  
1818 émergée aux plus fortes profondeur de nappe pour l'expérimentation A. Cette absence  
1819 d'effet du niveau de la nappe sur la PPB peut, être liée à la profondeur des mésocosmes  
1820 ( $30 \text{ cm}$ ). En effet dans [Blodau et al. \(2004\)](#) et [Dinsmore et al. \(2009\)](#), les mésocosmes  
1821 utilisés sont plus grands,  $75$  et  $41 \text{ cm}$  respectivement, ont permis d'abaisser le niveau  
1822 de l'eau au delà de  $-30 \text{ cm}$ . Cette limite a été rapportée plusieurs fois comme étant  
1823 un seuil au delà duquel son observés des changements importants ([Blodau et al., 2004;](#)  
1824 [Peichl et al., 2014](#)). Ce seuil est expliqué comme étant la limite au delà de laquelle  
1825 les forces de capillarités ne permettent plus d'alimenter en eau les sphagnoles ([Rydin  
et Jeglum, 2013b; Ketcheson et Price, 2014](#)). Il résulte des constats précédents qu'une

## 4.4. Discussion

---

1827 baisse du niveau de nappe, faisant augmenter la RE et ne changeant pas ou peu la  
1828 PPB, conduit à une baisse de l'ENE. Cette diminution de l'ENE est cohérente avec la  
1829 littérature, que ce soit des expérimentations en mésocosmes ([Aerts et Ludwig, 1997](#);  
1830 [Blodau \*et al.\*, 2004](#)), ou in-situ ([Bubier \*et al.\*, 2003](#); [Sonnentag \*et al.\*, 2010](#)). Malgré  
1831 tout l'extrapolation de ses résultats à d'autres situations n'est pas aisée car fortement  
1832 fonction du contexte. D'autre études n'ont, par exemple, pas observé d'influence du  
1833 niveau de la nappe sur la RE ([Updegraff \*et al.\*, 2001](#)). Par ailleurs [Laiho \(2006\)](#) a  
1834 montré l'importance du contexte et notamment celui de l'échelle de temps considéré  
1835 qui peut impliquer des phénomènes différents et donc avoir des conséquences différentes.

1836 La dépendance entre les flux de CH<sub>4</sub> et le niveau de la nappe, devant conduire à une  
1837 baisse des émissions quand le niveau de la nappe diminue, comme décrite dans [Aerts et](#)  
1838 [Ludwig \(1997\)](#), [Pelletier \*et al.\* \(2007\)](#) ou [Turetsky \*et al.\* \(2008\)](#), n'a pas été clairement  
1839 observée. Ce constat rejoins d'autres études dans lesquelles une relation inverse ou un  
1840 absence de relation a été trouvé entre le CH<sub>4</sub> et le niveau de la nappe [Kettunen \*et al.\*](#)  
1841 ([1996](#)); [Bellisario \*et al.\* \(1999\)](#); [Treat \*et al.\* \(2007\)](#). L'observation d'un pic de méthane  
1842 suivant de quelques jours une phase de hausse du niveau de la nappe, est également  
1843 rapportée par [Kettunen \*et al.\* \(1996\)](#). (**And so what ?**)

### 1844 4.4.3 Effet cycles multiples

<sub>1845</sub> 5 Variation journalière de la respiration de  
<sub>1846</sub> l'écosystème (article)

|                 |  |            |
|-----------------|--|------------|
| <sub>1847</sub> |  |            |
| <sub>1848</sub> | <b>5.1 Introduction</b>  | <b>112</b> |
| <sub>1849</sub> | 5.1.1 Study sites  | 114        |
| <sub>1850</sub> | 5.1.2 Data acquisition   | 114        |
| <sub>1851</sub> | 5.1.3 Data synchronisation   | 115        |
| <sub>1852</sub> | 5.1.4 Sensitivity of ER to temperature   | 115        |
| <sub>1853</sub> | 5.1.5 Testing difference between daytime and nighttime ER sensitivity to temperature         | 116        |
| <sub>1854</sub> | 5.1.6 Physico-chemical characterisation of the peat  | 116        |
| <sub>1855</sub> | <b>5.2 Results</b>   | <b>117</b> |
| <sub>1856</sub> | 5.2.1 Air temperature and ER variability   | 117        |
| <sub>1857</sub> | 5.2.2 ER and soil temperature synchronisation  | 119        |
| <sub>1858</sub> | 5.2.3 Model implementation   | 120        |
| <sub>1859</sub> | 5.2.4 ER and temperature relationship  | 120        |
| <sub>1860</sub> | 5.2.5 $Q_{10}$ evolution   | 122        |
| <sub>1861</sub> | 5.2.6 Daytime and nighttime differences  | 122        |
| <sub>1862</sub> | 5.2.7 Peat characterisation  | 125        |
| <sub>1863</sub> | <b>5.3 Discussion</b>  | <b>125</b> |
| <sub>1864</sub> | 5.3.1 ER differences between sites   | 125        |
| <sub>1865</sub> | 5.3.2 Time-delay between temperature and ER  | 128        |
| <sub>1866</sub> | 5.3.3 Synchronising ER and temperature improves ER sensitivity to temperature representation | 129        |
| <sub>1867</sub> | 5.3.4 Differences between daytime and nighttime ER measurements                              | 129        |
| <sub>1868</sub> | 5.3.5 $Q_{10}$ sensitivity to temperature depth and synchronisation                          | 130        |
| <sub>1869</sub> | <b>5.4 Conclusions</b>   | <b>130</b> |
| <sub>1870</sub> |  |            |
| <sub>1871</sub> |  |            |
| <sub>1872</sub> |  |            |
| <sub>1873</sub> |  |            |
| <sub>1874</sub> |  |            |

## 1875 5.1 Introduction

1876 At a global scale, Ecosystem Respiration (ER) and photosynthesis are the most  
1877 important fluxes between the atmosphere and the biosphere, accounting for 98 and  
1878 123 PgC yr<sup>-1</sup>, respectively (Bond-Lamberty et Thomson, 2010; Beer et al., 2010). By  
1879 contrast the fossil fuel and cement production flux is one order of magnitude lower, at  
1880 7.8 PgC yr<sup>-1</sup> (Ciais et al., 2014). Consequently, even small variations in the ecosystem  
1881 fluxes may result in substantial changes in carbon (C) storage dynamics. This can have  
1882 a significant effect on the global C budget, in particular on atmospheric C concentration.  
1883 The C stock in natural ecosystems is divided into two pools : vegetation, which contains  
1884 450 to 650 Pg C, and the soil which contains 1500 to 2400 Pg C (Prentice et al., 2001;  
1885 Eswaran et al., 1993; Batjes, 1996). Across the world, the soil organic C (SOC) pool is  
1886 spatially heterogeneous in terms of source and physical conditions, leading to variable  
1887 storage rates between ecosystem types. Peatlands are efficient C storage ecosystems.  
1888 They cover only 3 % of the global terrestrial area, but contain from 270 to 455 Pg C as  
1889 SOC, i.e. from 10 to 30 % of the world's soil C (Gorham, 1991; Turunen et al., 2002).  
1890 Thus, peatlands are considered as a "hot spots" for SOC storage, and their evolution  
1891 under current environmental changes deserves attention.

1892 As in many other terrestrial ecosystems, many factors affect ER variability in peat-  
1893 lands : temperature, soil water content, vegetation, and substrate supply (Luo et Zhou,  
1894 2006b). All these factors are thought to be affected by global change, with unknown  
1895 consequences on the C balance (Limpens et al., 2008). ER is often related to tempe-  
1896 rature : either to air temperature (e.g., ?), or soil temperature. The most commonly  
1897 used soil temperatures are those at -5 cm (Ballantyne et al., 2014; Görres et al., 2014)  
1898 and -10 cm (Kim et Verma, 1992; Zhu et al., 2015). In some studies, different depths  
1899 are used and the selected one depends on the goodness-of-fit (Günther et al., 2014;  
1900 Zhu et al., 2015). All these studies use the chamber method to measure gas fluxes.  
1901 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  $10^{\circ}\text{C}$  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

---

1931 The aim of this study was (i) to highlight any time-delay at the daily timescale  
1932 between ER and soil temperature at different depths in peatlands (ii) to assess the  
1933 effect of synchronisation between ER and temperature in the representation of the diel  
1934 ER variations (iii) to use the improved model to assess whether there is a difference  
1935 between nighttime and daytime ER.

### 1936 5.1.1 Study sites

1937 The study was performed on four French *Sphagnum*-dominated peatlands : Berna-  
1938 douze (BDZ, Ariège ; 3.75 ha, N 42°48'09", E 1°25'24", 1400 m), Frasne (FRN, Doubs ;  
1939 98 ha, N 46°49'35", E 6°10'20", 836 m), Landemarais (LDM, Ille-et-vilaine ; 23 ha,  
1940 N 48°26'30", E 1°10'54", 154 m), and La Guette (LGT, Cher ; 26 ha, N 47°19'44", E  
1941 2°17'04", 145 m). Mean annual air temperatures and annual rainfalls were 6, 7.5, 11,  
1942 11°C, and 1700, 1400, 870, 880 mm for BDZ, FRN, LDM and LGT respectively. During  
1943 the measurements the water table level remained constant at to -12, -7, -35 and -9 cm  
1944 for BDZ, FRN, LDM and LGT.

### 1945 5.1.2 Data acquisition

1946 Fieldwork was conducted between July and October 2013. In each site, four plots  
1947 (replicates) with similar plant cover were chosen. Four cylindrical PVC collars (diame-  
1948 ter : 31 cm, height : 15 cm) were inserted into the peat the day before beginning the  
1949 measurements. For 72 hours, CO<sub>2</sub> fluxes were measured in the 4 plots once an hour  
1950 in random order. These measurements were undertaken using a closed static cham-  
1951 ber (diameter of 30.5 cm, height of 30 cm), with a GMP343 Vaisala probe. ER was  
1952 measured with a transparent chamber covered by an opaque material to avoid input of  
1953 photosynthetic active radiation. Inside the chamber the air was homogenized with a fan  
1954 in order to minimize concentration gradients ([Pumpenan et al., 2004](#)). Measurement  
1955 lasted a maximum of 5 min with CO<sub>2</sub> concentration recorded every 5 seconds as well  
1956 as the relative humidity and the temperature inside the chamber.

1957 In each site a weather station and a data logger were set up near the plots to provide

<sup>1958</sup> meteorological and environmental data recorded every second : surface temperature (air  
<sup>1959</sup> temperature as close as possible to the surface : 5 cm), peat temperature (at -5, -10,  
<sup>1960</sup> -20 and -30 cm depth), air relative humidity and solar radiation.

<sup>1961</sup> After the 72 hours of measurements four peat cores (30 cm height and 15 cm  
<sup>1962</sup> diameter), one for each replicate, were extracted at each site for physico-chemical cha-  
<sup>1963</sup> racterisation.

### <sup>1964</sup> 5.1.3 Data synchronisation

<sup>1965</sup> The synchronisations between ER fluxes and temperatures were calculated for each  
<sup>1966</sup> depth and time-delays : The acquisition frequency between temperature and ER were  
<sup>1967</sup> different. Thus an average of the temperatures recorded during the ER measurement  
<sup>1968</sup> time was calculated for all depths at the corresponding CO<sub>2</sub> flux measurement time.

<sup>1969</sup> Then the temperature averaging procedure was repeated at 10-minute increments, until  
<sup>1970</sup> a 24 hour shift. The 10-minute step was a compromise between precision and calculation  
<sup>1971</sup> time. Next a correlation coefficient was calculated for each time step and temperature  
<sup>1972</sup> measurement depth. Finally the synchronisation was determined for each depth, by  
<sup>1973</sup> selecting the time-delay corresponding to the highest correlation coefficient. Negative  
<sup>1974</sup> correlations caused by the phase shift were discarded.

### <sup>1975</sup> 5.1.4 Sensitivity of ER to temperature

Three widely used models Fang et Moncrieff (2001) were implemented to study the relationship between ER and temperature : Linear regression (5.1), exponential models : Q<sub>10</sub> (5.2) and Arrhenius (5.3)

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

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

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

<sup>1976</sup> ER was estimated using air temperature, soil temperatures at -5, -10, -20 and -30

1977 cm depth with both non-synchronised and synchronised datasets. Calculations were  
1978 implemented in R, and modelled data were adjusted to measured data using Ordinary  
1979 Least Squares (OLS). The goodness-of-fit was estimated by calculating the regression  
1980 coefficient ( $R^2$ ) and the root mean square error normalized by the mean (NRMSE).

### 1981 5.1.5 Testing difference between daytime and nighttime ER 1982 sensitivity to temperature

1983 To test whether the relationship between ER and temperature differed during day-  
1984 time and nighttime, the dataset was split into two groups which were then compared.  
1985 The data between 10 am and 5 pm were considered as representative of the day and  
1986 data between 11 pm and 6 am as representative of the night. Only the air temperature  
1987 and the -5 cm depth peat temperature (with synchronised and non-synchronised data)  
1988 were investigated as they provide the best ER representation. The data for day and  
1989 night were centred to account for natural differences in measurement, since : during  
1990 the day both temperature and ER are higher than in the night. Using these centred  
1991 data, ratios between ER and temperatures were calculated. Finally a paired Student's  
1992 t test was applied on the mean of the replicate for each site and each temperature to  
1993 assess the significance of the differences between day and night measurements.

### 1994 5.1.6 Physico-chemical characterisation of the peat

1995 In the laboratory, two peat cores from each site were immersed in water during 24  
1996 hours to saturate the pores. Then, the cores were soaked overnight to get rid of the  
1997 water filling the effective porosity. At 5 cm steps, a piece of peat with a known volume  
1998 ( $V$ ,  $\text{cm}^3$ ) was cut and weighed ( $W_1$ , g). Then, the samples were dried at 50°C for 48  
1999 hours and weighed ( $W_2$ , g). Total porosity ( $\Phi_T$ , dimensionless), retention porosity ( $\Phi_R$ ,  
2000 dimensionless), effective porosity ( $\Phi_E$ , dimensionless) and bulk density ( $Bd$ ,  $\text{g cm}^{-3}$ )  
2001 were calculated as follows :

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

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

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

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

2002 Peat density ( $\rho_{peat}$ ) was set at 1.45 according to [Kennedy et Price \(2005\)](#). Then  
2003 the peat was crushed and C, H, N and S analyses were performed with an elemental  
2004 analyser (Thermo Flash analyser).

