

# **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>	vi
<b>Liste des tableaux</b>	vii
<b>Remerciements</b>	ix
<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 . . . . .	12
1.1.3 Les tourbières et les changements globaux . . . . .	14
1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants . . . . .	17
1.2.1 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières . . . . .	17
1.2.2 Les facteurs majeurs contrôlant les flux . . . . .	19
1.2.3 Bilans de carbone . . . . .	23
<b>2 Sites d'études et méthodologies employées</b>	25
2.1 Présentation de la tourbière de La Guette . . . . .	26
2.2 Autres sites du service national d'observation . . . . .	31
2.3 Mesures de flux . . . . .	32
2.3.1 Présentation des méthodologies possibles . . . . .	32
2.3.2 Les mesures de CO <sub>2</sub> . . . . .	33
2.3.3 Les mesures de CH <sub>4</sub> . . . . .	35
2.3.4 Le calcul des flux . . . . .	36
2.4 Facteurs contrôlants . . . . .	37
2.4.1 acquisitions automatisées . . . . .	37
<b>3 Bilan de C de la tourbière de La Guette</b>	39
3.1 Introduction . . . . .	40
3.2 Procédure expérimentale et analytique . . . . .	40
3.2.1 Méthodes de mesure . . . . .	40
3.2.2 Modélisation du bilan de C . . . . .	42
3.3 Résultats . . . . .	46
3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la tourbière de La Guette . . . . .	46
3.3.2 Sélection des modèles . . . . .	52
3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle de l'écosystème . . . . .	59

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

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



# Liste des figures

1.1	Global distribution of peatlands . . . . .	11
1.2	Changement de température et de précipitation moyenne à l'horizon 2100 pour le scénario RCP 4.5 . . . . .	16
2.1	Site d'études SNO . . . . .	26
2.2	Carte de la tourbière de La Guette . . . . .	27
2.3	Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure. . . . .	29
2.4	Évolution du niveau de la pluviométrie, en mm, des années 2011 à 2014	30
2.5	Évolution du niveau de la nappe, en cm par rapport à la surface, des années 2011 à 2014 . . . . .	30
2.6	Évolution de la température de l'air (en °C) des années 2011 à 2014 . .	31
2.7	Mesures de CO <sub>2</sub> . . . . .	34
2.8	SPIRIT . . . . .	35
3.1	Répartition des 20 placettes de mesures suivant un échantillonnage aléatoire stratifié. . . . .	41
3.2	Partitionnement des placettes en fonction de leur similarité en termes de composition végétale (pourcentage des strates muscinales, herbacées et arbustives) . . . . .	45
3.3	Évolution du niveau de la nappe moyen des 20 embases mesuré pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015) . . . . .	46
3.4	Évolution des températures de l'air (Tair) et du sol à -5, -30, -50 et -100 cm (T5, T30, T50 et T100 respectivement) moyenne mesurée lors des campagnes de terrain de mars 2013 à février 2015 . . . . .	47
3.5	Évolution de la conductivité pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015) . . . . .	47
3.6	Évolution du pH pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)	48
3.7	Évolution de la concentration en carbone organique dissous dans l'eau du sol pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015) . . . .	48
3.8	Évolution du niveau de PPB, RE et ENE pendant la période de mesure. Moyenne des 20 embases de mars 2013 à février 2015. . . . .	49
3.9	Évolution des flux de méthane moyen (N ?) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015) . . . . .	51
3.10	Relations entre les flux de gaz et une sélection de facteurs contrôlant .	51
3.11	PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.1 . . . . .	53
3.12	PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.3 . . . . .	55
3.13	RE modèles avec Tair . . . . .	57
3.14	RE modèles avec Tair . . . . .	58
3.15	CH4 modèle H . . . . .	59
3.16	Flux de CO <sub>2</sub> interpolé à partir de PPB-1 et PPB-2 . . . . .	61
3.17	Flux de CO <sub>2</sub> interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3 . . . . .	62

3.18 Flux de CO <sub>2</sub> interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3 . . . . .	62
3.19 Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres des modèles RE-1 et RE-3 . . . . .	65
3.20 Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2 . . . . .	66
3.21 Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2 . . . . .	67
 4.1 Prélèvement des mésocosmes . . . . .	79
4.2 Schéma d'un mésocosme . . . . .	80
4.3 Expérimentation A : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux, CH <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. . . . .	81
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. . . . .	84
4.5 Relations entre les flux de GES et le niveau de la nappe . . . . .	87
 1 Végétation présente sur le site de La Guette, et suivie lors des campagnes de mesure. . . . .	106
2 Calibration de la biomasse en fonction de la hauteur . . . . .	107
3 Scanne des feuilles . . . . .	107
4 Calibration de la biomasse herbacées pour <i>molinia Caerulea</i> (a), pour <i>eriophorum</i> (b) et de la surface de feuille pour <i>molinia Caerulea</i> (c), pour <i>eriophorum</i> (d) en fonction de la hauteur . . . . .	108

# Liste des tableaux

1.1	Estimations des stocks de C pour différents environnements . . . . .	13
1.2	Surface de tourbe utilisée selon les usages considérés (tourbières non-tropicale). Modifié d'après Joosten et Clarke (2002). . . . .	15
1.3	Vitesse apparente d'accumulation du carbon à long terme en $\text{gC m}^{-2} \text{s}^{-1}$	23
3.1	Valeur des paramètres des équations utilisées pour modéliser les flux et sensibilité relative (en %) des flux en réponse à une variation de $\pm 10\%$ de chacun des paramètres des modèles. . . . .	60
3.2	Bilan des flux en gCm2an1 . . . . .	63
3.3	Bilan des flux en gCm2an1 . . . . .	63
3.4	Sensibilité relative (en %) du bilan de CO <sub>2</sub> (ENE) en réponse à une variation de $\pm 10\%$ de chacun des paramètres des modèles. . . . .	64
3.5	Bilan des flux de CO <sub>2</sub> en gCm2an1, en utilisant PPB-2 et RE-3 . . . . .	67
4.1	Récapitulatif des mesures pour les deux expérimentations . . . . .	79



# Remerciements

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



# <sup>1</sup> Introduction

---

## <sup>2</sup> Contexte général

<sup>3</sup> En 1957, Charles David Keeling, scientifique américain, met au point et utilise  
<sup>4</sup> pour la première fois, un analyseur de gaz infra-rouge pour mesurer la concentration  
<sup>5</sup> de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère sur l'île d'Hawaii, à Mauna Loa. La précision et la fréquence  
<sup>6</sup> importante de ses mesures lui permirent de voir pour la première fois les variations  
<sup>7</sup> journalière et saisonnière des concentrations en CO<sub>2</sub> atmosphérique, mais également à  
<sup>8</sup> plus long terme leur tendance haussière [Harris \(2010\)](#). Le CO<sub>2</sub> est un gaz à effet de serre  
<sup>9</sup> (GES) et son accumulation dans l'atmosphère... **force ? comparaison ? explication**  
<sup>10</sup> **effet de serre ?** Ce constat a probablement joué un rôle considérable dans la prise de  
<sup>11</sup> conscience, par la communauté scientifique, de l'importance et de l'intérêt de l'étude du  
<sup>12</sup> changement climatique et plus largement des changements globaux. Car si à l'époque  
<sup>13</sup> les concentration en CO<sub>2</sub> était inférieure à 320 ppm (partie par millions) elles ont  
<sup>14</sup> dépassées, au printemps 2014, la barre symbolique des 400 ppm selon un communiqué  
<sup>15</sup> de l'Organisation Météorologique Mondiale. Les concentrations pré-industrielles (avant  
<sup>16</sup> 1800) sont quand à elles généralement estimée à 280 ppm [Siegenthaler et Oeschger](#)  
<sup>17</sup> ([1987](#)).

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

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

29 Ciais *et al.* (2014).

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

32 **schéma ?**

33 Zones humides tourbières

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

37 Pourquoi étudier les tourbières aujourd'hui ?

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

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

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

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

52 Transition modèles

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

---

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

## 59 Objectif de la thèse et approche mise en oeuvre

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

68 Pour atteindre ces objectifs, nos travaux ont été articulés autour de trois volets  
69 **volet... t'as pas mieux ? Branche ? -\_-**" principaux : Dans un premier temps,  
70 l'**observation** régulière des flux de gaz ( $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ ) ainsi que d'un certain nombre de  
71 paramètres environnementaux servant à la caractérisation des variabilités spatiales et  
72 temporelles, ainsi qu'à l'étude des facteurs contrôlant. Certains facteurs contrôlant qui  
73 sont, dans un second temps, étudiés plus spécifiquement à travers un volet **expérimenta-**  
74 **tion**. Ce dernier doit permettre une meilleure compréhension de processus clé avec  
75 notamment l'impact de l'hydrologie. Enfin un troisième volet axé sur la **modélisation**,  
76 avec le développement d'un modèle le plus mécaniste possible.

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

<sup>84</sup> seront exposées.



# <sup>85</sup> 1 Synthèse Bibliographique

<sup>86</sup>

<sup>87</sup>	<b>1.1 Les tourbières et le cycle du carbone . . . . .</b>	<b>8</b>
<sup>88</sup>	1.1.1 Zones humides et tourbières : définitions et terminologies . . . . .	8
<sup>89</sup>	1.1.2 Tourbières et fonctions environnementales . . . . .	12
<sup>90</sup>	1.1.3 Les tourbières et les changements globaux . . . . .	14
<sup>91</sup>	<b>1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants . . . . .</b>	<b>17</b>
<sup>92</sup>	1.2.1 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières . . . . .	17
<sup>93</sup>	1.2.2 Les facteurs majeurs contrôlant les flux . . . . .	19
<sup>94</sup>	1.2.3 Bilans de carbone . . . . .	23
<sup>95</sup>		
<sup>96</sup>		
<sup>97</sup>		

## 1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

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

### 1.1 Les tourbières et le cycle du carbone

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

##### Définitions

105 Les tourbières font partie d'un ensemble d'écosystèmes plus large que l'on appelle  
106 les zones humides. Ces zones humides ne sont ni des écosystèmes terrestres au sens  
107 strict, ni des écosystèmes aquatiques. Elles sont à la frontière entre les deux et sont  
108 caractérisées par un niveau de nappe élevé, proche de la surface du sol, voire au dessus.  
109 L'omniprésence de l'eau joue fortement sur l'aération du milieu et constraint, de façon  
110 plus ou moins importante, l'accès à l'oxygène. Elles ont été définie en 1971, lors de la  
111 convention dite de RAMSAR<sup>1</sup> de la façon suivante :

ZONES HUMIDES :

«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 éten-  
dues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six  
mètres.»

(Ramsar, 1987)

113 Les zones humides regroupent donc des écosystèmes très variés parmi lesquels les  
114 marais, les mangroves, les plaines d'inondations et les tourbières. Leurs particularités :

1. La convention de RAMSAR est un traité international visant à la conservation et l'utilisation rationnelle des zones humides.
2. Marais tourbeux situé sur une hauteur

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

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

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

TOURBIÈRE :

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

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

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

TOURBIÈRE ACTIVE :

<sup>124</sup> Écosystèmes dans lesquels un processus de tourbification est actif.