## 2005 5.2 Results

### 2006 5.2.1 Air temperature and ER variability

2007 Mean surface air temperatures were about 14-15 °C for all sites, except for LGT  
2008 which was  $20.8 \pm 7.4$  °C, (Figure 5.1 – H). The lowest mean temperature and amplitude  
2009 were found at BDZ :  $14.4 \pm 3.3$  °C (Figure 5.1 – E). In LDM and FRN, the mean surface  
2010 air temperatures were respectively  $14.9 \pm 8.7$  °C and  $15.0 \pm 10.3$  °C (Figure 5.1 – F,  
2011 G) Surface air temperature was the highest in FRN.

2012 At -5 cm depth, BDZ and LGT had lower mean temperatures than at the surface :  
2013  $14.1 \pm 1.5$  °C and  $20.3 \pm 1.7$  °C respectively, whereas the opposite was observed in FRN  
2014 and LDM with  $16.3 \pm 2.4$  °C and  $15.9 \pm 1.0$  °C respectively. Mean soil temperatures  
2015 were still higher at -10 cm for both sites, but only in LDM at -20 cm. At -30 cm  
2016 the soil temperature amplitude ranged from 0.2 in LDM to 0.6 in LGT and FRN.  
2017 Overall conditions were warmer in LGT than in the other sites and LDM, despite a  
2018 large amplitude of surface air temperature, had a particularly low soil temperature  
2019 amplitude.

## 5.2. Results

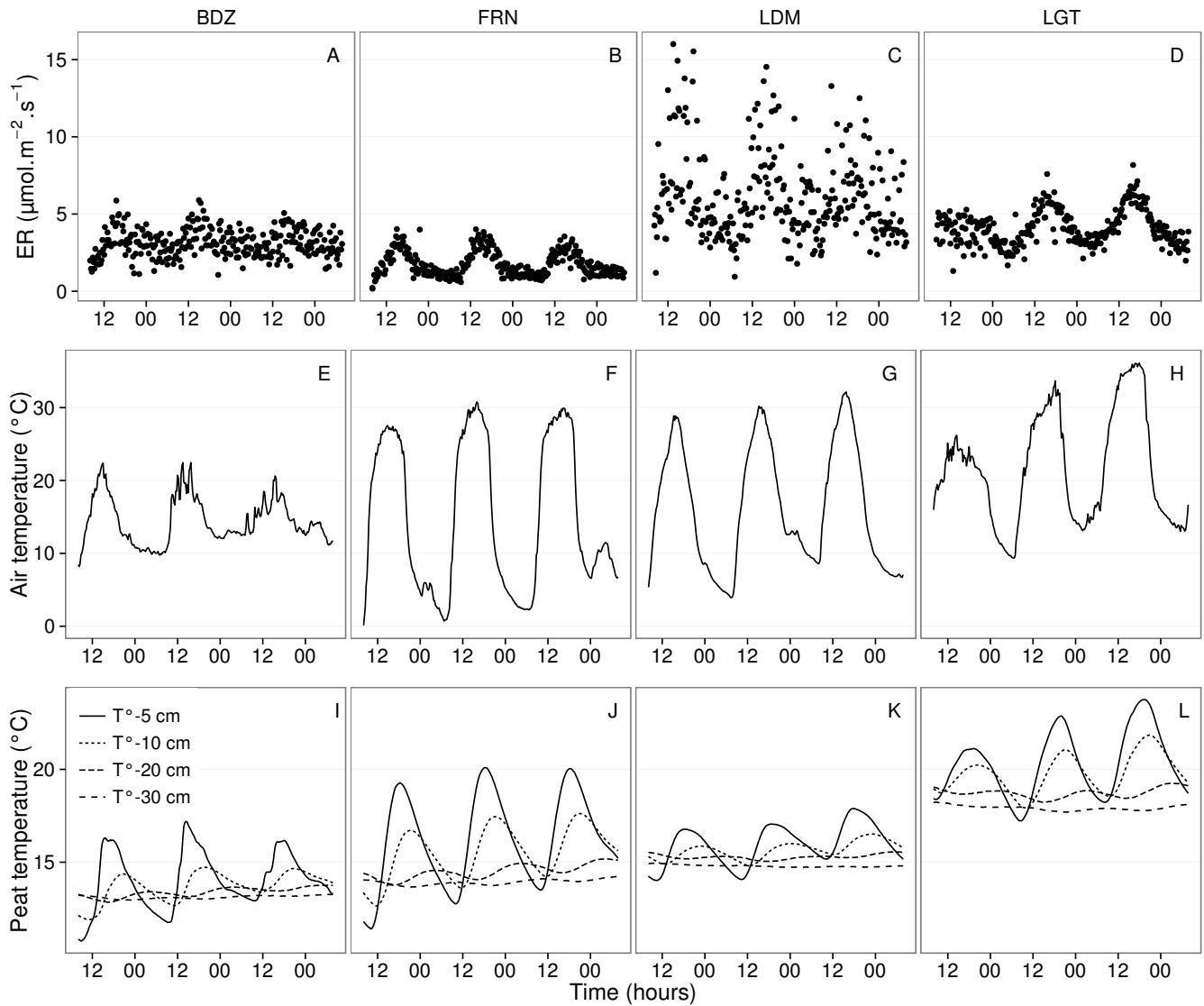


FIGURE 5.1 – Ecosystem Respiration (ER), air and peat temperature, in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT).

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  $3.12 \pm 0.92$  and  $4.10 \pm 1.15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  respectively (Figure 5.1 – A, B)

### 2026 5.2.2 ER and soil temperature synchronisation

2027 Figure 5.1 shows that the deeper the temperature was measured, the greater the  
 2028 shift with respect to ER. Taking this shift into account by synchronising soil tempera-  
 2029 tures with ER led to a significant positive linear correlation between the temperature  
 2030 measurement depth and the synchronisation time-delay (all sites pooled,  $R^2=0.94$ ,  
 2031  $p<0.001$ ; Figure 5.2). The range of estimated time-delays decreased with depth up to  
 2032 -20 cm. At this depth the time-delay was 12 hours, i.e. a phase inversion on a daily  
 2033 timescale. For the three sites other than LDM, the slopes of the time-delay and mea-  
 2034 surement depth relationship were in a close range : 0.56, 0.54, 0.52 for FRN, BDZ and  
 2035 LGT respectively. The relationship for LDM was higher at -30 cm, leading to a steeper  
 2036 slope (0.66) than in the other sites (Figure 5.2). At the other depths, this site always  
 2037 had the highest time-delay, though the values were close to those of the other sites.  
 2038 BDZ always had the lowest time-delay, but like LDM, the values were close to those of  
 2039 the other sites, although slightly lower at -5 cm depth.

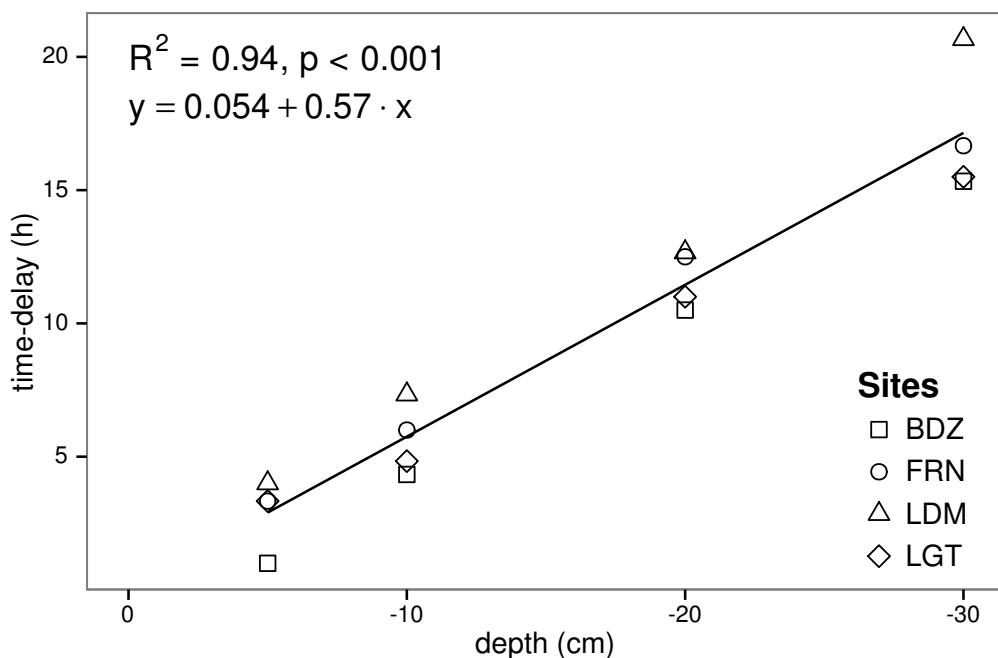


FIGURE 5.2 – Time delay between temperature at different depths and ER, in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT)

**2040 5.2.3 Model implementation**

2041 For both types of model (using non-synchronised and synchronised data), the dif-  
2042 ferences between the 3 tested models were very small. The greatest differences, in  $R^2$   
2043 values, were 0.07 and 0.05 for non-synchronised and synchronised data respectively,  
2044 whereas differences in NRMSE maximum values were 1.28 and 1.14 (Table 5.1). In  
2045 most cases the linear model led to a slightly better  $R^2$  than the others. As the diffe-  
2046 rences between equations were small, however, we will describe the exponential model  
2047 in the following sections, because (i) it is the most widely used model to describe the  
2048 ER-temperature relationship and (ii) the  $Q_{10}$  value can be derived from this equation.  
2049 This will allow the comparison of the results of our study to others.

**2050 5.2.4 ER and temperature relationship**

2051 The relationship between air temperature and ER, using the exponential model, was  
2052 better in LGT and FRN ( $R^2 > 0.55$ ) than in LDM and LDM ( $R^2 < 0.35$ ) (Table 5.1).  
2053 Nevertheless in all sites and with both linear and exponential models, using synchro-  
2054 nised soil temperatures gave a better account of the ER variability than their non-  
2055 synchronised counterparts (Figure 5.3). The goodness of fit ( $R^2$ ) increased on average  
2056 by 0.26 to 0.35 at -5 cm and -10 cm depth respectively. The degree of improvement  
2057 varied however between sites. For instance, at -5 cm depth  $R^2$  between synchronised  
2058 and non-synchronised models increased by only 0.04 in BDZ while it increased by 0.47  
2059 in FRN. The improvement gained by using synchronised data was higher at -5 cm and  
2060 -10 cm than at deeper layers, with 0.12, 0.11 on average for -20 and -30 cm depth  
2061 (Figure 5.3).

2062 A similar observation can be made for NRMSE. Regardless of some exceptions at  
2063 deeper layers especially at -20 cm depth, the NRMSE values show that using syn-  
2064 chronised data rather than non-synchronised ones improved the representation of ER  
2065 variability at a daily timescale, indicating that depth measurements dependence is  
2066 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<br>R <sup>2</sup> | NRMSE | exp<br>R <sup>2</sup> | NRMSE | arr<br>R <sup>2</sup> | NRMSE | lin<br>R <sup>2</sup> | NRMSE | exp<br>R <sup>2</sup> | NRMSE | arr<br>R <sup>2</sup> | NRMSE |
| <b>Bernadouze</b>  |                       |       |                       |       |                       |       |                       |       |                       |       |                       |       |
| 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 |
| <b>Frasne</b>      |                       |       |                       |       |                       |       |                       |       |                       |       |                       |       |
| 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 |
| <b>Landemarais</b> |                       |       |                       |       |                       |       |                       |       |                       |       |                       |       |
| 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    |
| <b>La Guette</b>   |                       |       |                       |       |                       |       |                       |       |                       |       |                       |       |
| 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

---

2067 data. However with increasing depth  $R^2$  values still decreased and NRMSE values still  
2068 increased. For FRN, LDM and LGT, synchronised data at -5 cm depth gave a better  
2069 account of the ER variability than surface air temperature (Figure 5.3). This was not  
2070 the case in LDM, where temperature at the surface was the best descriptor of ER. For  
2071 both  $R^2$  and NRMSE the values at -20 cm depth were better than those observed at  
2072 -10 or -30 cm depth. This pattern was observed with different magnitudes among sites,  
2073 and was particularly visible in FRN and LGT. For the most part, the synchronisation  
2074 of data led to higher  $R^2$  and NRMSE values for models using one soil temperature, at  
2075 a daily scale on *sphagnum*-dominated peatlands.

### 2076 5.2.5 $Q_{10}$ evolution

2077 The  $Q_{10}$  stood between 0 and 2.5 for non-synchronised data with a maximum at  
2078 -5 cm depth. Average values were 1.4, 2.4 and 1.3, at the surface, -5 and -10 cm depth  
2079 respectively (Figure 5.4). Average  $Q_{10}$  values at the surface and -10 cm depth were  
2080 very similar. However there was much more variability at -10 cm depth, where the  
2081 values ranged from 0.1 to 2.1, than at the surface where the values stood between 1.3  
2082 and 1.5. Beyond -10 cm depth  $Q_{10}$  values fell almost to 0, while for non-synchronised  
2083 data  $Q_{10}$  values greatly increased with depth, reaching meaningless values.  $Q_{10}$  values  
2084 estimated with surface temperature were very similar between sites with an average of  
2085 1.4 (Figure 5.4). It increased to about 2.5 at -5 cm depth, with both synchronised and  
2086 non-synchronised data. Below this depth,  $Q_{10}$  estimated with both methods either de-  
2087 creased downwards (non-synchronised) or increased (synchronised data) to unrealistic  
2088 values (Figure 5.4).

### 2089 5.2.6 Daytime and nighttime differences

2090 For BDZ and LDM sites no significant differences were found between daytime and  
2091 nighttime data no matter which model was used, whereas differences were found for  
2092 FRN and LGT (Figure 5.5). In FRN, synchronisation increased the significance of the  
2093 differences :  $p < 0.001$  with and  $p < 0.01$  without synchronisation respectively. The

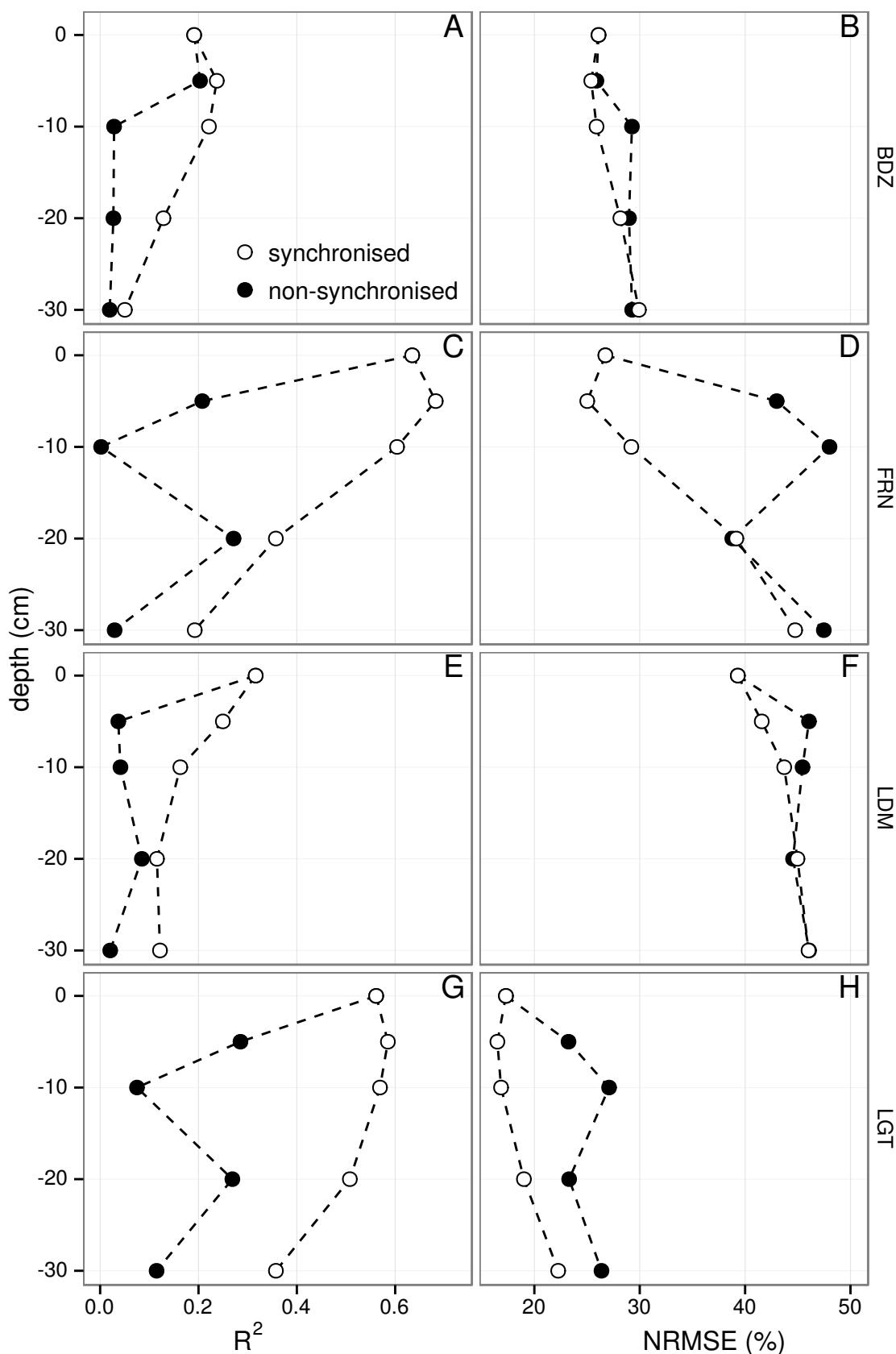


FIGURE 5.3 – Profile of  $R^2$  and NRMSE, (RMSE, normalized by the mean), with depth, in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT) using the exponential model.

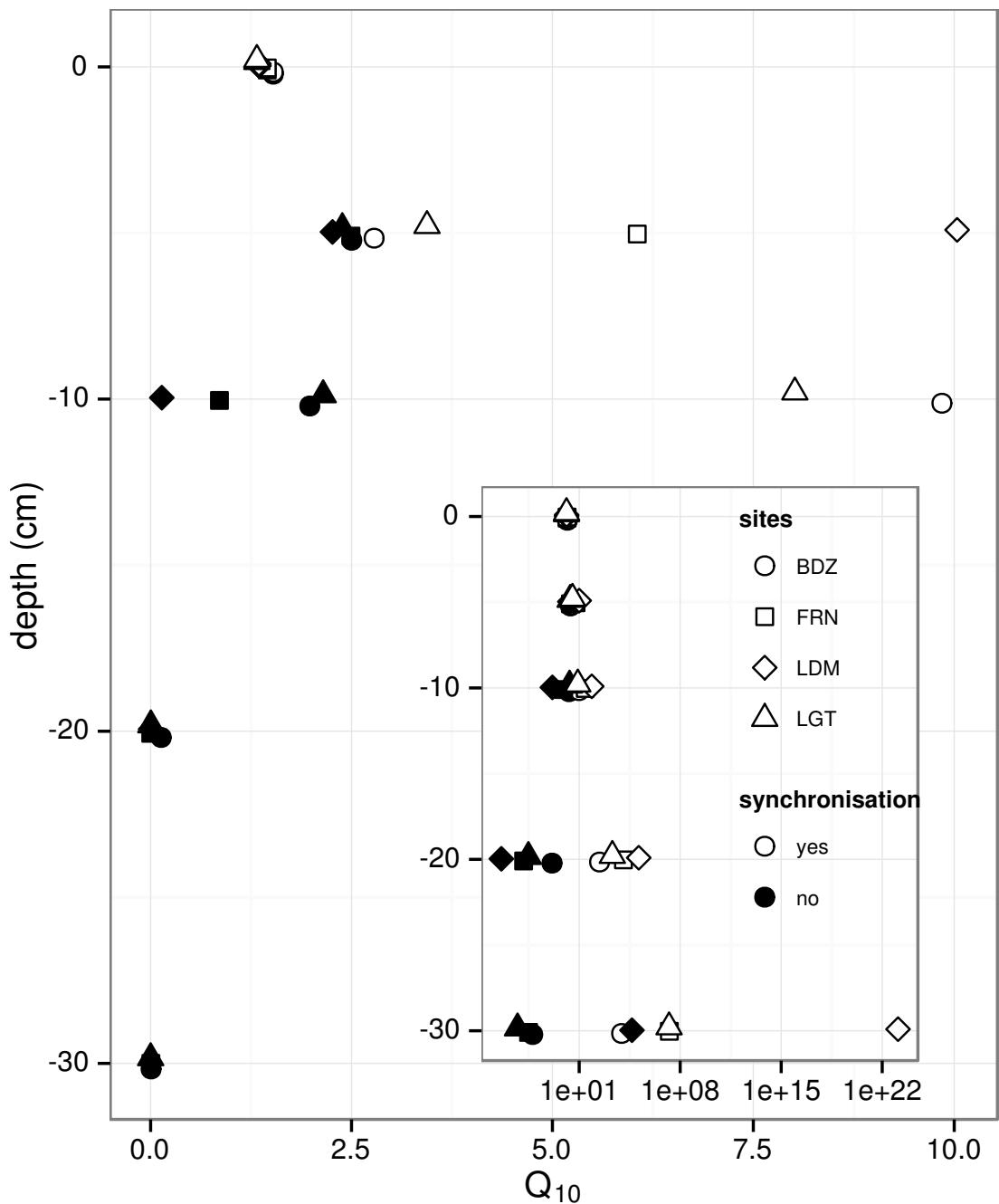


FIGURE 5.4 – Profile of  $Q_{10}$  with depth for synchronised (white) and non synchronised (black) data and exponential model in the 4 sites (Bernadouze : BDZ, Frasne : FRN, Landemarais : LDM, La Guette : LGT).

2094 same pattern was found in LGT but with lower significance. Hence models using -5  
2095 cm depth with non-synchronised data are not significantly different but those using  
2096 synchronised data are. Note that, for LGT, the model using air temperature had a  
2097 daytime slope that was higher than the nighttime one, which was the opposite of all  
2098 the other cases.

2099 **5.2.7 Peat characterisation**

2100 Elemental compositions were similar in all sites : 1–3%, 4–6% and <1% for N, H  
2101 and S respectively (Table 5.2). C content was mainly between 40 and 50 %, except at  
2102 the deeper levels in LDM and LGT where values were lower (< 32%).

2103 **5.3 Discussion**

2104 **5.3.1 ER differences between sites**

2105 The ER fluxes calculated in the 4 sites were in the same order of magnitude as those  
2106 of peatlands found in the literature. ?, for instance, found ER values ranging from 2  
2107 to 5 during the same period as this study, i.e. July to October 2004. In the present  
2108 study, the models performed poorly in 2 sites, BDZ and LDM. For BDZ, amplitudes of  
2109 both ER and temperatures were low (Figure 5.1 – A, E) making the representation of  
2110 ER possible only on a short temperature span. With such low ranges of both ER and  
2111 temperature, it can be assumed that ER variability was due to the variability between  
2112 plots. For LDM, the ER fluxes were measured in plots that were more heterogeneous  
2113 than expected, resulting in strong variability (Figure 5.1 – C). This observation is  
2114 consistent with the high NRMSE value calculated for this site (39.3 % for BDZ against  
2115 26.1 % for LDM) whereas the  $R^2$  values for these two sites were close, 0.19 and 0.32  
2116 for BDZ and LDM respectively, using surface air temperature and an exponential  
2117 relationship. It is noteworthy that in FRN the NRMSE values were high with respect

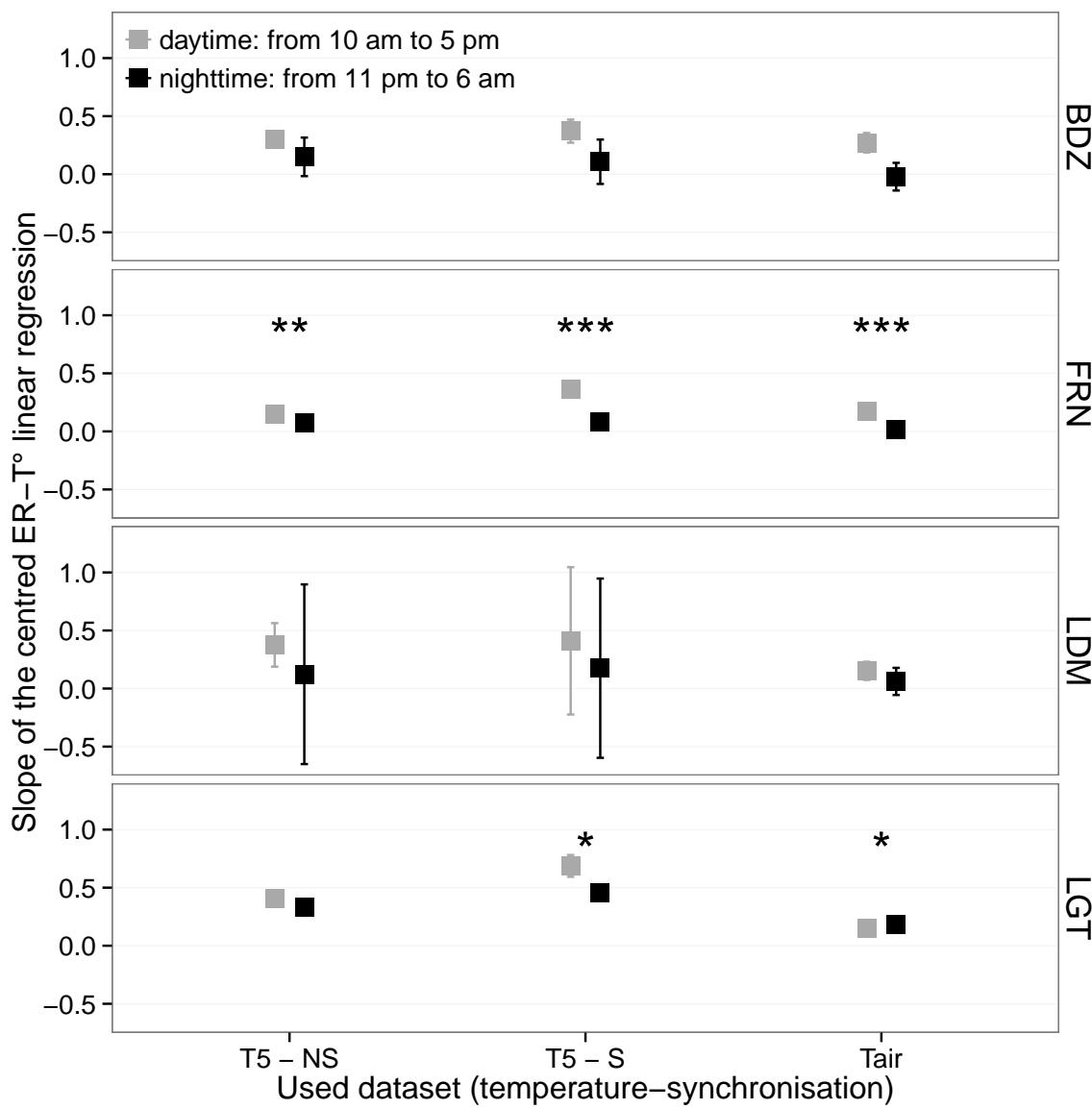


FIGURE 5.5 – Differences between daytime and nighttime measurements using 3 models : non-synchronised data at -5 cm depth temperature (T5 – NS), synchronised data at -5 cm depth temperature (T5 – S), and non-synchronised data at air temperature (Tair).