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

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

TOURBE :

<sup>134</sup> «Accumulation sédentaire de matériel composé d'au moins 30 % (matière  
sèche), de matières organiques mortes.»

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

## 1.1. Les tourbières et le cycle du carbone

---

135 Le seuil de 30 %, souvent utilisé pour rapprocher sa définition de celle d'un sol organique (histosol) au sens large, dans lesquels sont classés la majorité des sols tourbeux.  
136 D'autres définitions existent, faisant la distinction entre sols organiques et tourbes avec  
137 un seuil à 75 % (Andrejko *et al.*, 1983) ou 80 % (Landva *et al.*, 1983). Il est également  
138 nécessaire de préciser que, au delà de la classification utilisée, ce que les écologues  
139 considèrent comme de la tourbe contient généralement 80 % de matières organiques au  
140 minimum (Rydin et Jeglum, 2013a). Ce processus de formation est appelé la tourbifica-  
141 tion ou turfogénèse et les matières organiques accumulées proviennent majoritairement  
142 de la végétation. On définit les matières organiques de la façon suivante :  
143

### MATIÈRES ORGANIQUES :

144 Matières constituées d'un assemblage de composés ayant une ou plusieurs liaisons C–H. Elles sont composées de nombreux éléments dont des carbohydrates (sucres, cellulose ...), des composés azotés (protéines, acides aminés ...) et phénoliques (lignine ...), des lipides (cires, résines, ...) et d'autres<sup>3</sup>.

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

---

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

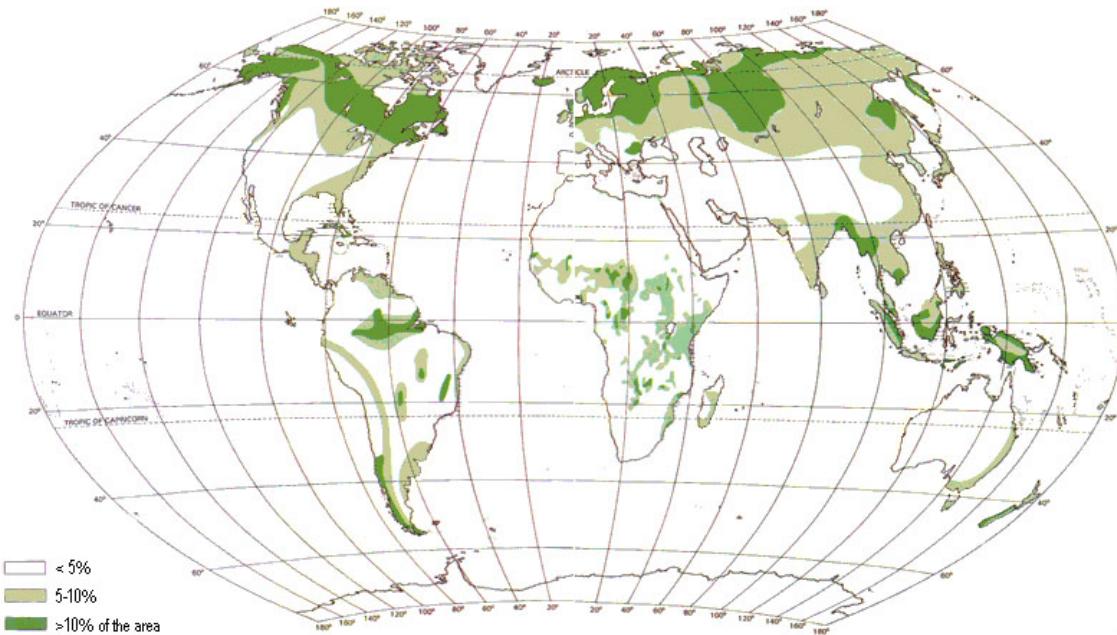


FIGURE 1.1 – Global distribution of peatlands

## **154 La formation des tourbières**

155 L’atterrissement et la paludification sont les deux processus principaux permettant  
 156 la formation des tourbières. Il s’agit pour le premier du comblement progressif d’une  
 157 zone d’eau stagnante. La paludification est la formation de tourbe directement sur un  
 158 sol minéral, grâce à des conditions d’humidité importante. Ces modes de formation ne  
 159 sont pas exclusif, une tourbière pouvant se développer, selon les endroits considérés ou  
 160 le temps, via des processus différents.

## **161 Classifications**

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

166 Les tourbières de haut-marais ont généralement une épaisseur de tourbe supérieure  
 167 à 30 cm et sont alimenté principalement alimentée par les précipitations : elles sont  
 168 dites ombrotrophes. Leur surface parfois bombée (tourbières élevées ou bombées) peut  
 169 également être plate ou en pente. Cette géométrie situe une partie au moins de l’éco-

## **1.1. Les tourbières et le cycle du carbone**

---

170 système au dessus du niveau de la nappe. Elles ont une concentration en nutriments  
171 relativement faible : elles sont oligotrophes et sont fortement acide avec des eaux de  
172 surface dont le pH est autour de 4 voire moins.

173 Les tourbière de bas-marais ont une épaisseur généralement supérieure à 30 cm avec  
174 un niveau de nappe très proche de la surface du sol. De forme concave ou en pente elles  
175 sont généralement alimentée en eaux par des sources ou par ruissellement et sont donc  
176 dites minerotrophes. Le pH de leur eaux de surface varient de 4 à 8. Les végétations  
177 dominantes de ces écosystèmes peuvent être des bryophytes, des graminées ou des  
178 arbustes bas.

### **179 1.1.2 Tourbières et fonctions environnementales**

#### **180 Biodiversité dans les tourbières**

181 Les tourbières sont le siège d'une biodiversité importante et spécifique. Ainsi les  
182 Sphaignes, qui sont des bryophytes, (des mousses) sont caractéristiques des écosystèmes  
183 tourbeux. Ce sont des espèces dites ingénieries, capable de modifier l'environnement  
184 dans lequel elles vivent afin de l'adapter à leurs besoins. Les sphaignes sont ainsi capable  
185 d'abaisser le pH, de capter des nutriments et de les séquestrer et ce même quand  
186 elles n'en ont pas besoin afin d'empêcher d'autres espèces notamment vasculaire d'en  
187 profiter. Plus précisément, le fait que les sphaignes captent les nutriments via leur  
188 capitulum leur permet de les intercepter avant qu'ils ne soient captés par d'éventuelles  
189 racines positionnées plus bas. Les sphaignes, comme de nombreuse mousses ont des  
190 litières relativement récalcitrantes<sup>4</sup>.

#### **191 Qualité des eaux**

#### **192 Puits de carbone**

193 Par définition les tourbières stockent ou ont stocké du carbone. C'est cette fonction  
194 de puits de carbone qui rend l'importance de ces écosystèmes non négligeable malgré

---

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

Tableau 1.1 – Estimations des stocks de C pour différents environnements

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

195 la faible surface qu'ils représentent. Les estimations du stock de carbone présent dans  
 196 les tourbières tempérées/boréales sont comprises entre 270 et 455 Gt C (Gorham, 1991;  
 197 Turunen *et al.*, 2002). Les différences entre les estimations sont liées aux incertitudes  
 198 de cartographie citées précédemment auxquelles s'ajoutent des incertitudes concernant  
 199 l'épaisseur et la densité moyenne de la tourbe. Le carbone stocké dans les tourbières  
 200 représente 10 à 25 % du carbone présent dans les sols et entre 30 et 60 % du stock de  
 201 carbone atmosphérique.

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

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

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

<sup>217</sup> **1.1.3 Les tourbières et les changements globaux**

<sup>218</sup> On défini les changements globaux comme l'ensemble des modifications environne-  
<sup>219</sup> mentales plus ou moins rapide, ayant lieu à l'échelle mondiale, quelle que soit leur ori-  
<sup>220</sup> gine. Les deux contraintes développées dans cette partie sont la pressions de l'homme :  
<sup>221</sup> contrainte anthropique, et celle du climat : contrainte climatique.

<sup>222</sup> **Contrainte anthropique**

<sup>223</sup> L'interaction entre les Hommes et les zones humides au sens large et les tourbières  
<sup>224</sup> en particulier remonte probablement à l'aube de l'humanité. De grandes découvertes  
<sup>225</sup> archéologiques ont été faites dans ces écosystèmes témoins d'époques révolues. Des  
<sup>226</sup> chemins de rondins néolithique aux crannogs de l'époque romaine ([Buckland, 1993](#)).  
<sup>227</sup> L'utilisation de la tourbe et des tourbières a du commencer relativement tôt, mais c'est  
<sup>228</sup> à partir du 17<sup>e</sup> siècle que le drainage de ces écosystèmes, pour les convertir en terres  
<sup>229</sup> agricoles, s'est intensifié. Au 19<sup>e</sup> siècle, l'apparition de machines permettant une ré-  
<sup>230</sup> colte industrialisée de la tourbe, a développé son utilisation comme combustible. Enfin  
<sup>231</sup> depuis le milieu du 20<sup>e</sup> une part importante de ces écosystèmes ont été drainé pour  
<sup>232</sup> développer la sylviculture. Aujourd'hui l'exploitation principale de la tourbe est liée à  
<sup>233</sup> son utilisation comme substrat horticole ([Lappalainen, 1996; Chapman \*et al.\*, 2003](#)).  
<sup>234</sup> Suite à ces perturbations, la surface de tourbières altérée est estimée à 500 000 km<sup>2</sup> en-  
<sup>235</sup> viron, principalement du fait de leur reconversion pour l'agriculture et la sylviculture  
<sup>236</sup> ([Tableau 1.2](#)). En France, suite à leur utilisation, principalement agricole, la surface  
<sup>237</sup> des tourbières a été par deux entre 1945 et 1998, passant de 1200 km<sup>2</sup> à 600 km<sup>2</sup> ([Lap-](#)  
<sup>238</sup> [palainen, 1996; Manneville, 1999](#)).

<sup>239</sup> Ces écosystèmes ont donc été et sont encore perturbés par différentes activités  
<sup>240</sup> humaines.