Tableau 5.2 – Peat chemical properties as a function of depth in cm : content (%) N, C, H, S, the total, retention and effective porosity,  $\Phi_T$ ,  $\Phi_R$ ,  $\Phi_E$  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    | $\Phi_T$ | $\Phi_R$ | $\Phi_E$ | 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 |

### 5.3. Discussion

---

2118 to  $R^2$  values. This result can be explained by the fact that the mean ER flux was  
2119 low ( $1.75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) and thus had a strong influence on NRMSE as we used mean  
2120 normalization. Finally at -20 cm depth, models using non-synchronised data showed,  
2121 an increase in  $R^2$  and a decrease in NRMSE which was more or less observable in  
2122 the different sites : clearly in FRN, LGT and to a lesser extent in LDM, but barely  
2123 perceptible in BDZ. At this depth the temperature and the ER signal phases are  
2124 opposed making the non-synchronised models better at representing ER than at -10  
2125 or -30 centimetres but with a reverse relationship. The ER fluxes thus show different  
2126 behaviours either in their amplitude or in their homogeneity

#### 2127 5.3.2 Time-delay between temperature and ER

2128 Time-delays between soil temperatures and ER occur in *Sphagnum*-dominated peat-  
2129 lands. They occur even close to the soil surface and increase with depth. The relation-  
2130 ship between time-delays and depth was similar in all the studied sites although LDM  
2131 had slightly higher time-delays. The overall delay observed in peat soils, 0.57 hours  
2132 per centimetre, was higher than those found by [Pavelka et al. \(2007\)](#) in a forest and  
2133 in a grassland ecosystem and by [Parkin et Kaspar \(2003\)](#) on two agricultural soils (0.4  
2134 and 0.5 hours per centimetre respectively). This is coherent with the fact that peat soil  
2135 has a lower thermal diffusivity than mineral soils ([Farouki, 1981; Arya, 2001](#)). LDM  
2136 was the only site with a slightly higher slope especially at -30 cm. This was expected  
2137 as soil diffusivity increases with wetness ([Hillel, 2003](#)) and LDM was the site with the  
2138 lowest water table level. This was confirmed by thermal conductivity measurements  
2139 conducted on the peat cores (data not shown). Overall, it should be noted that the  
2140 time-delays were similar in all the studied sites despite their variability in terms of ER  
2141 fluxes.

2142 **5.3.3 Synchronising ER and temperature improves ER sensit-**  
2143 **vity to temperature representation**

2144 In spite of the importance of lags between physical phenomenona and biological  
2145 activities ([Vargas et al., 2010](#)), few studies have addressed the effect of time-delays bet-  
2146 ween soil temperature and global biological activity (ER) at the daily timescale. At this  
2147 scale, we showed in peatlands that using synchronised data improved the representation  
2148 of the temperature sensitivity of ER. The improvement provided by synchronisation  
2149 was evidenced at shallow depth. The best goodness-of-fit obtained with synchronised  
2150 data and models using one temperature, was found at -5 cm depth. These observations  
2151 are in agreement with those of [Pavelka et al. \(2007\)](#) who also found a decreasing ef-  
2152 fect of synchronisation with depth. Such a lesser depth effect could be explained by  
2153 a simultaneous decrease in temperature amplitude. Because the goodness-of-fit of the  
2154 non-synchronised data increases at -20 cm, the synchronisation effect strongly decreases  
2155 at this depth. This pattern is visible, with various amplitudes, in the different sites.  
2156 It is explained by the 12 h time-delay (Figure 5.2) corresponding to a phase inversion  
2157 that occurs at this depth between the ER and the daily temperature courses. Such a  
2158 phase inversion was found deeper, at -30 cm by [Pavelka et al. \(2007\)](#), due to a higher  
2159 temperature diffusivity in mineral soils. Finally in our study these models, using syn-  
2160 chronised -5 cm depth temperature, show slightly higher  $R^2$  and lower NRMSE values  
2161 than those using surface air temperature.

2162 **5.3.4 Differences between daytime and nighttime ER measure-**  
2163 **ments**

2164 The significant differences observed between daytime and nighttime measurements  
2165 corroborate other studies in which these differences were found using chamber tech-  
2166 niques ([Juszczak et al., 2012](#); [Darenova et al., 2014](#)). The fact that some sites show  
2167 significant differences (FRN and LGT) and not others (BDZ and LDM) seems to be  
2168 linked to the variability between plots and temperature amplitude. When temperature

## 5.4. Conclusions

---

2169 amplitude was low, most of the variability originated from spatial variability between  
2170 plots. This was also corroborated by a test done on LGT where we calculated the day  
2171 and night differences only on the last two days when temperature amplitude was the  
2172 greatest. As a result the significance increased from  $p < 0.05$  to  $p < 0.01$  for the syn-  
2173 chronised model using -5 cm depth temperature and the differences observed in the  
2174 model using air temperature were no longer significant any more ( $p > 0.05$ ).

### 2175 5.3.5 $Q_{10}$ sensitivity to temperature depth and synchronisation

2176 In shallow layers ( $\leq 10$  cm), the  $Q_{10}$  values calculated with non-synchronised data  
2177 in the ranges that are usually reported, i.e. between 1.3 to 3.3 (Raich et Schlesinger,  
2178 1992). At deeper levels in the peat profile ( $\geq 10$  cm), they reach 0 as the relationship  
2179 between ER and the temperature weakens, and is not compensated by a long term  
2180 evolution. A similar behaviour was found by Pavelka et al. (2007) even if this  $Q_{10}$   
2181 decrease with depth is not usually seen and most studies show the opposite, namely  
2182 an increase in  $Q_{10}$  values with depth (Graf et al., 2008). This apparent contradiction  
2183 may be explained by the length of the study. Because of its short duration, the effect of  
2184 the time-delays on ER were preponderant over the temperature effect. Synchronisation  
2185 also led to meaningless high  $Q_{10}$  values because synchronisation can explain a higher  
2186 proportion of ER flux with a smaller temperature variation. Temperature amplitude  
2187 decreases with depth because of soil dampening.

## 2188 5.4 Conclusions

2189 We showed that the time-delays between ER and soil temperatures at different  
2190 depths are significant on a daily timescale as the signals are shifted 30 minutes every  
2191 centimetre. At this scale the use of synchronised soil temperature, to take into account  
2192 these time-delays, can improve the representation of ER particularly in the first 10  
2193 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.

## Acknowledgements

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



<sup>2213</sup> Synthèse et perspectives

## 5.5. Bilan du bilan (de C) ?

---

2214 L'étude des flux de carbone dans les écosystèmes tourbeux est complexe car assu-  
2215 jetti à des facteurs de contrôle dont la prépondérance varie fortement selon l'échelle  
2216 considérée et les conditions environnementales. Les effets d'un facteur contrôlant sur  
2217 un flux de gaz vont généralement dans le même sens dans la littérature : une hausse  
2218 de la température à tendance à augmenter les flux. Une augmentation du niveau de  
2219 la nappe à tendance à favoriser la production de CH<sub>4</sub> par rapport à celle du CO<sub>2</sub>. La  
2220 végétation semble faciliter les échanges de gaz et libère des substrats facilement mo-  
2221 bilitables. Outre le fait que ces facteurs co-varient et qu'il donc difficile de distinguer  
2222 leurs effets, ces effets sur les différents flux en terme de bilan de carbone est beaucoup  
2223 moins nette, d'où la nécessité d'estimer des bilans de carbone sur ces écosystèmes.

## 2224 5.5 Bilan du bilan (de C) ?

2225 Les observations réalisées sur la tourbière de La Guette ont permis de mettre en  
2226 évidence des flux de CO<sub>2</sub> particulièrement fort que ce soit pour la RE ou la PPB. Ces  
2227 flux annuels, plus fort que ceux relevés dans les tourbières boréales, sont cependant  
2228 moins important que ceux mesurés dans des tourbières utilisées comme pâties per-  
2229 manentes. Ces observations sont cohérentes avec les observations de terrain. En effet  
2230 la présence d'une végétation vasculaire herbacée largement dominante (*Molinia caeru-*  
2231 *lea*) rapproche davantage la tourbière de La Guette d'une prairie tourbeuse que d'une  
2232 tourbière boréale où prédomine les sphaignes. Le niveau de la nappe particulièrement  
2233 élevé pendant les deux années de mesure a probablement limité en partie les flux de  
2234 CO<sub>2</sub> sans pour autant les empêcher. En effet à la fois *Molinia caerulea* et *Eriophorum*  
2235 *Augustifolium* (*Vaginatum* oui mais *augustifolium* ?) possèdent un aérenchyme, cette  
2236 adaptation aux milieux inondés leur permettant de maintenir des échanges gazeux de  
2237 leurs racines à l'atmosphère. Par ailleurs la situation géographique locale et globale du  
2238 site : une tourbière de plaine située à basse latitude, joue également sur la saisonna-  
2239 lité 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 CH<sub>4</sub> ne semblent quant à eux pas être constraint 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 CO<sub>2</sub>. Le nombre limité de points de mesure du CH<sub>4</sub> 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.

### 5.5.1 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<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> et sont représentés par le fond gris

## 5.6. L'hydrologie

---

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 3.9b). 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 comparaison montre également l'importance de la variabilité spatiale des flux dans les tourbières et la difficulté qu'il peut y avoir à la prendre en compte de façon satisfaisante.

## 5.6 L'hydrologie

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

### 5.6.1 Résilience de la tourbe par rapport aux 2 années sèches qui précédent le BdC

(lien chap 3 et 4)

Les prendre en compte améliorerait-il les modèles modèles globaux ? **limitations des équations** : Plus généralement, la majorité

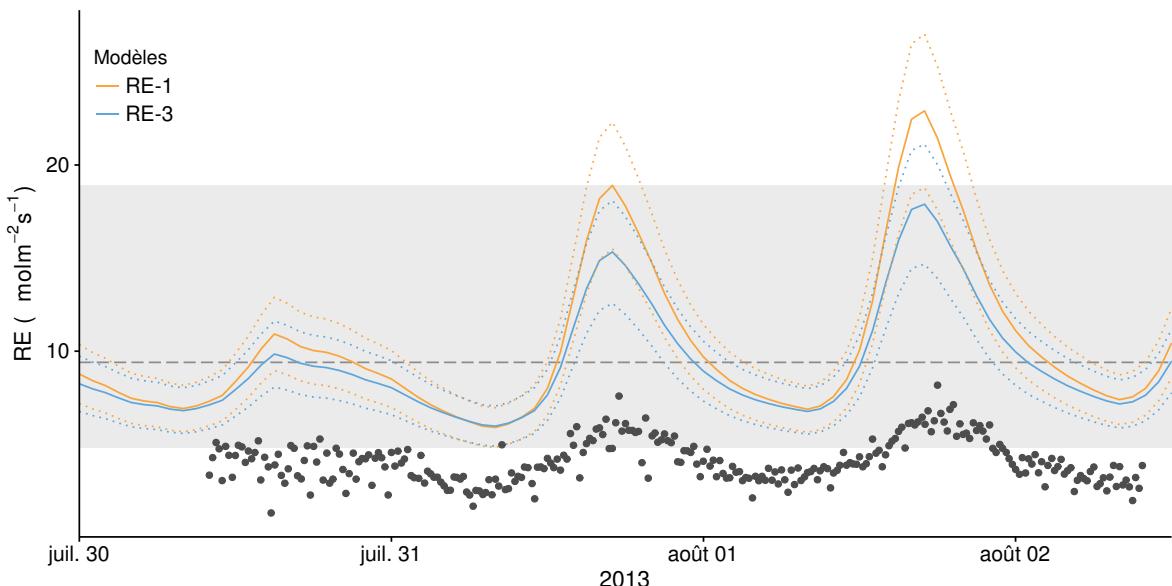


FIGURE 5.6 – Comparaison entre les valeurs estimées par les modèles RE-1 (ligne orange), RE-3 (ligne bleue) et les mesures faites à haute fréquence sur le site du 30 juillet au 2 août 2013 (points noirs). Les lignes de pointillés représentent l'erreur (NRMSE) associée aux modèles. La zone grisée correspond 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.

<sup>2293</sup> des tourbières sont sous la neige une partie de l'année, ce qui n'arrive que rarement sur  
<sup>2294</sup> la tourbière de La Guette et une partie possède également des zones d'eau libre, qui  
<sup>2295</sup> n'existent pas sur ce site.

<sup>2296</sup> modèles globaux et profondeur de tourbe

## <sup>2297</sup> 5.7 Ouverture vers d'autre méthodes de me- <sup>2298</sup> sures

- <sup>2299</sup> — chambre automatique (lien chap 5, et chap 3 ?)
- <sup>2300</sup> — tour eddy covariance (lien chap 5 et chap 3 ?)

## <sub>2301</sub> 5.8 perspectives

<sub>2302</sub> La suite du projet CARBIODIV permettra peut être de mettre en évidence l'effet  
<sub>2303</sub> de la restauration.

<sub>2304</sub> Un partenariat avec le LSCE commencé pendant ces travaux devra permettre de  
<sub>2305</sub> valoriser ces données à des échelles plus importante. Des données on d'ors et déjà été  
<sub>2306</sub> envoyée à Chloé XX qui développe un code "tourbière" dans le modèle ORCHIDEE.

<sub>2307</sub> L'installation prochaine d'une tour eddy covariance sur le site permettra de com-  
<sub>2308</sub> parer ce bilan à des mesures plus haute fréquence.

<sub>2309</sub> Modèles : PCARS (frolking2002), MWM (Wu2013), TOPMODEL (Stocker2014)

## <sub>2310</sub> 5.9 idées

<sub>2311</sub> L'amélioration du protocole de végétation (RVI?)