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

Utilisation	Surface (km <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

## **241 Contrainte climatique**

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

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

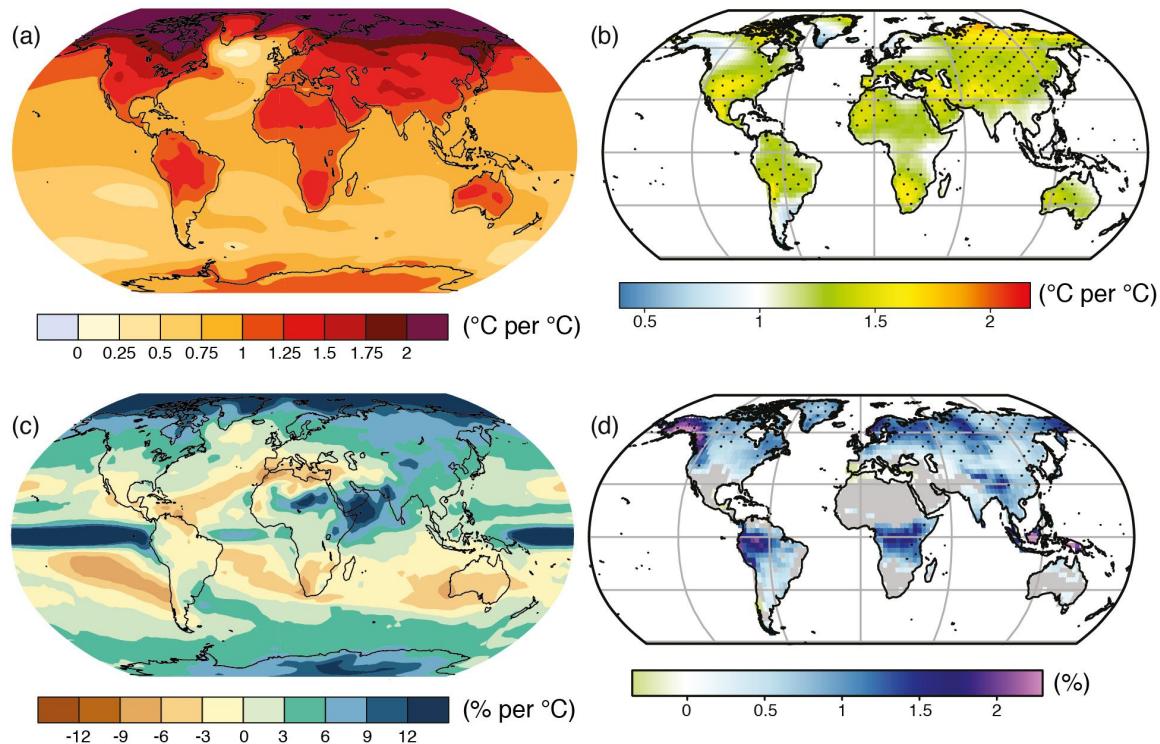


FIGURE 1.2 – Changement de température et de précipitation moyenne à l'horizon 2100 pour le scénario RCP 4.5

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

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

## <sup>268</sup> 1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs <sup>269</sup> contrôlants

### <sup>270</sup> 1.2.1 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières

#### <sup>271</sup> Les flux gazeux entrants

<sup>272</sup> Le carbone est principalement présent dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de  
<sup>273</sup> carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de méthane ( $\text{CH}_4$ ). Comparé au  $\text{CO}_2$ , le  $\text{CH}_4$  est un GES qui est bien  
<sup>274</sup> moins présent dans l'atmosphère (CHIFFRES!). Cependant son "pouvoir de réchauf-  
<sup>275</sup> fement" est bien plus important (effet radiatif  $\text{CO}_2 \times 100$ ) (CHIFFRES!) (D'abord la  
<sup>276</sup> vapeur d'eau, ensuite le  $\text{CO}_2$  et enfin le  $\text{CH}_4$ ) Il est usuellement convenu (????? ref)  
<sup>277</sup> que dans une tourbière le méthane représente environ 5% du bilan de C. **Devenir du**  
<sup>278</sup> **méthane atm** Le transfert du  $\text{CO}_2$  atmosphérique vers la biosphère (de l'atmosphère  
<sup>279</sup> à la tourbe) est principalement (**Réf needed**) liée à la photosynthèse. La photosyn-  
<sup>280</sup> thèse est la réaction photochimique permettant l'assimilation du  $\text{CO}_2$  par les végétaux  
<sup>281</sup> chlorophylliens. **dans le but de ?**

#### <sup>282</sup> Détails ?

<sup>283</sup> Si la photosynthèse est un processus majeur d'assimilation du  $\text{CO}_2$ , il existe d'autres  
<sup>284</sup> voies métaboliques permettant la capture du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère. Ainsi les micro-  
<sup>285</sup> organismes chemolithotrophes (**expliciter**) sont capables d'assimiler le  $\text{CO}_2$  en utili-  
<sup>286</sup> sant l'énergie issue de l'oxydation de composés inorganiques.

<sup>287</sup> Les voies métaboliques permettant l'assimilation du  $\text{CO}_2$  sont plutôt bien connues  
<sup>288</sup> (farquhar) et le fait que les substrats de départ de varient pas (sur ?) a permis une  
<sup>289</sup> compréhension relativement fine du processus. Cependant une fois assimilé par la vé-  
<sup>290</sup> gétation le devenir du carbone est moins direct.

**291 Les flux gazeux sortants**

292 Dans les tourbières le CO<sub>2</sub> est produit par des sources multiples. Ces sources sont  
293 la respiration des de la flore qu'elle soit aérienne ou souterraine et la respiration micro-  
294 bienne. Une autre source de CO<sub>2</sub> est l'oxydation du CH<sub>4</sub> lors de sa migration des zones  
295 anoxiques aux zones oxiques de la colonne de tourbe. Enfin dans les zones anaérobie, le  
296 CO<sub>2</sub> peut être produit par fermentation (respiration anaérobie). La production de CO<sub>2</sub>  
297 est donc un signal intégré sur l'ensemble de la colonne de tourbe. C'est cette multitude  
298 de processus qui rend l'estimation de ce flux difficile, en effet chacune des respirations  
299 n'aura pas la même sensibilité vis à vis de facteurs contrôlant. La respiration de l'éco-  
300 système (RE) est définie comme l'ensemble des respirations de la colonne de tourbe, en  
301 incluant à la fois sa partie aérienne et sa partie souterraine. La respiration du sol (SR)  
302 est elle définie comme l'ensemble des respirations de la colonne de tourbe, en excluant  
303 la partie aérienne. La respiration du sol comprend donc principalement les respirations  
304 issues de la rhizosphère et des communautés de micro-organisme.

305 Les tourbières sont des écosystèmes dont la production primaire est estimée à en-  
306 viron 500 gC m<sup>-2</sup> [Francez \(2000\)](#).

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

313 Le méthane (Lai2009, seger1998, barlett1993 review)

314 storage ?

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

319 La vitesse de stockage au cours du temps ?  
320 L'accumulation de matières organiques et donc de carbone dans les tourbières est  
321 donc fonction de la prépondérance relative de ces flux entre l'écosystème et l'atmo-  
322 sphère.

### 323 1.2.2 Les facteurs majeurs contrôlant les flux

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

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

332 Deuxième facteur contrôlant majeur : l'hydrologie. L'eau joue un rôle indispensable  
333 à la formation et au maintient de ces écosystèmes. Le niveau de la nappe, que le  
334 défini ici comme la distance entre la surface topographique de l'écosystème et le toit  
335 de l'aquifère/l'eau libre/la zone saturée. Ce niveau sépare la colonne de tourbe en une  
336 zone oxique, où il y a présence d'oxygène, et une zone anoxique dans laquelle l'oxygène  
337 est absent. Cette différence va influer sur la production du CO<sub>2</sub> et du CH<sub>4</sub>. La zone  
338 anoxique permet aux organismes anaérobies de se développer, notamment les Archaea<sup>5</sup>  
339 méthanogènes. L'activité de ces organismes est la plus importante juste sous la surface  
340 de l'eau, là où ils trouvent, en plus de l'anoxie, des matières organiques de qualité  
341 (faiblement décomposées). La zone aérobie permet la respiration aérobie (**aérobie vs**  
342 **oxique**) des micro-organismes, des racines et de la faune. C'est donc dans cette zone  
343 qu'est produit la majorité du CO<sub>2</sub>. Lors de son transport de la zone anoxique vers la  
344 surface, le CH<sub>4</sub> passe par la zone oxique et y est en partie oxydé en CO<sub>2</sub>. (organismes  
345 méthanotrophes) Le niveau de la nappe constraint également le teneur en eau du sol et

5. micro-organismes unicellulaires procaryotes

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

---

346 la hauteur de la frange capillaire (Laiho2006). Ce point a son importance notamment  
347 pour la végétation.

348 La végétation est également un facteur important concernant les flux de gaz liés aux  
349 tourbières. D'abord car elle exerce une influence directe sur les flux, avec d'un côté la  
350 photosynthèse et la respiration. La photosynthèse est le seul processus<sup>6</sup> permettant le  
351 piégeage du carbone présent dans l'atmosphère. Le potentiel de végétation pouvant être  
352 différent selon la plante considérée (Moore2002), la composition des communautés végé-  
353 tales influe donc la quantité de carbone potentiellement assimilable par l'écosystème.  
354 La respiration des plantes que se soit via leurs parties aériennes ou souterraines (les ra-  
355 cines) va permettre de libérer du CO<sub>2</sub>. (**Estimation chiffres ?**) La végétation fournie  
356 également via ses litières, des matières organiques fraîches pour les micro-organismes.  
357 Mais la végétation peut également stimuler la respiration des micro-organismes pré-  
358 sent dans la rhizosphère<sup>7</sup> via la libération d'exsudats racinaires (Moore2002). Enfin un  
359 effet indirect lié à l'adaptation de certaines plantes vasculaire aux conditions saturée  
360 en eau et anoxique. En effet certaines plantes présentes dans ces milieux humides ont  
361 développées un Aerenchyme, un espace intercellulaire agrandi permettant le transport  
362 d'oxygène des parties aériennes de la plante aux parties submergées. Le transport peut  
363 également se faire dans l'autre sens et permettant par exemple le transport du CO<sub>2</sub> ou  
364 du CH<sub>4</sub> dans l'atmosphère. Ce passage au travers de la plante permet également au  
365 CH<sub>4</sub> d'éviter d'être oxydé avant d'atteindre l'atmosphère.

366 D'autres facteurs à évoquer ?

### 367 Facteurs contrôlant la respiration de l'écosystème

368 Updegraf2001

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

371 Cai2010

---

6. pas tout à fait exact, certains organismes peuvent se développer uniquement avec du CO<sub>2</sub> et un apport d'énergie suffisant  
7. zone du sol impacté par les racines

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

376 Stratck2006

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

379 Ballantyne2014

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

### 385 Facteurs contrôlant la production primaire brute

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

### 394 Facteurs contrôlant l'ENE

395 On défini l'Échange Net de l'Écosystème (ENE) comme la différence entre la Pho-  
396 tosynthèse Primaire Brute (PPB) et la Respiration de l'écosystème (RE). Les facteurs  
397 contrôlants l'ENE sont donc les mêmes que ceux qui contrôlent ces 2 flux. Cependant  
398 l'effet d'un même facteur de contrôle peut être différent vis à vis de PPB et de RE

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

---

399 selon le contexte environnemental, que ce soit par rapport à la nature de l'effet ou son  
400 importance. Ainsi une variation de l'ENE peut parfois être contrôlée majoritairement  
401 soit par la PPB soit par la RE soit par les deux. Par exemple, une baisse du niveau  
402 de la nappe est souvent liée dans la littérature à une baisse de l'ENE. Cependant  
403 certains attribuent cette baisse à une augmentation de la Respiration (Aurela2013,  
404 Ballantyne2014, Alm1999, Ise2008, Oechel1993) quand d'autres l'attribue à une dimi-  
405 nution de la photosynthèse Sonnentag2010, Peicl2014. Enfin certains voient un effet à  
406 la fois de l'augmentation de la respiration et de la diminution de la photosynthèse  
407 (StrackZuback2013)

408 À noter un article intéressant (Lund2012) dans lequel, dans un même site une baisse  
409 du niveau de la nappe 2 années différentes entraînera une baisse de l'ENE dans les 2 cas,  
410 mais dans l'un des cas cette baisse est contrôlée par un augmentation de la respiration  
411 et dans l'autre cas cette baisse est contrôlée par une diminution de la photosynthèse.

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

### 415 Facteurs contrôlant les flux de méthane

416 Le niveau de la nappe et la température semblent être les facteurs prépondérants du  
417 contrôle des flux de méthane

418 La prépondérance relative de ces différents flux, contrôlée par les conditions envi-  
419 ronnementales, va donc impacter le fonctionnement des tourbières. Soit elles stockent  
420 du carbone, en accumulant des matières organiques, et donc fonctionnent comme des  
421 puits ou soit elles relâchent du carbone et fonctionnent comme des sources.

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

Tableau 1.3 – Vitesse apparente d’accumulation du carbon à long terme en gC m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>

min – max	moyenne	référence
20 – 140	?	Mitra2005
?	18.6	Yu2009
	17.2	Gorham2012
	20	Jones2010
	16.2	Borren2004
	18.5	Packalen2014
	19.4	Vitt2000
	19	Turunen2004
5.74 – 129.31	33.66	Xing2015

### <sup>426</sup> 1.2.3 Bilans de carbone

<sup>427</sup> Le calcul d’un bilan de carbone à l’échelle d’un écosystème permet de détermi-  
<sup>428</sup> ner si l’équilibre (où le déséquilibre) des flux tend à stocker du carbone, le système  
<sup>429</sup> fonctionnant alors comme un puits, ou à libérer du carbone, le système fonctionnant  
<sup>430</sup> alors comme une source. Il existe différentes façons de réaliser le bilan de carbone d’une  
<sup>431</sup> tourbière que l’on peut séparer en deux approches principales. La première approche  
<sup>432</sup> consiste à utiliser l’archive tourbeuse pour estimer des vitesses d’accumulation de la  
<sup>433</sup> tourbe. Cette méthode permet d’étudier la fonction puits sur des temps long (derniers  
<sup>434</sup> millénaires) et de lier d’éventuels changements dans les vitesses d’accumulation à des  
<sup>435</sup> facteurs environnementaux. La seconde approche se base d’avantage sur des mesures  
<sup>436</sup> actuelles des différents flux afin d’étudier, sur des temps forcément plus court, l’évolu-  
<sup>437</sup> tion de la prépondérance puits/source d’un écosystème. Les deux approches sont donc  
<sup>438</sup> complémentaires.

### <sup>439</sup> passé

<sup>440</sup> long-term apparent rate of carbon accumulation (LORCA) datations + dry bulk  
<sup>441</sup> density + carbon content (Tableau 1.3)

<sup>442</sup> tableau LORCA ajouter colonne contexte (exple : 7 tourbières ombro-  
<sup>443</sup> trophe)

444 présent

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

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

448 — ENE : Échange Net de l'Écosystème

449 — PPB : Production Primaire Brute

450 — Re : Respiration de l'Écosystème

451 —  $F_{COP}$  : Flux de Carbone Organique Dissous

452 —  $F_{COP}$  : Flux de Carbone Organique Particulaire

453 —  $F_{CH_4}$  : Flux de Méthane

454 —  $F_{CID}$  : Flux de Carbone Inorganique Dissous

455 —  $F_{COV}$  : Flux de Composés Organique Volatils

456 —  $F_{CO}$  : Flux de Monoxyde de Carbone

457 Les bilans les plus complets réalisées sur les tourbières comprennent la partie ga-  
458 zeuse, dissoute...

459 Dans les tourbières, les flux de  $CO_2$  sont généralement les plus importants (**Réf**  
460 **needed**), puis les flux de  $CH_4$  et/ou de COD et enfin les flux de COP.

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

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

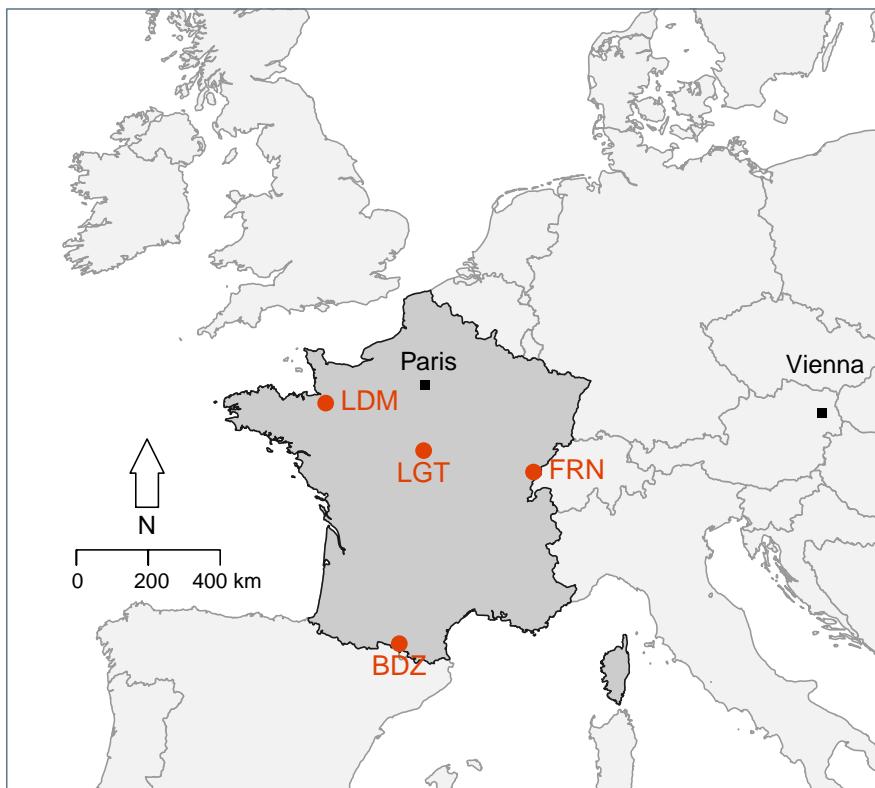
## <sup>465</sup> 2 Sites d'études et méthodologies employées

<sup>466</sup>

<sup>467</sup>	<b>2.1 Présentation de la tourbière de La Guette . . . . .</b>	<b>26</b>
<sup>468</sup>		
<sup>469</sup>	<b>2.2 Autres sites du service national d'observation . . . . .</b>	<b>31</b>
<sup>470</sup>		
<sup>471</sup>	<b>2.3 Mesures de flux . . . . .</b>	<b>32</b>
<sup>472</sup>	2.3.1 Présentation des méthodologies possibles . . . . .	32
<sup>473</sup>	2.3.2 Les mesures de CO <sub>2</sub> . . . . .	33
<sup>474</sup>	2.3.3 Les mesures de CH <sub>4</sub> . . . . .	35
<sup>475</sup>	2.3.4 Le calcul des flux . . . . .	36
<sup>476</sup>	<b>2.4 Facteurs contrôlants . . . . .</b>	<b>37</b>
<sup>477</sup>	2.4.1 acquisitions automatisées . . . . .	37
<sup>478</sup>		

## 479 2.1 Présentation de la tourbière de La Guette

480 Le site d'étude, la tourbière de La Guette, est l'un des quatre sites du service  
481 national d'observation des tourbières (SNOT) qui vise à étudier la fonction puits de  
482 carbone des tourbières tempérées notamment vis-à-vis des changements globaux.



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

FIGURE 2.1 – Site d'études SNO

483 La tourbière de La Guette est située à Neuvy-sur-Barangeon, en Sologne, ( $N\ 47^{\circ}19'44''$ ,  
484 E  $2^{\circ}17'04''$ ) dans le département du Cher (Figure 2.1). Le site s'étend sur une surface  
485 d'une vingtaine d'hectare avec une géométrie relativement allongée 2.2. Cette surface  
486 la classe parmi les plus grandes de Sologne. L'épaisseur moyenne de la tourbe est de  
487 80 cm avec des maximums locaux atteignant 180 cm. La tourbière de La Guette est pro-  
488 bablement topogène (**Réf needed**), formée par l'accumulation d'eau de pluie dans une  
489 cuvette imperméabilisée par une couche d'argile issue d'alluvions de la rivière du même  
490 nom (La Guette). Les précipitations annuelles moyennes sur le site sont de 880 mm et

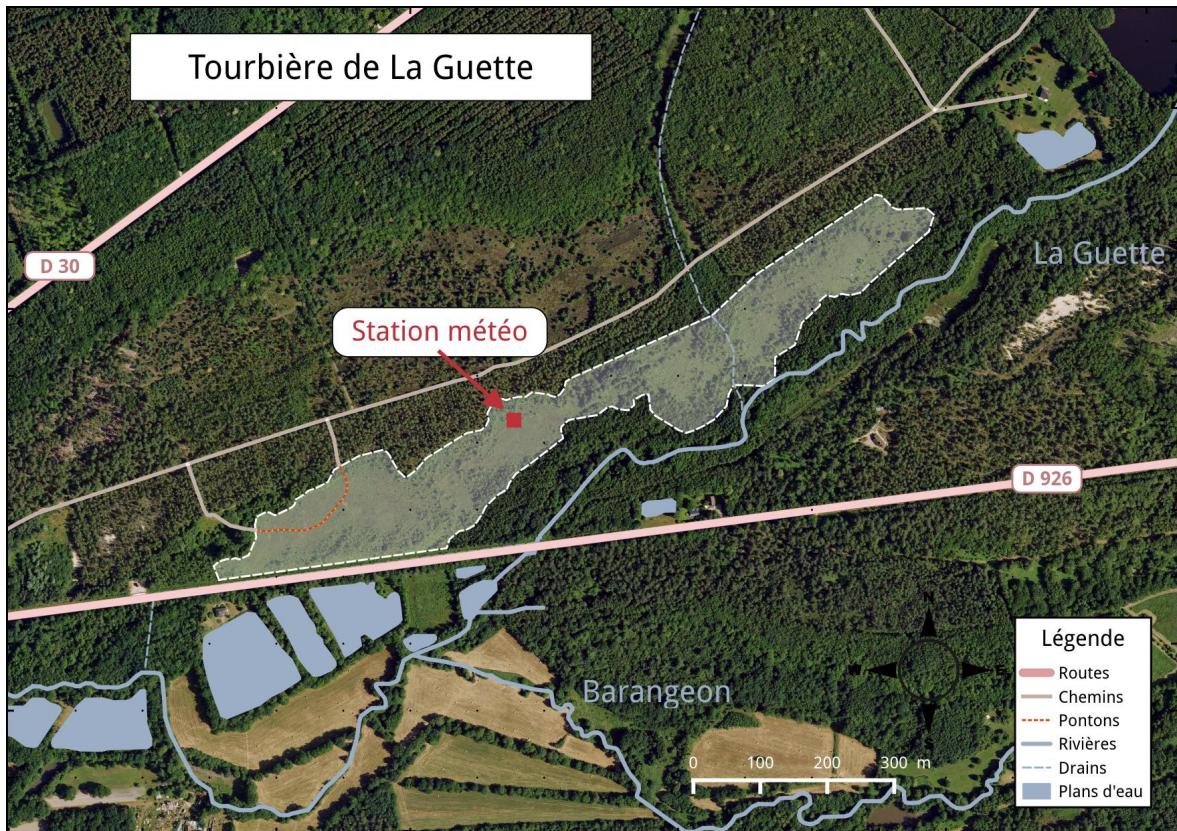


FIGURE 2.2 – Carte de la tourbière de La Guette

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

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

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

## 2.1. Présentation de la tourbière de La Guette

---

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

524 Au cours des dernières années, les précipitations sont relativement différentes avec  
525 deux années plus sèche que la moyenne avant 2013 et deux années plus humide en 2013  
526 et 2014 (Figure 2.4). On observe également cette dualité au niveau du niveau de la  
527 nappe. Avant 2013 les étés sont marqués par des étiages important avec des baisses du  
528 niveau de nappe allant jusqu'à  $-60 \text{ cm}$  en 2012 (Figure 2.5). Après 2013, les étiages  
529 sont beaucoup moins importants sur le site (Figure 2.6). Les variations inter-annuelles  
530 de la température moyenne de l'air semblent moins marquées. L'année 2011 est très  
531 proche de 2014 avec une température moyenne supérieure à  $11^\circ\text{C}$ . De la même façon  
532 les années 2012 et 2013 sont très proche avec des température moyenne inférieure à  
533  $10^\circ\text{C}$ .