<sub>2312</sub> Amélioration des chambres (contrôle de la température? de la vitesse du ventila-  
<sub>2313</sub> teur? plus grande? aquisition automatisée du PAR sur la chambre)

<sub>2314</sub> l'inclusion des arbres

<sub>2315</sub> Correction du volume par pondération de la surface

<sub>2316</sub> Utilisation de chambres automatiques/EC

<sub>2317</sub> Humidité du sol

<sub>2318</sub> Propriétés physique de la tourbe (en cours)

<sub>2319</sub> Bibliographie

- <sub>2320</sub> AERTS, R. et LUDWIG, F. (1997). Water-table changes and nutritional status affect  
<sub>2321</sub> trace gas emissions from laboratory columns of peatland soils. *Soil Biology and*  
<sub>2322</sub> *Biochemistry*, 29(11–12):1691–1698.
- <sub>2323</sub> ALM, J., SAARNIO, S., NYKÄNEN, H., SILVOLA, J. et MARTIKAINEN, P. (1999). Winter  
<sub>2324</sub> CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes on some natural and drained boreal peatlands. *Biogeo-*  
<sub>2325</sub> *chemistry*, 44(2):163–186.
- <sub>2326</sub> ALM, J., TALANOV, A., SAARNIO, S., SILVOLA, J., IKKONEN, E., AALTONEN, H.,  
<sub>2327</sub> NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1997). Reconstruction of the carbon balance  
<sub>2328</sub> for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland. *Oecologia*, 110:423–431.
- <sub>2329</sub> ANDREJKO, M. J., FIENE, F. et COHEN, A. D. (1983). Comparison of ashing techniques  
<sub>2330</sub> for determination of the inorganic content of peats. In *Testing of Peats and Organic*  
<sub>2331</sub> *Soils : A Symposium*, volume 820, pages 5–10. ASTM International.
- <sub>2332</sub> ARCHER, D., EBY, M., BROVKIN, V., RIDGWELL, A., CAO, L., MIKOŁAJEWICZ, U.,  
<sub>2333</sub> CALDEIRA, K., MATSUMOTO, K., MUNHOVEN, G., MONTENEGRO, A. et OTHERS  
<sub>2334</sub> (2009). Atmospheric lifetime of fossil fuel carbon dioxide. *Annu. Rev. Earth Planet.*  
<sub>2335</sub> *Sci.*, 37(1):117.
- <sub>2336</sub> ARYA, S. P. (2001). *Introduction to Micrometeorology*, volume 79 de *International*  
<sub>2337</sub> *Geophysics Series*. Academic Press.
- <sub>2338</sub> AURELA, M., RIUTTA, T., LAURILA, T., TUOVINEN, J.-P., VESALA, T., TUITILA,  
<sub>2339</sub> E.-S., RINNE, J., HAAPANALA, S. et LAINE, J. (2007). CO<sub>2</sub> exchange of a sedge fen  
<sub>2340</sub> in southern Finland—the impact of a drought period. *Tellus B*, 59(5):826–837.
- <sub>2341</sub> BALLANTYNE, D. M., HRIBLJAN, J. A., PYPKER, T. G. et CHIMNER, R. A. (2014).  
<sub>2342</sub> Long-term water table manipulations alter peatland gaseous carbon fluxes in nor-  
<sub>2343</sub> thern Michigan. *Wetlands Ecol. Manage.*, 22(1):35–47.
- <sub>2344</sub> BATJES, N. H. (1996). Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *Eur. J. Soil*  
<sub>2345</sub> *Sci.*, 47(2):151–163.
- <sub>2346</sub> BEER, C., REICHSTEIN, M., TOMEILLERI, E., CIAIS, P., JUNG, M., CARVALHAIS, N.,  
<sub>2347</sub> RÖDENBECK, C., ARAIN, M. A., BALDOCCHI, D., BONAN, G. B., BONDEAU, A.,  
<sub>2348</sub> CESCATTI, A., LASSLOP, G., LINDROTH, A., LOMAS, M., LUSSAERT, S., MARGO-  
<sub>2349</sub> LIS, H., OLESON, K. W., ROUPSARD, O., VEENENDAAL, E., VIOVY, N., WILLIAMS,  
<sub>2350</sub> C., WOODWARD, F. I. et PAPALE, D. (2010). Terrestrial Gross Carbon Dioxide Up-  
<sub>2351</sub> take : Global Distribution and Covariation with Climate. *Science*, 329(5993):834–838.
- <sub>2352</sub> BELLISARIO, L. M., BUBIER, J. L., MOORE, T. R. et CHANTON, J. P. (1999). Controls  
<sub>2353</sub> on CH<sub>4</sub> emissions from a northern peatland. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(1):81–  
<sub>2354</sub> 91.

- 2355 BLODAU, C. (2002). Carbon cycling in peatlands. A review of processes and controls.  
 2356     *Environmental Reviews*, 10(2):111–134.
- 2357 BLODAU, C., BASILIKO, N. et MOORE, T. R. (2004). Carbon turnover in peatland  
 2358     mesocosms exposed to different water table levels. *Biogeochemistry*, 67(3):331–351.
- 2359 BOND-LAMBERTY, B. et THOMSON, A. (2010). Temperature-associated increases in  
 2360     the global soil respiration record. *Nature*, 464(7288):579–582.
- 2361 BORTOLUZZI, E., EPron, D., SIEGENTHALER, A., GILBERT, D. et BUTTLER, A.  
 2362     (2006). Carbon balance of a European mountain bog at contrasting stages of re-  
 2363     generation. *New Phytol.*, 172(4):708–718.
- 2364 BUBIER, J. (1995). The relationship of vegetation to methane emission and hydroche-  
 2365     mical gradients in northern peatlands. *J Ecol*, 83(3):403–420.
- 2366 BUBIER, J., COSTELLO, A., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et SAVAGE, K. (1993).  
 2367     Microtopography and methane flux in boreal peatlands, northern Ontario, Canada.  
 2368     *Canadian Journal of Botany*, 71(8):1056–1063.
- 2369 BUBIER, J. L., BHATIA, G., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et LAFLEUR, P. M. (2003).  
 2370     Spatial and Temporal Variability in Growing-Season Net Ecosystem Carbon Dioxide  
 2371     Exchange at a Large Peatland in Ontario, Canada. *Ecosystems*, 6:353–367.
- 2372 BUBIER, J. L., CRILL, P. M., MOORE, T. R., SAVAGE, K. et VARNER, R. K. (1998).  
 2373     Seasonal patterns and controls on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in a boreal peatland  
 2374     complex. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(4):703–714.
- 2375 BUBIER, J. L., MOORE, T. R., BELLISARIO, L., COMER, N. T. et CRILL, P. M. (1995).  
 2376     Ecological controls on methane emissions from a Northern Peatland Complex in the  
 2377     zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada. *Global Biogeochemical Cycles*,  
 2378     9(4):455–470.
- 2379 BUCKLAND, P. C. (1993). Peatland archaeology : a conservation resource on the edge  
 2380     of extinction. *Biodivers. Conserv.*, 2(5):513–527.
- 2381 CAI, T., FLANAGAN, L. B. et SYED, K. H. (2010). Warmer and drier conditions  
 2382     stimulate respiration more than photosynthesis in a boreal peatland ecosystem :  
 2383     Analysis of automatic chambers and eddy covariance measurements. *Plant Cell  
 2384     Environ.*, 33(3):394–407.
- 2385 CHAPIN, F., WOODWELL, G., RANDERSON, J., LOVETT, G., RASTETTER, E., BAL-  
 2386     DOCCHI, D., CLARK, D., HARMAN, M., SCHIMEL, D., VALENTINI, R., WIRTH, C.,  
 2387     ABER, J., COLE, J., GIBLIN, A., GOULDEN, M., HARDEN, J., HEIMANN, M., HO-  
 2388     WARTH, R., MATSON, P., MCGUIRE, A., MELILLO, J., MOONEY, H., NEFF, J.,  
 2389     HOUGHTON, R., PACE, M., RYAN, M., RUNNING, S., SALA, O., SCHLESINGER, W.  
 2390     et SCHULZE, E.-D. (2006). Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and me-  
 2391     thodology. *Ecosystems*, 9:1041–1050.
- 2392 CHAPMAN, S., BUTTLER, A., FRANCEZ, A.-J., LAGGOUN-DÉFARGE, F., VASANDER,  
 2393     H., SCHLOTER, M., COMBE, J., GROSVERNIER, P., HARMS, H., EPron, D. et  
 2394     OTHERS (2003). Exploitation of northern peatlands and biodiversity maintenance :  
 2395     a conflict between economy and ecology. *Front. Ecol. Environ.*, 1(10):525–532.

- 2396 CHRISTENSEN, J. H., HEWITSON, B., BUSUIOC, A., CHEN, A., GAO, X., HELD, R.,  
 2397 JONES, R., KOLLI, R. K., KWON, W. K., LAPRISE, R. et OTHERS (2007). Regional  
 2398 climate projections. *Clim. Change 2007 Phys. Sci. Basis Contrib. Work. Group*  
 2399 *Fourth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Change Univ. Press Camb. Chapter 11*,  
 2400 pages 847–940.
- 2401 CHRISTENSEN, J. H., KANIKICHLARLA, K. K., MARSHALL, G. et TURNER, J. (2013).  
 2402 Climate phenomena and their relevance for future regional climate change.
- 2403 CIAIS, P., SABINE, C., BALA, G., BOPP, L., BROVKIN, V., CANADELL, J., CHHABRA,  
 2404 A., DEFRIES, R., GALLOWAY, J., HEIMANN, M. et OTHERS (2014). Carbon and  
 2405 other biogeochemical cycles. In *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis.*  
 2406 *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 465–570. Cambridge University Press.
- 2408 CLYMO, R. S., TURUNEN, J. et TOLONEN, K. (1998). Carbon accumulation in peat-  
 2409 land. *Oikos*, pages 368–388.
- 2410 COLES, J. R. et YAVITT, J. B. (2002). Control of methane metabolism in a forested  
 2411 northern wetland, New York State, by aeration, substrates, and peat size fractions.  
 2412 *Geomicrobiol. J.*, 19(3):293–315.
- 2413 COLMER, T. D. (2003). Long-distance transport of gases in plants : a perspective on  
 2414 internal aeration and radial oxygen loss from roots. *Plant Cell Environ.*, 26(1):17–36.
- 2415 CORNELISSEN, J. H., LANG, S. I., SOUDZILOVSKAIA, N. A. et DURING, H. J. (2007).  
 2416 Comparative cryptogam ecology : a review of bryophyte and lichen traits that drive  
 2417 biogeochemistry. *Ann. Bot.*, 99(5):987–1001.
- 2418 CROW, S. E. et WIEDER, R. K. (2005). Sources of CO<sub>2</sub> emission from a northern  
 2419 peatland : root respiration, exudation, and decomposition. *Ecology*, 86(7):1825–1834.
- 2420 CURIEL YUSTE, J., JANSSENS, I. A., CARRARA, A. et CEULEMANS, R. (2004). Annual  
 2421 Q<sub>10</sub> of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature  
 2422 sensitivity. *Global Change Biol.*, 10(2):161–169.
- 2423 DARENOVA, E., PAVELKA, M. et ACOSTA, M. (décembre 2014). Diurnal deviations  
 2424 in the relationship between CO<sub>2</sub> efflux and temperature : A case study. *CATENA*,  
 2425 123:263–269.
- 2426 DAVIDSON, E. A., JANSSENS, I. A. et LUO, Y. (2006). On the variability of respiration  
 2427 in terrestrial ecosystems : moving beyond Q<sub>10</sub>. *Global Change Biol.*, 12(2):154–164.
- 2428 DINSMORE, K. J., SKIBA, U. M., BILLETT, M. F. et REES, R. M. (2009). Effect  
 2429 of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms. *Plant Soil*,  
 2430 318(1-2):229–242.
- 2431 ESWARAN, H., VAN DEN BERG, E. et REICH, P. (1993). Organic carbon in soils of  
 2432 the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57(1):192–194.
- 2433 FANG, C. et MONCRIEFF, J. (2001). The dependence of soil CO<sub>2</sub> efflux on temperature.  
 2434 *Soil Biol. Biochem.*, 33(2):155–165.

- 2435 FAROUKI, O. (1981). *Thermal properties of soils*. Series on rock and soil mechanics.  
2436 Trans Tech Pub., Rockport, MA.
- 2437 FARQUHAR, G. D., VON CAEMMERER, S. et BERRY, J. A. (1980). A biochemical model  
2438 of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C3 species. *Planta*, 149(1):78–90.
- 2439 FRANCEZ, A.-J. (2000). La dynamique du carbone dans les tourbières à Sphagnum,  
2440 de la sphaine à l'effet de serre. *L'Année Biologique*, 39:205–270.
- 2441 FROLKING, S., TALBOT, J., JONES, M. C., TREAT, C. C., KAUFFMAN, J. B., TUIT-  
2442 TILA, E.-S. et ROULET, N. (2011). Peatlands in the Earth's 21st century climate  
2443 system. *Environ. Rev.*, 19(NA):371–396.
- 2444 GIRARD, M. C., WALTER, C., REMY, J. C., BERTHELIN, J. et MOREL, J. L. (2011).  
2445 *Sols et Environnement, (2e édn)*, volume 28 de *Sciences Sup*. Editions Dunod : Paris,  
2446 Vottem, Belgique, 2nd édition édition.
- 2447 GOGO, S., GUIMBAUD, C., LAGGOUN-DÉFARGE, F., CATOIRE, V. et ROBERT, C.  
2448 (2011). In situ quantification of CH<sub>4</sub> bubbling events from a peat soil using a new  
2449 infrared laser spectrometer. *Journal of Soils and Sediments*, 11:545–551.
- 2450 GORHAM, E. (1991). Northern Peatlands : Role in the Carbon Cycle and Probable  
2451 Responses to Climatic Warming. *Ecol. Appl.*, 1(2):182–195.
- 2452 GORNALL, J. L., WOODIN, S. J., JÓNSDÓTTIR, I. S. et van der WAL, R. (2011).  
2453 Balancing positive and negative plant interactions : how mosses structure vascular  
2454 plant communities. *Oecologia*, 166(3):769–782.
- 2455 GÖRRES, C. M., KUTZBACH, L. et ELSGAARD, L. (2014). Comparative modeling of  
2456 annual CO<sub>2</sub> flux of temperate peat soils under permanent grassland management.  
2457 *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 186:64–76.
- 2458 GRAF, A., WEIHERMÜLLER, L., HUISMAN, J. A., HERBST, M., BAUER, J. et VEREE-  
2459 CKEN, H. (2008). Measurement depth effects on the apparent temperature sensitivity  
2460 of soil respiration in field studies. *Biogeosciences*, 5(3):1867–1898.
- 2461 GUIMBAUD, C., CATOIRE, V., GOGO, S., ROBERT, C., CHARTIER, M., LAGGOUN-  
2462 DÉFARGE, F., GROSSEL, A., ALBÉRIC, P., POMATHIOD, L., NICOUILLAUD, B. et  
2463 RICHARD, G. (2011). A portable infrared laser spectrometer for flux measurements  
2464 of trace gases at the geosphere-atmosphere interface. *Measurement Science & Tech-*  
2465 *nology*, 22(7):1–17.
- 2466 GUNNARSSON, U. (2005). Global patterns of Sphagnum productivity. *Journal of*  
2467 *Bryology*, 27(3):269–279.
- 2468 GÜNTHER, A., HUTH, V., JURASINSKI, G. et GLATZEL, S. (2014). The effect of bio-  
2469 mass harvesting on greenhouse gas emissions from a rewetted temperate fen. *GCB*  
2470 *Bioenergy*, pages n/a–n/a.
- 2471 HARRIS, D. C. (2010). Charles David Keeling and the Story of Atmospheric CO<sub>2</sub>  
2472 Measurements†. *Anal. Chem.*, 82(19):7865–7870.