(a) *Sphagnum – Eriophorum austifolium*



(b) *Erica tetralix – Molinia caerulea*



(c) *Molinia caerulea*

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

## 2.1. Présentation de la tourbière de La Guette

---

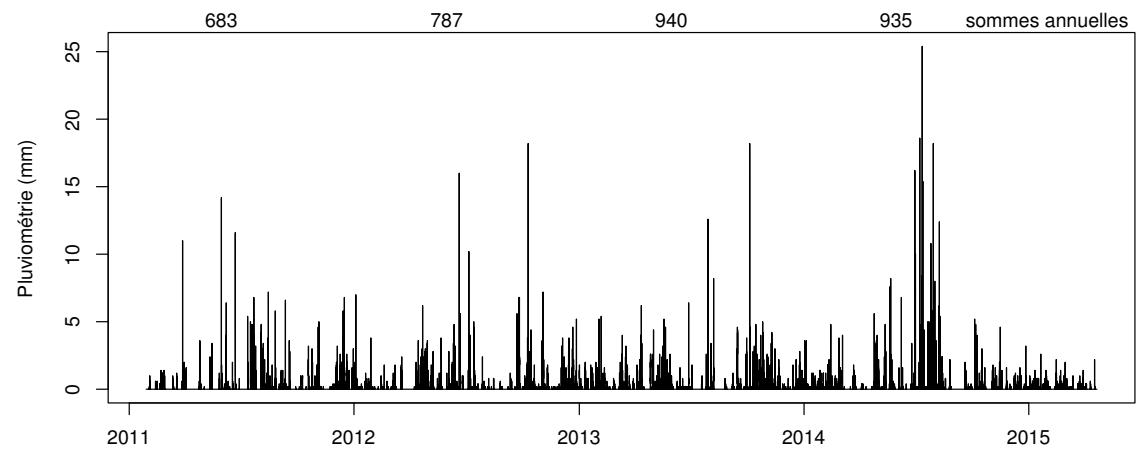


FIGURE 2.4 – Évolution du niveau de la pluviométrie, en mm, des années 2011 à 2014

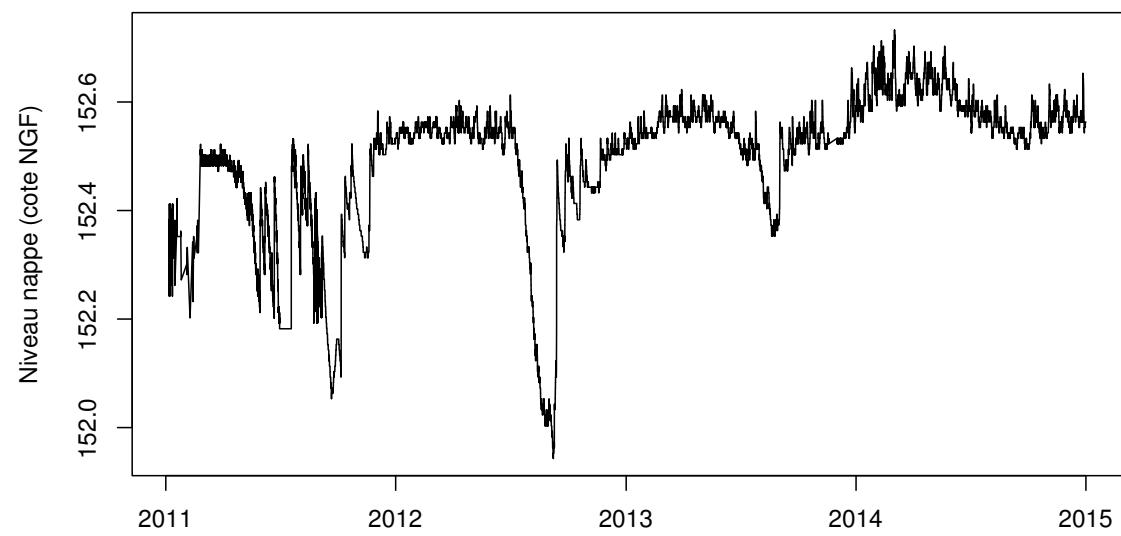


FIGURE 2.5 – Évolution du niveau de la nappe, en cm par rapport à la surface, des années 2011 à 2014

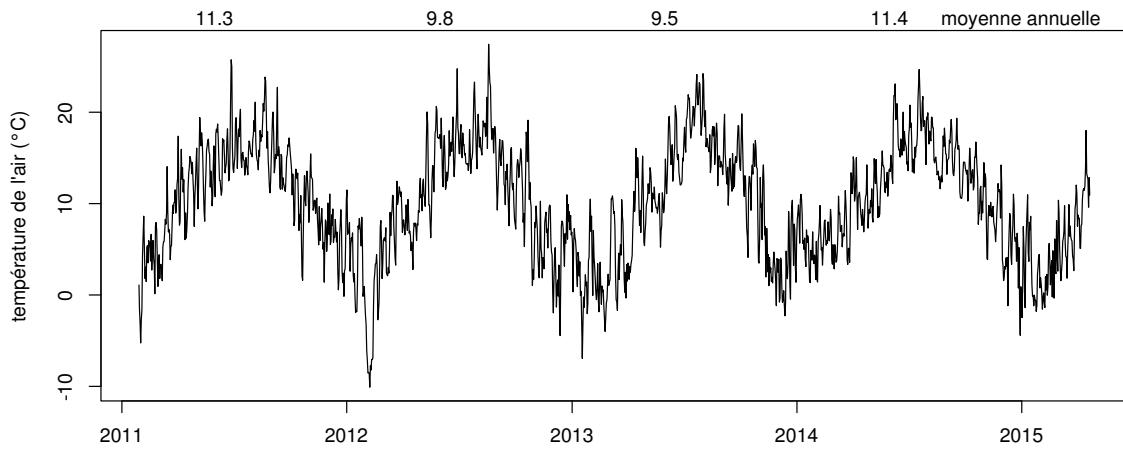


FIGURE 2.6 – Évolution de la température de l'air (en °C) des années 2011 à 2014

## <sup>534</sup> 2.2 Autres sites du service national d'obser- <sup>535</sup> vation

<sup>536</sup> Bien que moins étudiés, les autres sites du SNOT, Bernadouze, Frasne et Landemara-  
<sup>537</sup> rais ont également fait l'objet d'un suivi ponctuel en 2013. La tourbière de Bernadouze  
<sup>538</sup> est situé à 1400 m dans les Pyrénées, en Ariège (N 42°48'09'', E 1°25'24''). Elle est  
<sup>539</sup> relativement petite avec 3,75 ha seulement. La tourbière de Frasne est situé à 840 m  
<sup>540</sup> dans le Doubs et s'étend sur une surface de 98 ha. Enfin la tourbière de Landemarais  
<sup>541</sup> est située en Ille-et-villaine, à 154 m et s'étend sur 23 ha. les températures annuelles  
<sup>542</sup> moyennes sur ces trois sites sont respectivement de 6, 7,5 et 11 °C. les précipitations  
<sup>543</sup> annuelles étant de 1700, 1400, 870 mm.

<sup>544</sup> Au sein de ses sites de nombreuses mesures ont été effectuées et notamment des  
<sup>545</sup> mesures de flux de GES notamment le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub>. La méthodologie utilisée pour  
<sup>546</sup> les mesurer étant transverse aux différentes expérimentations elle sera détaillée dans  
<sup>547</sup> ce chapitre.

## <sup>548</sup> 2.3 Mesures de flux

### <sup>549</sup> 2.3.1 Présentation des méthodologies possibles

<sup>550</sup> De nombreuses techniques permettent de mesurer des flux de gaz, avec en premier  
<sup>551</sup> lieu les méthodes de chambres.

<sup>552</sup> Les chambres peuvent être ouvertes, c'est à dire que la mesure se fait lorsque le  
<sup>553</sup> gaz à l'intérieur de la chambre à l'équilibre avec celui à l'extérieur, ou fermées, dans  
<sup>554</sup> ce cas le gaz à l'intérieur de la chambre n'est pas à l'équilibre avec celui à l'extérieur.  
<sup>555</sup> Elles peuvent également être dynamique, lorsqu'un système de pompe, permettant  
<sup>556</sup> notamment de transporter le gaz jusqu'à l'analyseur, est présent. Ou statique si le  
<sup>557</sup> système est sans flux artificiel.

<sup>558</sup> Trois grandes techniques de chambre existent. D'abord les chambres **dynamiques**  
<sup>559</sup> **ouvertes** qui se basent sur un état d'équilibre et mesurent une différence de concen-  
<sup>560</sup> tration d'un gaz dont une partie passe par la chambre et l'autre non. Cette méthode  
<sup>561</sup> nécessite un système de pompe et donc le passage d'un flux. Ensuite les chambres **dy-  
562 namiques fermées** qui mesurent l'évolution de la concentration du gaz au sein de la  
<sup>563</sup> chambre à l'aide d'un système de pompe permettant l'envoi du gaz dans un analyseur  
<sup>564</sup> externe. Enfin les chambres **statiques fermées** qui mesurent également l'évolution de  
<sup>565</sup> la concentration du gaz au sein de la chambre sans qu'un système de pompe ne soit  
<sup>566</sup> présent. Dans ce cas soit l'analyseur est présent dans la chambre, soit des prélèvements  
<sup>567</sup> sont fait à intervalles réguliers puis analysés par la suite en chromatographie gazeuse.

<sup>568</sup> Il faut noter que les dénominations anglaises de ces méthodes doit faire l'objet d'une  
<sup>569</sup> attention particulière. *Closed chamber* par exemple est parfois utilisé pour se référer  
<sup>570</sup> à l'état ou non d'équilibre, comme défini dans ce document, mais parfois également  
<sup>571</sup> pour désigner les méthodes de chambre sans système de flux ce qui peut prêter à  
<sup>572</sup> confusion [Pumpenan et al. \(2004\)](#). Souvent utilisées les dénominations *open/closed* et  
<sup>573</sup> *dynamic/static* sont décrites dans [Luo et Zhou \(2006\)](#), une autre convention peut être  
<sup>574</sup> rencontrée : *flow-through/non-flow-through* et *steady state/non-steady state* [Livingston](#)

575 et Hutchinson (1995)

576 Ces différentes méthodes ont divers avantages et inconvénients.

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

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

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

### 582 2.3.2 Les mesures de CO<sub>2</sub>

583 Toutes les mesures de CO<sub>2</sub> présentées par la suite ont été faite avec les mêmes ma-  
584 tériels et le même protocole. Les chambres utilisées sont en plexiglass et ont été conçue  
585 (LPC2E) et fabriquées (ISTO) au CNRS. Ce sont des chambres transparentes, cylin-  
586 drique, de 30 cm de diamètre et 30 cm de hauteur. Les mesures de CO<sub>2</sub> à proprement  
587 parler ont été faite à l'aide d'une sonde Vaisala CARBOCAP® GMP 343. La sonde est  
588 directement insérée dans la chambre ainsi qu'une sonde Vaisala HUMICAP® HMP 75  
589 mesurant d'humidité et la température dans la chambre.

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

594 Pour les raisons détaillée précédemment, la méthode mise en œuvre est celle de  
595 la chambre statique fermée, aucun système de pompe n'est donc utilisé. la chambre  
596 est posée sur l'embase, elle contient l'analyseur de CO<sub>2</sub> qui mesure la variation de  
597 la concentration en gaz au cours du temps. Un ventilateur de faible puissance est  
598 également présent à l'intérieur de la chambre afin d'homogénéiser l'air. 1 à 3 min de  
599 stabilisation sont nécessaires après la pose de la chambre afin d'éviter les effets pouvant  
600 y être liés. Ensuite l'enregistrement est lancé, avec l'acquisition toutes les 5 s pendant  
601 5 min de la concentration en CO<sub>2</sub>, de la température et de l'humidité. La mesure se  
602 déroule donc sur une période de temps relativement courte afin de minimiser le dés-

## 2.3. Mesures de flux

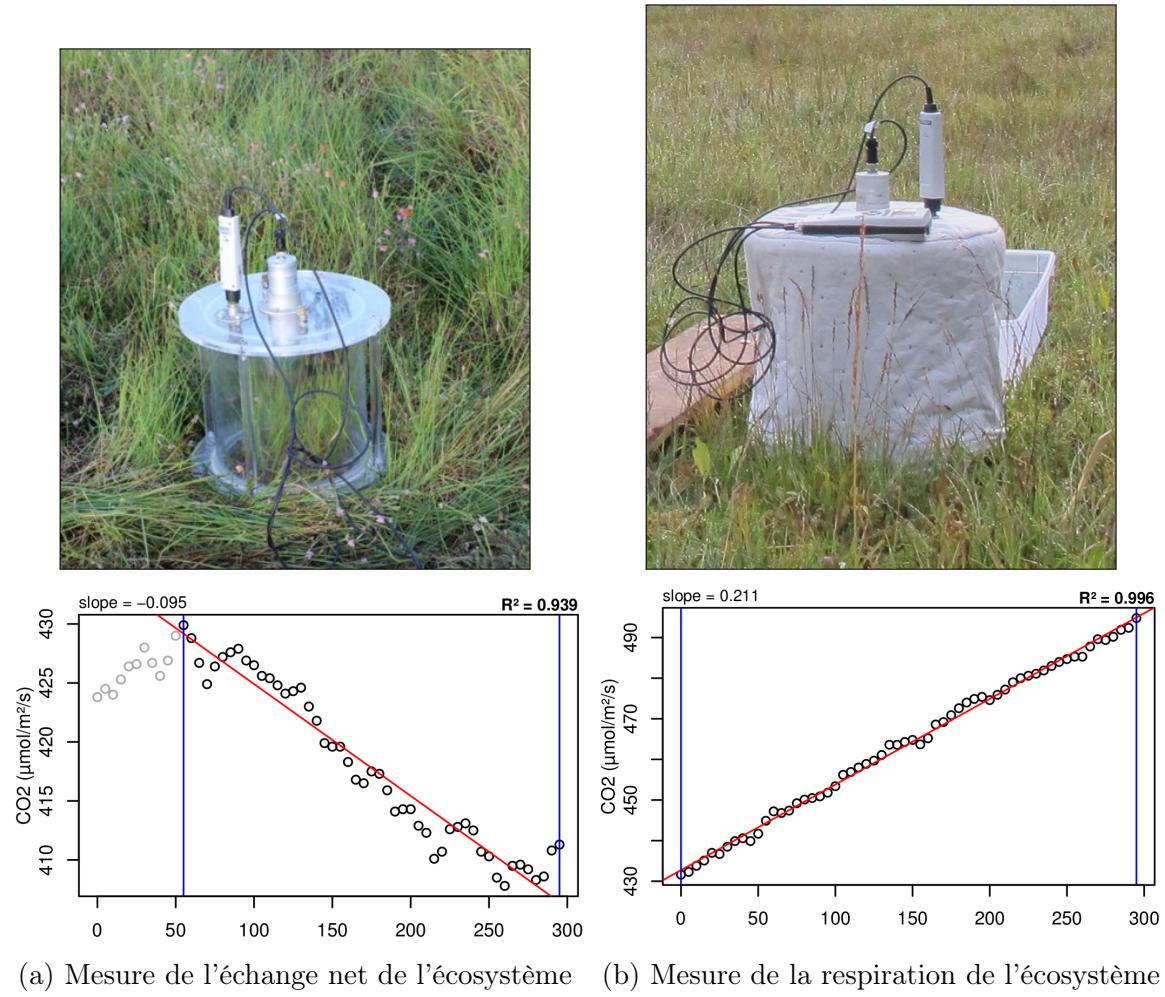


FIGURE 2.7 – Mesures de CO<sub>2</sub>

équilibre avec le milieu extérieur. Dans ce but les mesures ont parfois été manuellement raccourcies, 2 à 3 min d'acquisition, si une pente claire se dégageait rapidement. Ceci notamment lorsque les conditions météorologiques, chaudes et ensoleillées, laissaient supposer une différence rapidement importante vis-à-vis des conditions extérieures. Généralement, deux acquisitions de 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 inexploitable. D'abord le placement de la chambre, cela peut sembler trivial mais positionner la chambre au milieu d'herbacées et de bruyères n'est pas toujours évident. Plus anecdotiquement des sphaignes



FIGURE 2.8 – SPIRIT

615 gelées, recouvrant les bords de l'embase rendent la pose de la chambre difficile voire  
 616 impossible. Enfin selon l'heure de la journée des gradients de concentrations peuvent  
 617 être présent et augmenter localement les concentrations de CO<sub>2</sub> de façon importante  
 618 allant jusqu'à saturer la sonde.

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

### 626 2.3.3 Les mesures de CH<sub>4</sub>

627 Les mesures de CH<sub>4</sub> ont été réalisée avec une chambre aux caractéristiques similaires  
 628 à celles utilisées pour les mesures de CO<sub>2</sub> à l'exception de l'interface avec l'analyseur.

## 2.3. Mesures de flux

---

629 La méthode de la chambre dynamique fermée a été utilisée pour réaliser ces mesures,  
630 elle diffère donc légèrement de celle utilisée pour le CO<sub>2</sub> puisqu'elle nécessite la mise en  
631 oeuvre d'un système de pompe pour transporter le gaz jusqu'à l'analyseur. Les mesures  
632 de concentration en CH<sub>4</sub> ont été réalisée à l'aide du SPIRIT (Figure 2.8).

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

### 654 2.3.4 Le calcul des flux

655 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  
656 suivante :

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

657       Avec :

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

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

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

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

662       T : la température dans la chambre en K

663       V : le volume de la chambre en  $\text{m}^3$

664       S : la surface occupée par l'embase en  $\text{m}^2$

## 665      2.4     Facteurs contrôlants

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

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

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

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

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

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

672       expérimentations.

### 673      2.4.1   acquisitions automatisées

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

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

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

677       2014 puis toutes les demi-heures par la suite. Les paramètres enregistrés sont la pres-

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

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

## 2.4. Facteurs contrôlants

---

680   ment permis l'acquisition de la température de l'air et de la tourbe à -5, -10, -20 et  
681   -40 cm. Installées à la même époque, quatre sondes **OTT?** de mesure du niveau de  
682   la nappe d'eau permettent le suivi du niveau de la nappe dans la tourbière.

# <sup>683</sup> 3 Bilan de C de la tourbière de La Guette

<sup>684</sup>

<sup>685</sup>	<b>3.1 Introduction</b>	<sup>40</sup>
<sup>686</sup>	<b>3.2 Procédure expérimentale et analytique</b>	<sup>40</sup>
<sup>687</sup>	3.2.1 Méthodes de mesure	<sup>40</sup>
<sup>688</sup>	3.2.2 Modélisation du bilan de C	<sup>42</sup>
<sup>689</sup>	<b>3.3 Résultats</b>	<sup>46</sup>
<sup>690</sup>	3.3.1 Évolution générale des flux et facteurs contrôlants sur la tour-	
<sup>691</sup>	bière de La Guette	<sup>46</sup>
<sup>692</sup>	3.3.2 Sélection des modèles	<sup>52</sup>
<sup>693</sup>	3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle	
<sup>694</sup>	de l'écosystème	<sup>59</sup>
<sup>695</sup>	3.3.4 Variabilité spatiale du bilan	<sup>66</sup>
<sup>696</sup>	<b>3.4 Discussion</b>	<sup>68</sup>
<sup>697</sup>	3.4.1 Estimations des flux	<sup>68</sup>
<sup>698</sup>	3.4.2 Estimations des bilans	<sup>71</sup>
<sup>699</sup>	3.4.3 Sensibilité et limitations du bilan	<sup>71</sup>
<sup>700</sup>	3.4.4 Représentativité locale du modèle	<sup>72</sup>
<sup>701</sup>	3.4.5 Variation du bilan avec la végétation	<sup>72</sup>
<sup>702</sup>	3.4.6 perspectives	<sup>73</sup>
<sup>703</sup>		
<sup>704</sup>		
<sup>705</sup>		

## 706 3.1 Introduction

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

## 719 3.2 Procédure expérimentale et analytique

### 720 3.2.1 Méthodes de mesure

#### 721 Mesures de flux de gaz

722 Les mesures des flux de CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub> ont été effectués en utilisant la méthode  
723 décrite dans la partie 2.3. En juin 2011, 20 placettes ont été installées<sup>1</sup> selon un échan-  
724 tillonnage aléatoire stratifié : La surface de la tourbière a été divisée selon une grille  
725 de 20 mailles et un point choisi aléatoirement dans chaque maille localise chaque pla-  
726 cette. Cette méthode permet de conserver un échantillonnage aléatoire tout en étant  
727 assuré d'avoir une représentativité homogène du site. Les placettes, délimitées par des