- 2473 HILLEL, D. (2003). Soil temperature and heat flow. In *Introduction to Environmental*  
2474 *Soil Physics*. Academic Press. {DOI :10.1016/B978-012348655-4/50013-7}.
- 2475 HOBBIE, S. E. (1996). Temperature and plant species control over litter decomposition  
2476 in Alaskan tundra. *Ecol. Monogr.*, 66(4):503–522.
- 2477 ISE, T., DUNN, A. L., WOFSY, S. C. et MOORCROFT, P. R. (2008). High sensitivity of  
2478 peat decomposition to climate change through water-table feedback. *Nat. Geosci.*,  
2479 1(11):763–766.
- 2480 JACOBS, C. M. J., JACOBS, A. F. G., BOSVELD, F. C., HENDRIKS, D. M. D., HENSEN,  
2481 A., KROON, P. S., MOORS, E. J., NOL, L., SCHRIER-UIJL, A. et VEENENDAAL, E. M.  
2482 (2007). Variability of annual CO<sub>2</sub> exchange from Dutch grasslands. *Biogeosciences*,  
2483 4(5):803–816.
- 2484 JOABSSON, A., CHRISTENSEN, T. R. et WALLÉN, B. (1999). Vascular plant controls  
2485 on methane emissions from northern peatforming wetlands. *Trends in Ecology &*  
2486 *Evolution*, 14(10):385–388.
- 2487 JONES, M. C. et YU, Z. (2010). Rapid deglacial and early Holocene expansion of  
2488 peatlands in Alaska. *PNAS*, 107(16):7347–7352.
- 2489 JOOS, F., ROTH, R., FUGLESTVEDT, J. S., PETERS, G. P., ENTING, I. G., VON BLOH,  
2490 W., BROVKIN, V., BURKE, E. J., EBY, M., EDWARDS, N. R., FRIEDRICH, T., FRÖ-  
2491 LICHER, T. L., HALLORAN, P. R., HOLDEN, P. B., JONES, C., KLEINEN, T., MAC-  
2492 KENZIE, F. T., MATSUMOTO, K., MEINSHAUSEN, M., PLATTNER, G.-K., REISINGER,  
2493 A., SEGGSCHNEIDER, J., SHAFFER, G., STEINACHER, M., STRASSMANN, K.,  
2494 TANAKA, K., TIMMERMANN, A. et WEAVER, A. J. (2013). Carbon dioxide and  
2495 climate impulse response functions for the computation of greenhouse gas metrics :  
2496 a multi-model analysis. *Atmos. Chem. Phys.*, 13(5):2793–2825.
- 2497 JOOSTEN, H. et CLARKE, D. (2002). *Wise use of mires and peatlands*. International  
2498 mire conservation group.
- 2499 JUNE, T., EVANS, J. R. et FARQUHAR, G. D. (2004). A simple new equation for the  
2500 reversible temperature dependence of photosynthetic electron transport : a study on  
2501 soybean leaf. *Funct. Plant Biol.*, 31(3):275–283. WOS :000220831200008.
- 2502 JUSZCZAK, R., ACOSTA, M. et OLEJNIK, J. (2012). Comparison of daytime and night-  
2503 time ecosystem respiration measured by the closed chamber technique on temperate  
2504 mire in Poland. *Pol. J. Environ. Stud.*, 21(3):643–658.
- 2505 KARKI, S., ELSGAARD, L., KANDEL, T. P. et LÆRKE, P. E. (2015). Full GHG balance  
2506 of a drained fen peatland cropped to spring barley and reed canary grass using  
2507 comparative assessment of CO<sub>2</sub> fluxes. *Environ Monit Assess*, 187(3):1–13.
- 2508 KAUFMAN, D. S., AGER, T. A., ANDERSON, N. J., ANDERSON, P. M., ANDREWS,  
2509 J. T., BARTLEIN, P. J., BRUBAKER, L. B., COATS, L. L., CWYNAR, L. C., DUVALL,  
2510 M. L., DYKE, A. S., EDWARDS, M. E., EISNER, W. R., GAJEWSKI, K., GEIRSDÓT-  
2511 TIR, A., HU, F. S., JENNINGS, A. E., KAPLAN, M. R., KERWIN, M. W., LOZHKNIN,  
2512 A. V., MACDONALD, G. M., MILLER, G. H., MOCK, C. J., OSWALD, W. W., OTTO-  
2513 BLIESNER, B. L., PORINCHU, D. F., RÜHLAND, K., SMOL, J. P., STEIG, E. J. et

- 2514 WOLFE, B. B. (2004). Holocene thermal maximum in the western Arctic (0–180°W).  
2515 *Quaternary Science Reviews*, 23(5–6):529–560.
- 2516 KENNEDY, G. W. et PRICE, J. S. (février 1, 2005). A conceptual model of volume-  
2517 change controls on the hydrology of cutover peats. *J. Hydrol.*, 302(1–4):13–27.
- 2518 KETCHESON, S. J. et PRICE, J. S. (2014). Characterization of the fluxes and stores of  
2519 water within newly formed Sphagnum moss cushions and their environment. *Ecohydrology*,  
2520 7(2):771–782.
- 2521 KETTUNEN, A., KAITALA, V., ALM, J., SILVOLA, J., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN,  
2522 P. J. (1996). Cross-correlation analysis of the dynamics of methane emissions from  
2523 a boreal peatland. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 10(3):457–471.
- 2524 KIM, J. et VERMA, S. B. (1992). Soil surface CO<sub>2</sub> flux in a Minnesota peatland.  
2525 *Biogeochemistry*, 18(1):37–51.
- 2526 KOEHLER, A.-K., SOTTOCORNOLA, M. et KIELY, G. (2011). How strong is the current  
2527 carbon sequestration of an Atlantic blanket bog? *Glob. Change Biol.*, 17(1):309–319.
- 2528 LAI, D. (2009). Methane Dynamics in Northern Peatlands : A Review. *Pedosphere*,  
2529 19(4):409–421.
- 2530 LAIHO, R. (août 2006). Decomposition in peatlands : Reconciling seemingly contrasting  
2531 results on the impacts of lowered water levels. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8):  
2532 2011–2024.
- 2533 LANDVA, A. O., KORPIJAAKKO, E. O. et PHEENEY, P. E. (1983). Geotechnical clas-  
2534 sification of peats and organic soils. In *Testing of peats and organic soils*, volume  
2535 820, pages 37–51.
- 2536 LAPPALAINEN, E. (1996). *Global peat resources*, volume 4. International Peat Society  
2537 Jyskä.
- 2538 LELIEVELD, J. O. S., CRUTZEN, P. J. et DENTENER, F. J. (1998). Changing concentra-  
2539 tion, lifetime and climate forcing of atmospheric methane. *Tellus B*, 50(2):128–150.
- 2540 LIMPENS, J. et BERENDSE, F. (2003). How litter quality affects mass loss and N loss  
2541 from decomposing Sphagnum. *Oikos*, 103(3):537–547.
- 2542 LIMPENS, J., BERENDSE, F., BLODAU, C., CANADELL, J. G., FREEMAN, C., HOLDEN,  
2543 J., ROULET, N., RYDIN, H. et SCHAEPMAN-STRUB, G. (2008). Peatlands and the  
2544 carbon cycle : from local processes to global implications – a synthesis. *Biogeosciences*,  
2545 5(2):1475–1491.
- 2546 LIU, W., FOX, J. E. et XU, Z. (2000). Leaf litter decomposition of canopy trees, bamboo  
2547 and moss in a montane moist evergreen broad-leaved forest on Ailao Mountain,  
2548 Yunnan, south-west China. *Ecol. Res.*, 15(4):435–447.
- 2549 LIVINGSTON, G. P. et HUTCHINSON, G. L. (1995). Enclosure-based measurement of  
2550 trace gas exchange : applications and sources of error. *Biog. Trace Gases Meas.*  
2551 *Emiss. Soil Water*, pages 14–51.

- 2552 LOHILA, A., AURELA, M., REGINA, K. et LAURILA, T. (2003). Soil and total ecosystem  
 2553 respiration in agricultural fields : effect of soil and crop type. *Plant Soil*, 251(2):303–  
 2554 317.
- 2555 LONG, K. D., FLANAGAN, L. B. et CAI, T. (2010). Diurnal and seasonal variation in  
 2556 methane emissions in a northern Canadian peatland measured by eddy covariance.  
 2557 *Global Change Biology*, 16(9):2420–2435.
- 2558 LONG, S. P. et HÄLLGREN, J.-E. (1993). Measurement of CO<sub>2</sub> assimilation by plants  
 2559 in the field and the laboratory. In HALL, D. O., SCURLOCK, J. M. O., Bolhàr  
 2560 NORDENKAMPF, H. R., LEEGOOD, R. C. et LONG, S. P., éditeurs : *Photosynthesis*  
 2561 and *Production in a Changing Environment*, pages 129–167. Springer Netherlands.
- 2562 LUND, M., CHRISTENSEN, T. R., LINDROTH, A. et SCHUBERT, P. (2012). Effects  
 2563 of drought conditions on the carbon dioxide dynamics in a temperate peatland.  
 2564 *Environ. Res. Lett.*, 7(4):045704.
- 2565 LUO, Y. et ZHOU, X. (2006a). Chapter 1 - Introduction and overview. In LUO, Y. et  
 2566 ZHOU, X., éditeurs : *Soil Respiration and the Environment*, pages 3 – 15. Academic  
 2567 Press, Burlington.
- 2568 LUO, Y. et ZHOU, X. (2006b). Chapter 5 - Controlling factors. In LUO, Y. et ZHOU,  
 2569 X., éditeurs : *Soil Respiration and the Environment*, pages 79 – 105. Academic Press,  
 2570 Burlington.
- 2571 LUO, Y. et ZHOU, X. (2006c). Chapter 8 - Methods of measurements and estimations.  
 2572 In LUO, Y. et ZHOU, X., éditeurs : *Soil Respiration and the Environment*, pages 161  
 2573 – 185. Academic Press, Burlington.
- 2574 MACDONALD, G. M., BEILMAN, D. W., KREMENETSKI, K. V., SHENG, Y., SMITH,  
 2575 L. C. et VELICHKO, A. A. (2006). Rapid early development of circumarctic peatlands  
 2576 and atmospheric CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> variations. *Science*, 314(5797):285–288.
- 2577 MAHECHA, M. D., REICHSTEIN, M., CARVALHAIS, N., LASSLOP, G., LANGE, H., SE-  
 2578 NEVIRATNE, S. I., VARGAS, R., AMMANN, C., ARAIN, M. A., CESCATTI, A., JANS-  
 2579 SENNS, I. A., MIGLIAVACCA, M., MONTAGNANI, L. et RICHARDSON, A. D. (2010).  
 2580 Global Convergence in the Temperature Sensitivity of Respiration at Ecosystem Le-  
 2581 vel. *Science*, 329(5993):838–840.
- 2582 MALMER, N., SVENSSON, B. M. et WALLÉN, B. (1994). Interactions between Sphagnum  
 2583 mosses and field layer vascular plants in the development of peat-forming systems.  
 2584 *Folia geobot. phytotax.*, 29(4):483–496.
- 2585 MANNEVILLE, O. (1999). *Le monde des tourbières et des marais : France, Suisse,*  
 2586 *Belgique et Luxembourg*. Delachaux & Niestle.
- 2587 MCNEIL, P. et WADDINGTON, J. M. (2003). Moisture controls on Sphagnum growth  
 2588 and CO<sub>2</sub> exchange on a cutover bog. *J. Appl. Ecol.*, 40(2):354–367.
- 2589 MOORE, T. R., BUBIER, J. L., FROLKING, S. E., LAFLEUR, P. M. et ROULET, N. T.  
 2590 (2002). Plant biomass and production and CO<sub>2</sub> exchange in an ombrotrophic bog.  
 2591 *Journal of Ecology*, 90(1):25–36.