---

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

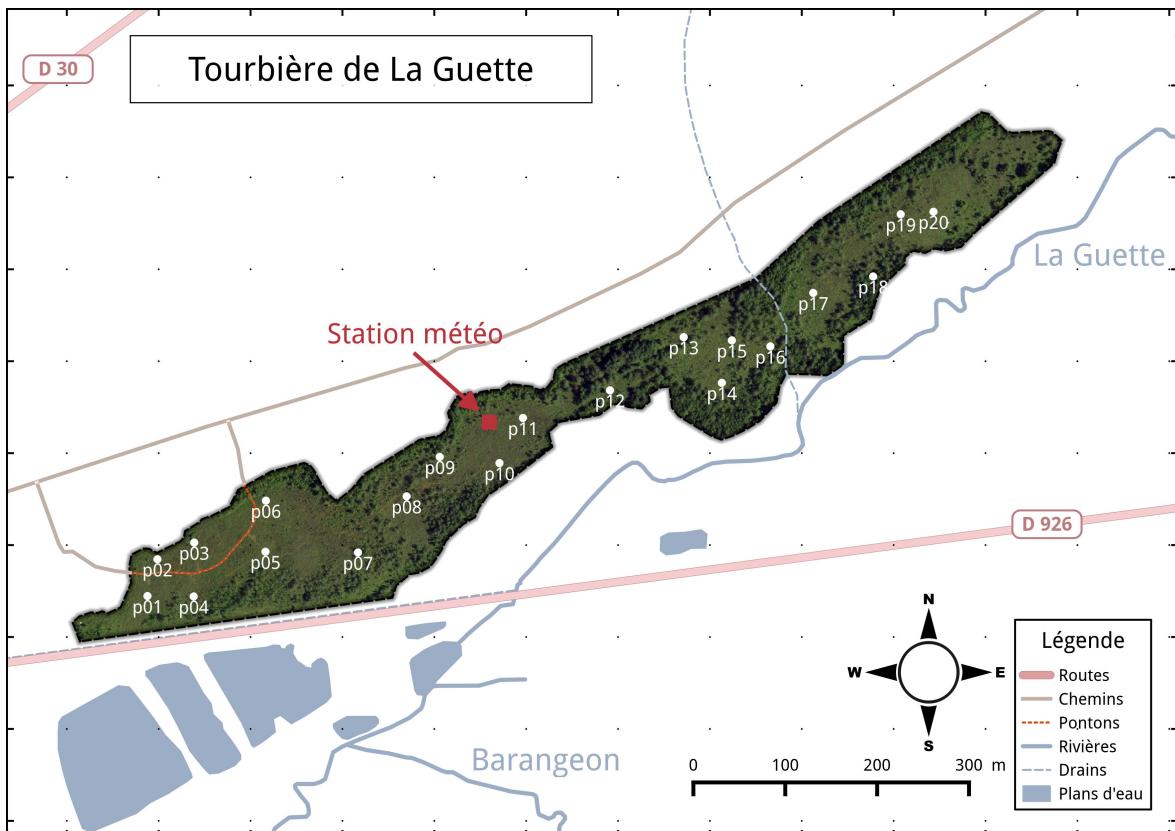


FIGURE 3.1 – Répartition des 20 placettes de mesures suivant un échantillonnage aléatoire stratifié.

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

739 Les flux de gaz mesurés sont le  $\text{CO}_2$  et le  $\text{CH}_4$ . Des tests effectués sur la tourbière  
 740 ayant montré des émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  nulle, ce gaz n'a pas été étudié. Les mesures de  $\text{CO}_2$   
 741 ont été effectuée de mars 2013 à février 2015, avec une fréquence quasiment mensuelle

### **3.2. Procédure expérimentale et analytique**

---

742 (20 campagnes, pour 24 mois de mesure). Quand aux mesures de CH<sub>4</sub> ont été effectuées  
743 avec une fréquence moindre (12 campagnes) principalement liée au difficulté de mise  
744 en oeuvre de l'instrument SPIRIT (lourd, difficilement transportable dans un milieu  
745 tourbeux).

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

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

#### **758 3.2.2 Modélisation du bilan de C**

##### **759 Estimation du bilan et variabilité temporelle**

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

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

769 la PPB (obtenue grâce à l'équation  $PPB = ENE - RE$ ) ont été modélisé séparément.  
770 Les flux en phase gazeuse ont été modélisé en partant d'équations usuellement utilisées  
771 et dans lesquelles la température est le facteur contrôlant majeur. Puis les résidus<sup>2</sup> de  
772 ces modèles de base ont ensuite été étudiés en fonction des facteurs de contrôle restant.  
773 Dans le cas où une tendance est visible, le facteur est intégré.

774 Les modèles ont été comparés avec différents indicateurs, principalement Le R<sup>2</sup>, la  
775 NRMSE et l'AIC. Le R<sup>2</sup> est utilisé comme indicateur de la proportion de la variabilité  
776 des données expliquée par le modèle, sa valeur est comprise entre 0 et 1. La RMSE  
777 et sa normalisation par la moyenne NRMSE sont utilisés comme indicateur de l'écart  
778 entre les données mesurées et les données modélisées. L'AIC (Akaike...) permet de dé-  
779 terminer si l'amélioration d'un modèle suite à l'ajout d'un paramètre est suffisamment  
780 intéressante pour que ce modèle plus complexe soit utilisé.

781 La température a été choisie comme base de départ à la construction des modèles  
782 de RE et PPBsat, à la fois car c'est le facteur de contrôle le plus souvent invoqué et  
783 à la fois car les corrélations avec les flux étaient les plus forte. Concernant la respi-  
784 ration de l'écosystème, les températures utilisées dans la littérature sont variables. La  
785 température qui semble le plus utilisée est la température du sol à -5 cm (Ballantyne  
786 *et al.*, 2014)(Réf needed), même si d'autres, notamment la température de l'air et la  
787 température du sol à -10 cm le sont également régulièrement (Bortoluzzi *et al.*, 2006;  
788 Kim et Verma, 1992). Cette profondeur, -5 cm, est régulièrement utilisée car c'est  
789 dans la tourbe, proche de la surface qu'est produite la majorité du CO<sub>2</sub>. **production**  
790 **CO<sub>2</sub> ? profils ?** C'est également à des profondeurs relativement faibles que se situent  
791 la majorité des racines (Réf needed) qui peuvent contribuer à la respiration du sol  
792 (**de l'écosystème ?**) pour 35 à 60 % (Silvola *et al.*, 1996; Crow et Wieder, 2005). La  
793 RE est estimée directement à partir des données acquises moyennées en partant de la  
794 température connue pour contrôler une grande partie de ce flux. Différents modèles ont  
795 été testés parmi les plus souvent utilisés (linéaire, exponentiel, arrhénius).

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

---

2. Valeurs moyennes - Valeurs moyennes estimées

### **3.2. Procédure expérimentale et analytique**

---

797 dans le contrôle du CH<sub>4</sub>. La température, peut être utilisée (Alm *et al.*, 1999; Bubier  
798 *et al.*, 1995), le niveau de la nappe (Bubier *et al.*, 1993) ou la végétation (Bortoluzzi  
799 *et al.*, 2006).

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

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

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

### **816 Étude de la variabilité spatiale**

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

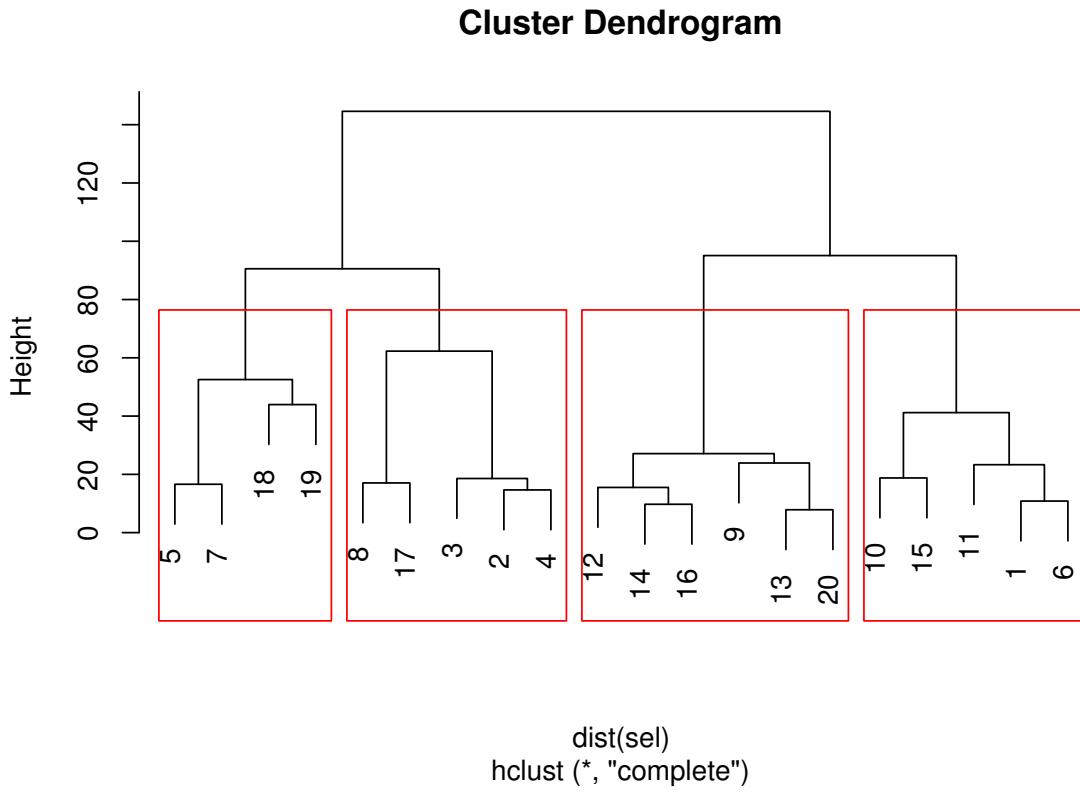


FIGURE 3.2 – Partitionnement des placettes en fonction de leur similarité en termes de composition végétale (pourcentage des strates muscinales, herbacées et arbustives)

composition végétale la plus proche. Ce choix se justifie par le fait que la végétation joue un rôle important tout en étant délicate à prendre en compte. La température, plus facile à mesurer et le niveau de la nappe, qui n'a que peu varié, semblait des choix moins pertinent. Le partitionnement a été fait via une classification hiérarchique et quatre groupes ont été déterminés (Figure 3.2).