- 2592 MUNIR, T. M., PERKINS, M., KAING, E. et STRACK, M. (février 20, 2015). Carbon  
 2593 dioxide flux and net primary production of a boreal treed bog : Responses to warming  
 2594 and water-table-lowering simulations of climate change. *Biogeosciences*, 12(4):1091–  
 2595 1111.
- 2596 NATIONAL WETLANDS WORKING GROUP (1997). *The Canadian wetland classification system*. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 2nd edition édition.
- 2598 ORLOWSKY, B. et SENEVIRATNE, S. I. (2012). Global changes in extreme events :  
 2599 regional and seasonal dimension. *Clim. Change*, 110(3-4):669–696.
- 2600 PARISH, F., SIRIN, A., CHARMAN, D., JOOSTEN, H., MINAYEVA, T., SILVIUS, M. et  
 2601 STRINGER, L. (2008). *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change : Main Report*. Global Environment Centre & Wetlands International.
- 2603 PARKIN, T. B. et KASPAR, T. C. (2003). Temperature Controls on Diurnal Carbon  
 2604 Dioxide Flux. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67(6):1763–1772.
- 2605 PAVELKA, M., ACOSTA, M., MAREK, M. V., KUTSCH, W. et JANOUS, D. (2007).  
 2606 Dependence of the  $Q_{10}$  values on the depth of the soil temperature measuring point.  
 2607 *Plant Soil*, 292(1-2):171–179.
- 2608 PEICHL, M., ÖQUIST, M., LÖFVENIUS, M. O., ILSTEDT, U., SAGERFORS, J., GRELLE,  
 2609 A., LINDROTH, A. et NILSSON, M. B. (2014). A 12-year record reveals pre-growing  
 2610 season temperature and water table level threshold effects on the net carbon dioxide  
 2611 exchange in a boreal fen. *Environ. Res. Lett.*, 9(5):055006.
- 2612 PELLETIER, L., MOORE, T. R., ROULET, N. T., GARNEAU, M. et BEAULIEU-AUDY,  
 2613 V. (2007). Methane fluxes from three peatlands in the La Grande Rivière watershed,  
 2614 James Bay lowland, Canada. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).
- 2615 PHILIPPE DE SOUABE-ZYRIANE (1988). Van Helmont Jan Baptist - (1577-1644).  
 2616 In *Encyclopædia Universalis, Thesaurus index*, volume 3, page 3072. Encyclopædia  
 2617 Universalis, Malesherbes, Paris, 3 édition.
- 2618 PHILLIPS, C. L., NICKERSON, N., RISK, D. et BOND, B. J. (2011). Interpreting diel  
 2619 hysteresis between soil respiration and temperature. *Global Change Biol.*, 17(1):515–  
 2620 527.
- 2621 POST, W. M., EMANUEL, W. R., ZINKE, P. J. et STANGENBERGER, A. G. (1982). Soil  
 2622 carbon pools and world life zones. *Nature*, 298:156–159.
- 2623 PRATHER, M. J., HOLMES, C. D. et HSU, J. (2012). Reactive greenhouse gas scenarios : Systematic exploration of uncertainties and the role of atmospheric chemistry.  
 2624 *Geophys. Res. Lett.*, 39(9):L09803.
- 2626 PRENTICE, I. C., FARQUHAR, G. D., FASHAM, M. J. R., GOULDEN, M. L., HEIMANN,  
 2627 M., JARAMILLO, V. J., KHESHGI, H. S., LEQUÉRÉ, C., SCHOLES, R. J. et WALLACE,  
 2628 D. W. R. (2001). The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide. In HOUGHTON,  
 2629 J. T., DING, Y., GRIGGS, D. J., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P. J., DAI,  
 2630 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*

- 2632      *Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 185–237. Cambridge University  
 2633      Press, Cambridge, UK.
- 2634      PUMPANEN, J., KOLARI, P., ILVESNIEMI, H., MINKKINEN, K., VESALA, T., NIINISTÖ,  
 2635      S., LOHILA, A., LARMOLA, T., MORERO, M., PIHLATIE, M., JANSSENS, I., YUSTE,  
 2636      J. C., GRÜNZWEIG, J. M., RETH, S., SUBKE, J.-A., SAVAGE, K., KUTSCH, W., ØS-  
 2637      TRENG, G., ZIEGLER, W., ANTHONI, P., LINDROTH, A. et HARI, P. (2004). Comparison  
 2638      of different chamber techniques for measuring soil CO<sub>2</sub> efflux. *Agric. For. Meteorol.*, 123(3–4):159–176.
- 2640      RAICH, J. W. et SCHLESINGER, W. H. (1992). The global carbon dioxide flux in soil  
 2641      respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 44(2):81–99.
- 2642      RAMEAU, J.-C., MANSION, D. et DUMÉ, G. (2008). *Flore forestière française : Plaines*  
 2643      *et collines*. Forêt privée française.
- 2644      RAMSAR, C. (1987). *Convention relative aux zones humides d'importance internationale*  
 2645      *particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau, (Ramsar, Iran, 1971) telle*  
 2646      *qu'amendée en 1982 et 1987*.
- 2647      ROBERT, C. (2007). Simple, stable, and compact multiple-reflection optical cell for  
 2648      very long optical paths. *Applied Optics*, 46(22):5408–5418.
- 2649      ROBERT, M. et SAUGIER, B. (2003). Contribution des écosystèmes continentaux à la  
 2650      séquestration du carbone. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(6–7):577–595.
- 2651      ROBROEK, B. J., VAN RUIJVEN, J., SCHOUTEN, M. G., BREEUWER, A., CRUSHELL,  
 2652      P. H., BERENDSE, F. et LIMPENS, J. (2009). Sphagnum re-introduction in degraded  
 2653      peatlands : The effects of aggregation, species identity and water table. *Basic and*  
 2654      *Applied Ecology*, 10(8):697–706.
- 2655      RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013a). Peatland habitats. In *The biology of Peatlands*,  
 2656      pages 85–107. Oxford University Press.
- 2657      RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013b). Productivity and peat accumulation. In *The biology*  
 2658      *of Peatlands*, pages 254–273. Oxford University Press.
- 2659      RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013c). Sphagnum - the builder of boreal peatlands. In *The*  
 2660      *biology of Peatlands*, pages 65–84. Oxford University Press.
- 2661      SEGERS, R. (1998). Methane production and methane consumption : a review of  
 2662      processes underlying wetland methane fluxes. *Biogeochemistry*, 41(1):23–51.
- 2663      SIEGENTHALER, U. et OESCHGER, H. (février 4, 1987). Biospheric CO<sub>2</sub> emissions  
 2664      during the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus B*,  
 2665      39B(1-2):140–154.
- 2666      SILVOLA, J., ALM, J., AHLHOLM, U., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1996).  
 2667      The contribution of plant roots to CO<sub>2</sub> fluxes from organic soils. *Biol Fertil Soils*,  
 2668      23(2):126–131.
- 2669      SINGH, J. S. et GUPTA, S. R. (1977). Plant decomposition and soil respiration in  
 2670      terrestrial ecosystems. *Bot. Rev*, 43(4):449–528.

- 2671 SMITH, L. C., MACDONALD, G. M., VELICHKO, A. A., BEILMAN, D. W., BORISOVA,  
2672 O. K., FREY, K. E., KREMENETSKI, K. V. et SHENG, Y. (2004). Siberian Peatlands  
2673 a Net Carbon Sink and Global Methane Source Since the Early Holocene. *Science*,  
2674 303(5656):353–356.
- 2675 SONNENTAG, O., VAN DER KAMP, G., BARR, A. G. et CHEN, J. M. (2010). On the  
2676 relationship between water table depth and water vapor and carbon dioxide fluxes  
2677 in a minerotrophic fen. *Glob. Change Biol.*, 16(6):1762–1776.
- 2678 STOCKER, T. F., QIN, D., PLATTNER, G. K., TIGNOR, M., ALLEN, S. K., BOSCHUNG,  
2679 J., NAUELS, A., XIA, Y., BEX, B. et MIDGLEY, B. M. (2013). *IPCC, 2013 : climate  
2680 change 2013 : the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth  
2681 assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Cambridge  
2682 University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- 2683 STRACK, M. (2008). *Peatlands and climate change*. IPS, International Peat Society,  
2684 Jyväskylä, Finland.
- 2685 STRACK, M. et PRICE, J. S. (2009). Moisture controls on carbon dioxide dynamics of  
2686 peat-Sphagnum monoliths. *Ecohydrology*, 2(1):34–41.
- 2687 STRACK, M., WALLER, M. F. et WADDINGTON, J. M. (2006). Sedge succession and  
2688 peatland methane dynamics : A potential feedback to climate change. *Ecosystems*,  
2689 9(2):278–287.
- 2690 STRACK, M. et ZUBACK, Y. C. A. (2013). Annual carbon balance of a peatland 10 yr  
2691 following restoration. *Biogeosciences*, 10(5):2885–2896.
- 2692 SVENSSON, B. M. (1995). Competition between Sphagnum fuscum and Drosera rotun-  
2693 difolia : A Case of Ecosystem Engineering. *Oikos*, 74(2):205–212.
- 2694 TAYLOR, K., ROWLAND, A. P. et JONES, H. E. (février 1, 2001). *Molinia caerulea (L.)*  
2695 *Moench. J. Ecol.*, 89(1):126–144.
- 2696 TREAT, C. C., BUBIER, J. L., VARNER, R. K. et CRILL, P. M. (2007). Timescale  
2697 dependence of environmental and plant-mediated controls on CH<sub>4</sub> flux in a temperate  
2698 fen. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).
- 2699 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2012). Methane fluxes from a  
2700 patterned fen of the northeastern part of the La Grande river watershed, James Bay,  
2701 Canada. *Biogeochemistry*, 113(1-3):409–422.
- 2702 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2014). Interannual variability in  
2703 the CO<sub>2</sub> balance of a boreal patterned fen, James Bay, Canada. *Biogeochemistry*,  
2704 118(1-3):371–387.
- 2705 TURETSKY, M. R., TREAT, C. C., WALDROP, M. P., WADDINGTON, J. M., HAR-  
2706 DEN, J. W. et MCGUIRE, A. D. (2008). Short-term response of methane fluxes and  
2707 methanogen activity to water table and soil warming manipulations in an Alaskan  
2708 peatland. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 113(G3).

- 2709 TURUNEN, J., TOMPOPO, E., TOLONEN, K. et REINIKAINEN, A. (2002). Estimating  
2710 carbon accumulation rates of undrained mires in Finland—application to boreal and  
2711 subarctic regions. *The Holocene*, 12(1):69–80.
- 2712 UPDEGRAFF, K., BRIDGHAM, S. D., PASTOR, J., WEISHAMPEL, P. et HARTH, C.  
2713 (2001). Response of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from peatlands to warming and water  
2714 table manipulation. *Ecol. Appl.*, 11(2):311–326.
- 2715 VARGAS, R., BALDOCCHI, D. D., ALLEN, M. F., BAHN, M., BLACK, T. A., COLLINS,  
2716 S. L., YUSTE, J. C., HIRANO, T., JASSAL, R. S., PUMPANEN, J. et TANG, J. (2010).  
2717 Looking deeper into the soil : biophysical controls and seasonal lags of soil CO<sub>2</sub>  
2718 production and efflux. *Ecol. Appl.*, 20(6):1569–1582.
- 2719 VARGAS, R., CARBONE, M. S., REICHSTEIN, M. et BALDOCCHI, D. D. (2011). Frontiers  
2720 and challenges in soil respiration research : from measurements to model-data  
2721 integration. *Biogeochemistry*, 102(1-3):1–13.
- 2722 VIEL, E., BINET, S., GOGO, S. et LAGGOUN-DÉFARGE, F. (2015). Tree invasion  
2723 controls the drainage pattern in La Guette peatland (France) : impact on the water  
2724 storage capacity of the peat. *Journal of Hydrology* (*submitted*).
- 2725 WADDINGTON, J. M. et ROULET, N. T. (2000). Carbon balance of a boreal patterned  
2726 peatland. *Global Change Biology*, 6(1):87–97.
- 2727 WAGNER, D. J. et TITUS, J. E. (1984). Comparative desiccation tolerance of two  
2728 Sphagnum mosses. *Oecologia*, 62(2):182–187.
- 2729 WARD, S. E., OSTLE, N. J., OAKLEY, S., QUIRK, H., HENRYS, P. A. et BARDGETT,  
2730 R. D. (2013). Warming effects on greenhouse gas fluxes in peatlands are modulated  
2731 by vegetation composition. *Ecol. Lett.*, 16(10):1285–1293.
- 2732 WEEDON, J. T., AERTS, R., KOWALCHUK, G. A., VAN LOGTESTIJN, R., ANDRINGA,  
2733 D. et VAN BODEGOM, P. M. (2013). Temperature sensitivity of peatland C and N  
2734 cycling : Does substrate supply play a role ? *Soil Biology and Biochemistry*, 61:109–  
2735 120.
- 2736 WELTZIN, J. F., PASTOR, J., HARTH, C., BRIDGHAM, S. D., UPDEGRAFF, K. et CHA-  
2737 PIN, C. T. (2000). Response of bog and fen plant communities to warming and  
2738 water-table manipulations. *Ecology*, 81(12):3464–3478.
- 2739 WHALEN, S. C. et PEIRCE, J. J. (2005). Biogeochemistry of methane exchange between  
2740 natural wetlands and the atmosphere. *Environmental engineering science*, 22(1):73–  
2741 94.
- 2742 WORRALL, F., BURT, T., ROWSON, J., WARBURTON, J. et ADAMSON, J. (2009).  
2743 The multi-annual carbon budget of a peat-covered catchment. *Science of The Total  
2744 Environment*, 407(13):4084–4094.
- 2745 WUEBBLES, D. J. et HAYHOE, K. (2002). Atmospheric methane and global change.  
2746 *Earth-Sci. Rev.*, 57(3):177–210.

- 2747 WULLSCHLEGER, S. D. (1993). Biochemical limitations to carbon assimilation in C3  
2748 plants—a retrospective analysis of the A/Ci curves from 109 species. *J. Exp. Bot.*,  
2749 44(5):907–920.
- 2750 YU, Z., BEILMAN, D. W. et JONES, M. C. (2009). Sensitivity of northern peatland car-  
2751 bon dynamics to Holocene climate change. In *Carbon cycling in northern peatlands*,  
2752 volume 184, pages 55–69. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Se-  
2753 ries Washington, DC.
- 2754 YU, Z., LOISEL, J., BROSSEAU, D. P., BEILMAN, D. W. et HUNT, S. J. (2010). Global  
2755 peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophys. Res. Lett.*, 37(13).
- 2756 ZHU, X., SONG, C., SWARZENSKI, C. M., GUO, Y., ZHANG, X. et WANG, J. (février  
2757 2015). Ecosystem-atmosphere exchange of CO<sub>2</sub> in a temperate herbaceous peatland  
2758 in the Sanjiang plain of northeast China. *Ecol. Eng.*, 75:16–23.

# Index

## A

2759 atterrissage ..... 11

## C

2762 carbone

2763 stock ..... 12

2764 changements globaux ..... 2, 14

## E

2765 échange net de l'écosystème

2767 contrôle ..... 21

## P

2769 paludification ..... 11

2770 photosynthèse ..... 17

2771 production primaire brute

2772 contrôle ..... 21

## R

2774 respiration ..... 18

2775 de l'écosystème ..... 18

2776 contrôle ..... 20

2777 du sol ..... 18

## S

2779 services écologiques ..... 3

## T

2781 tourbières ..... 8–16

2782 distribution ..... 11

2783 formation ..... 11

2784 surface ..... 10

2785 utilisation ..... 14

2786 tourbification ..... 10

## Z

2787 zone humide ..... 8



<sup>2789</sup> Annexes

<sub>2790</sub> A Photos supplémentaires



(a) droséra

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

<sub>2791</sub> B protocole végétation

<sub>2792</sub> Le suivi non-destructif d'une végétation n'est pas triviale et nécessite la mise en  
<sub>2793</sub> place de protocoles particuliers en fonction du type de végétation. L'objectif est de  
<sub>2794</sub> pouvoir estimer une biomasse produite en impactant au minimum la végétation en  
<sub>2795</sub> place. Pour l'ensemble des espèces végétales présentes dans les embases servant à la  
<sub>2796</sub> mesure des flux un recouvrement à été estimé, à l'œil.

<sub>2797</sub> **La strate arbustive**

<sub>2798</sub> Pour la strate arbustive des mesures de hauteur moyenne ont été effectuées, en  
<sub>2799</sub> mesurant depuis le niveau du sol, ou le toit des sphaignes, si elles étaient présentes,  
<sub>2800</sub> jusqu'au sommet de l'individu.

<sub>2801</sub> **La strate herbacée**

<sub>2802</sub> Pour la strate herbacée, en 2013, 5 individus des deux espèces majoritaires (*Eriophorum vaginatum* ? *augustifolium* ?, *Molinia Caerulea*) ont été marqués afin de pourvoir  
<sub>2803</sub> les mesurer plusieurs fois au cours de la saison. Cependant les difficultés à retrouver  
<sub>2804</sub> les individus marqués couplés à la mort d'un nombre important d'entre eux n'ont pas  
<sub>2805</sub> permis d'acquérir de résultats significatifs. En conséquence en 2014 ces deux espèces  
<sub>2806</sub> ont fait l'objet de comptage exhaustif et de mesure de hauteur moyenne.  
<sub>2807</sub>

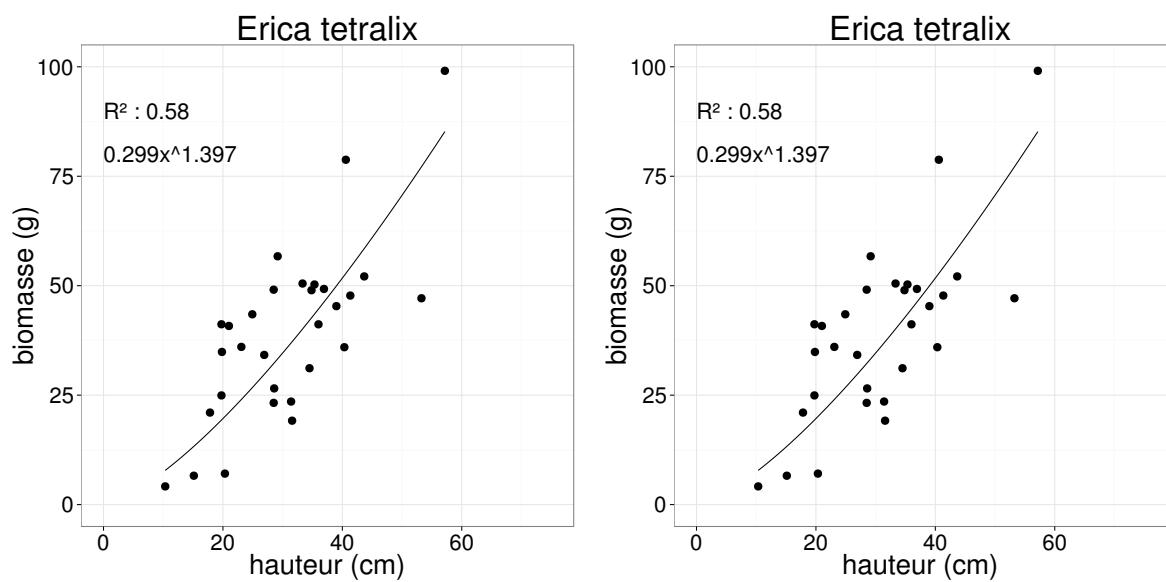


FIGURE 8 – Calibration de la biomasse en fonction de la hauteur

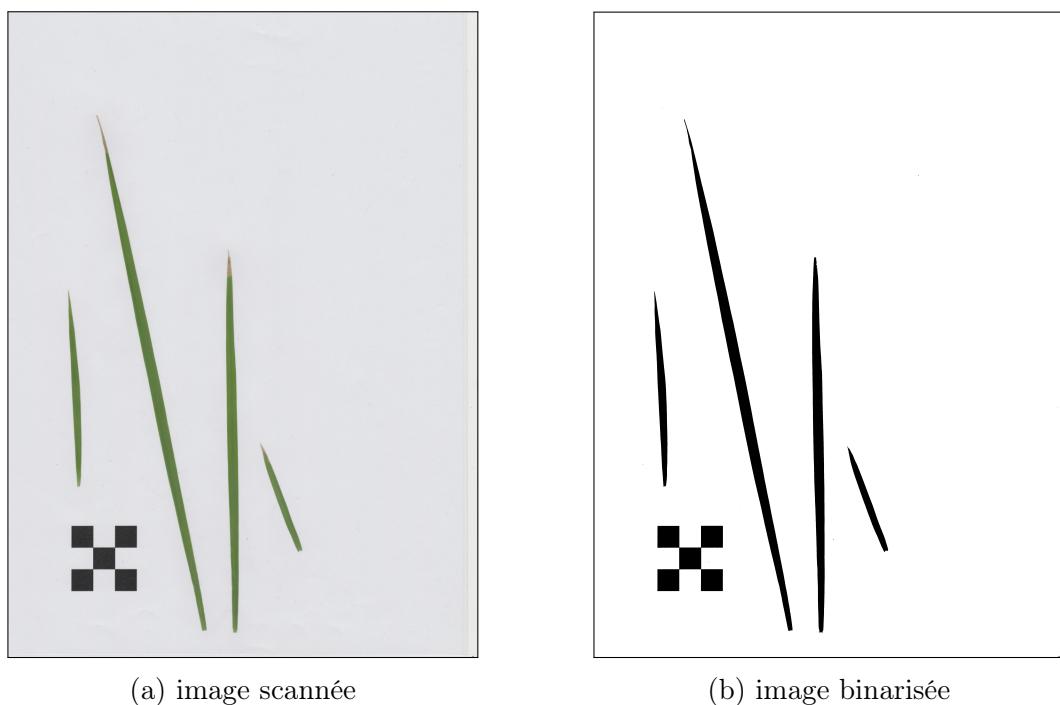


FIGURE 9 – Scanne des feuilles

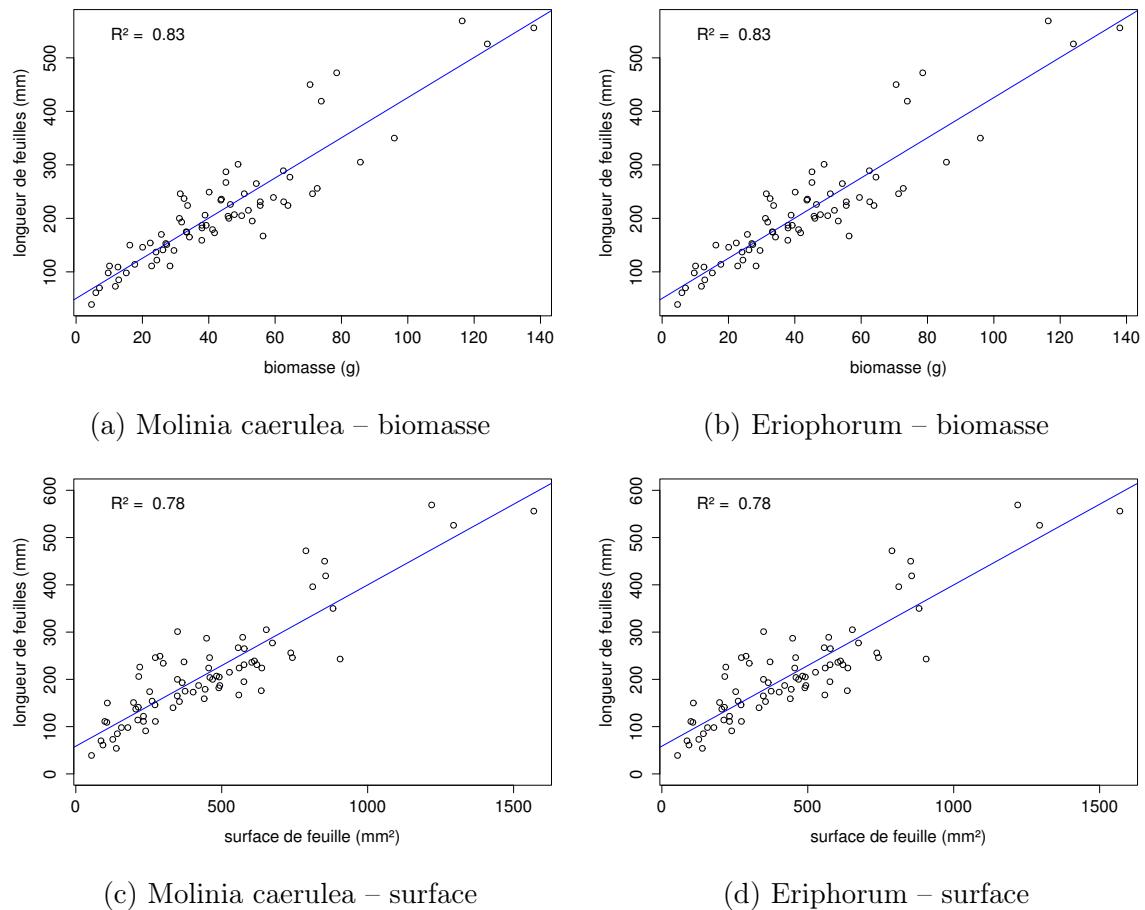


FIGURE 10 – Calibration de la biomasse herbacées pour *Molinia Caerulea* (a), pour *Eriophorum* (b) et de la surface de feuille pour *Molinia Caerulea* (c), pour *Eriophorum* (d) en fonction de la hauteur

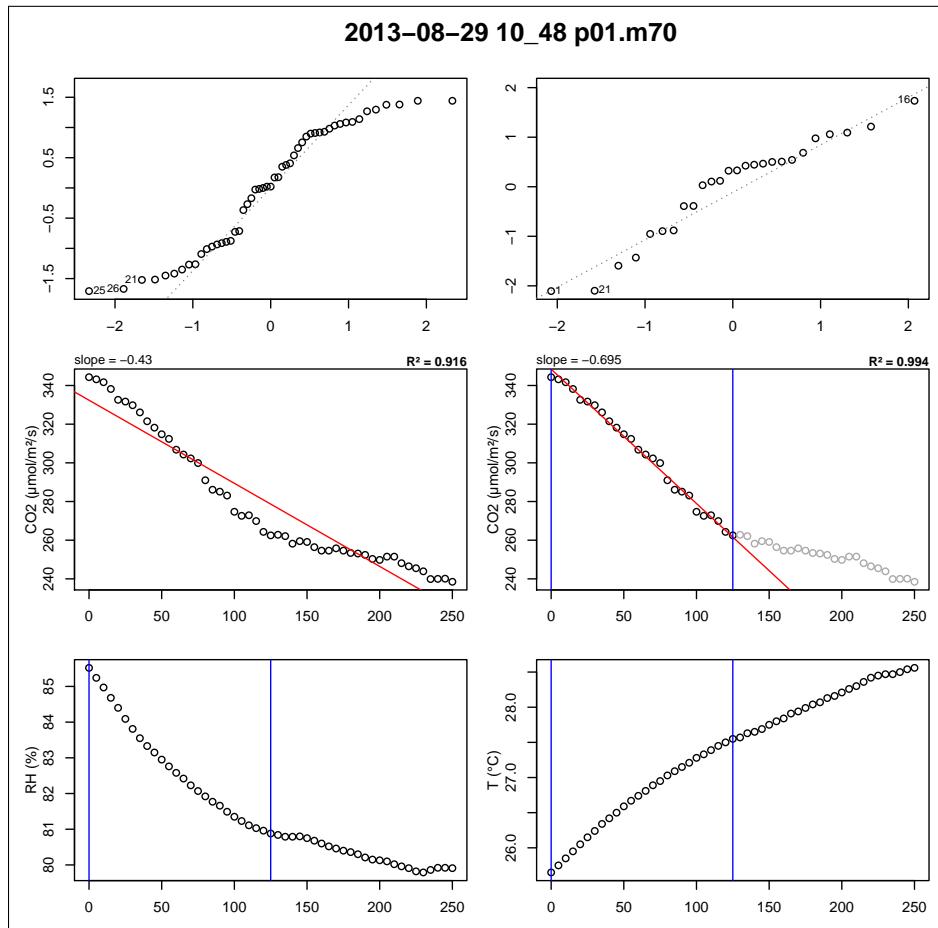


FIGURE 11 – Planche de graphes permettant le diagnostique des mesures de flux de CO<sub>2</sub>

## 2808 C Le projet CARBIODIV

2809 Ce projet vise à restaurer l’hydrologie de la tourbière de La Guette et de suivre les  
 2810 effets de cette restauration sur les flux de carbone et la biodiversité. Ce projet implique  
 2811 donc des laboratoires scientifiques (ISTO, LPC2E) une cellule de recherche et déve-  
 2812 loppement de l’Université d’Orléans (CETRAHE), des associations (SNE, CERCOPE,  
 2813 LIN’Eco), et une entreprise (Environnement41).

2814 Carte Nécessaire.

## 2815 D package m70r

2816 Ce package contient une série de fonctions à utiliser avec le langage R et qui  
 2817 permettent de traiter les fichiers \*.m70 issue des sondes Vaisala.

- 2818 — Générer des planches de graphes pour diagnostiquer les flux (Figure 11)
- 2819 — De comparer l’effet du retrait de certains points. La figure 11 montre ainsi une  
 2820 mesure pour laquelle l’assimilation de CO<sub>2</sub> par photosynthèse est tellement forte  
 2821 qu’elle semble être stoppée abruptement au delà d’un certain seuil.

- 2822 — De conserver les changement effectués dans un fichier séparé du fichier source,  
2823 qui reste donc intact.
- 2824 — De calculer les flux net.

[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, ...