### 3.3. Résultats

---

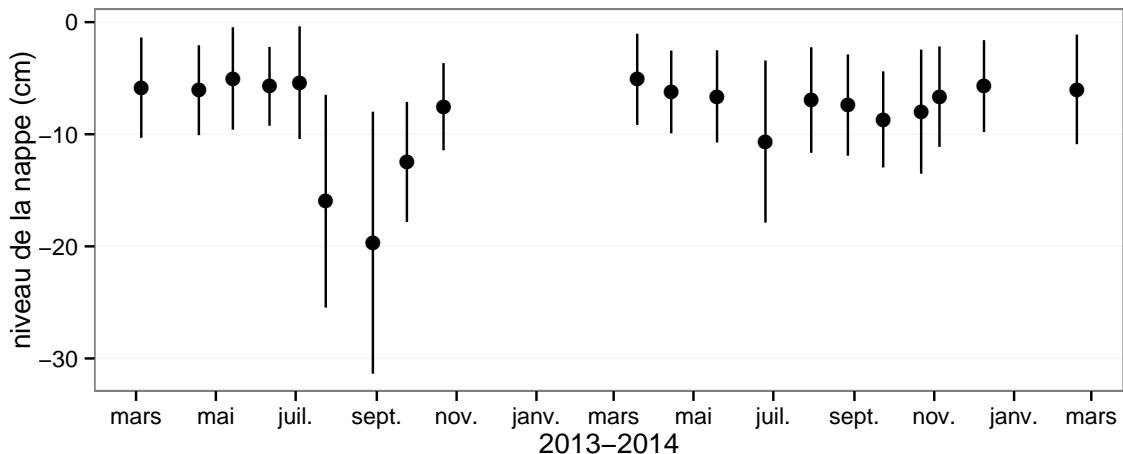


FIGURE 3.3 – Évolution du niveau de la nappe moyen des 20 embases mesuré pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

## 3.3 Résultats

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

#### Les Facteurs contrôlant

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

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

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

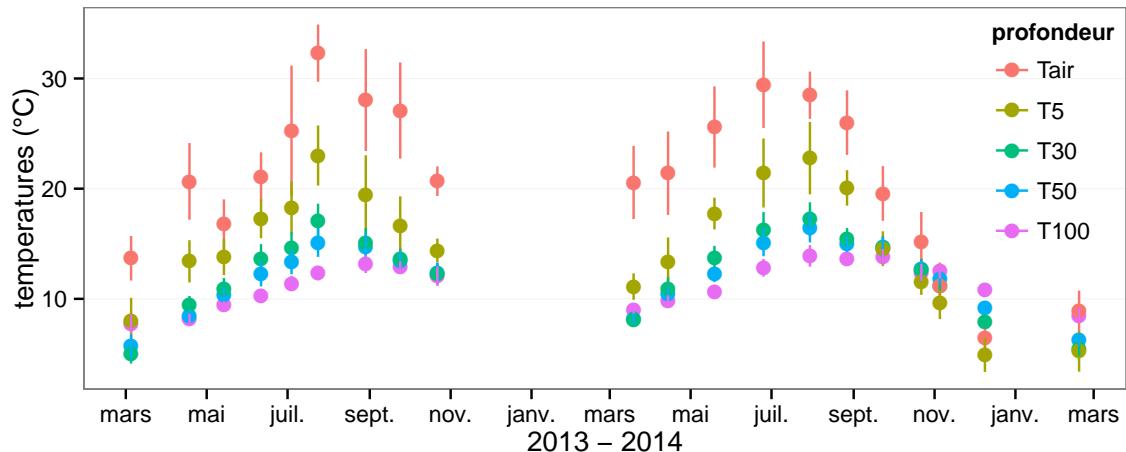


FIGURE 3.4 – Évolution des températures de l'air (Tair) et du sol à -5, -30, -50 et -100 cm (T5, T30, T50 et T100 respectivement) moyenne mesurée lors des campagnes de terrain de mars 2013 à février 2015

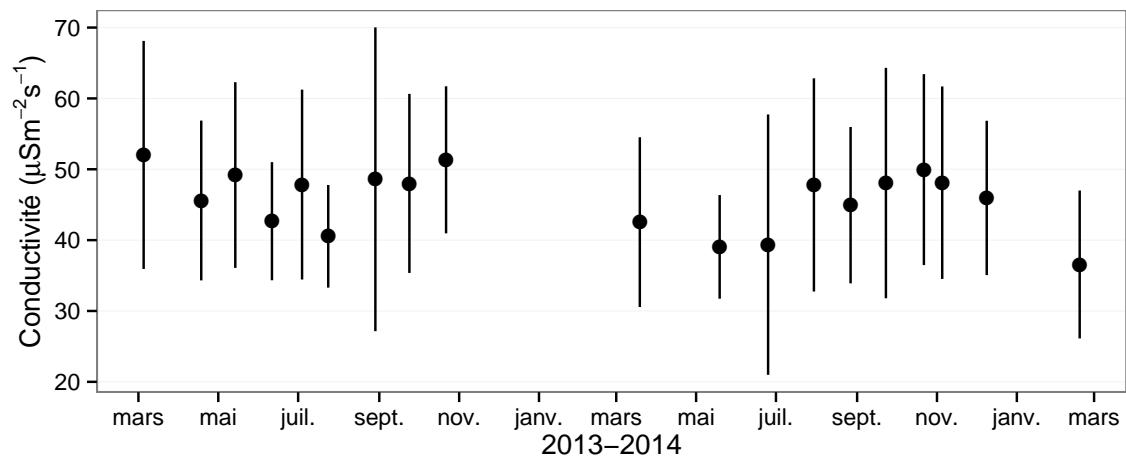


FIGURE 3.5 – Évolution de la conductivité pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

### 3.3. Résultats

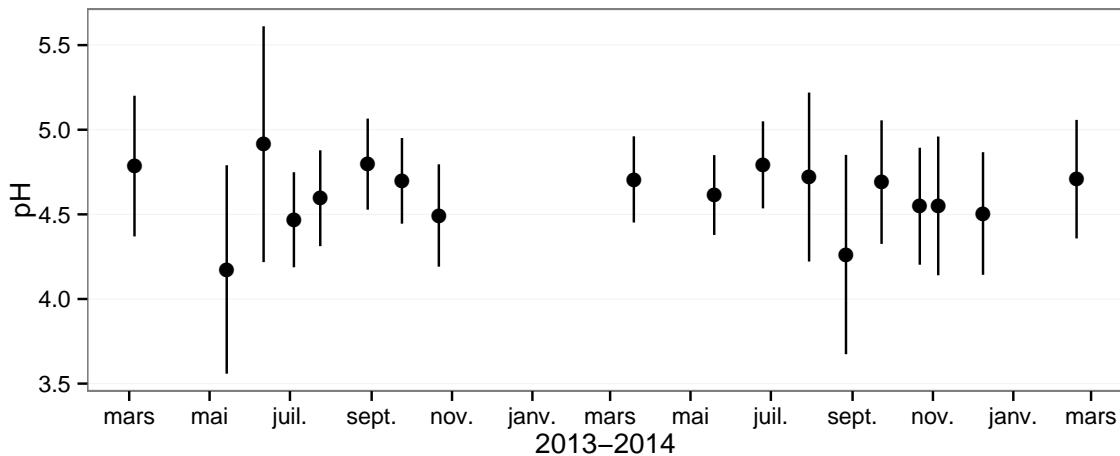


FIGURE 3.6 – Évolution du pH pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

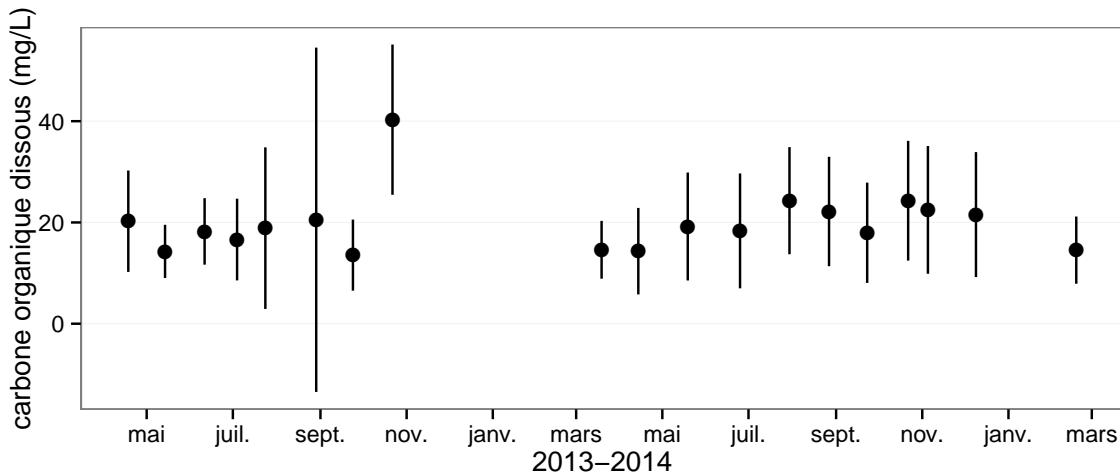


FIGURE 3.7 – Évolution de la concentration en carbone organique dissous dans l'eau du sol pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

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

848 La concentration en carbone organique dissous présente dans l'eau de la tourbière  
849 est compris en moyenne entre 10 et 30 mg L<sup>-1</sup> (figure 3.7).

#### 850 Les flux de carbone

851 L'ensemble des mesures de CO<sub>2</sub> s'étendent de mars 2013 à février 2015. Cependant de novembre 2013 à février 2014 les mesures ont été interrompues suite à des pannes/cassures matérielles. Malgré cela les périodes les plus critiques, notamment la



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

### 3.3. Résultats

---

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

857 En 2013, les valeurs de la PPB augmentent au printemps et une partie de l'été  
858 avec un maximum de  $12,80 \pm 4,91 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  atteint fin juillet, avant de diminuer  
859 à partir d'août. En 2014 le maximum de PPB,  $13,16 \pm 4,70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , est atteint  
860 en juin, soit plus tôt que l'année précédente. Puis pendant l'été et l'automne les va-  
861 leurs décroissent jusqu'à être proche de 0. En moyenne les valeurs de la PPB sont de  
862  $7,12 \pm 5,19 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en 2013 et de  $6,56 \pm 4,72 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en 2014 (Figure 3.8a).

863 La RE en 2013 augmente pendant le printemps et une partie de l'été, elle atteint  
864 un maximum de  $9,43 \pm 3,48 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  en juillet avant de diminuer. En 2014 la RE  
865 atteint, comme la PPB, son maximum plus tôt, en juin à  $7,83 \pm 2,55 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  avant  
866 de décroître jusqu'en hiver pour approcher des valeurs nulles. La moyenne annuelle de  
867 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  
868 2014 :  $3,63 \pm 2,56 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Figure 3.8b).

869 Concernant l'ENE, en 2013 elle augmente jusque  $5,19 \pm 4,51 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , son  
870 maximum en juin, avant de diminuer jusqu'à la fin de l'année. Cependant, cette baisse  
871 est moins homogène que celle des deux flux précédents, avec notamment une augmenta-  
872 tion de l'ENE entre juillet et août 2013. Ceci étant, il faut également noter les valeurs  
873 importantes de la déviation standard particulièrement en juin et en août. En 2014,  
874 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  
875 décroisse. Cette baisse est cependant plus homogène qu'en 2013. les moyennes de l'ENE  
876 en 2013 et 2014 sont très proches et sont respectivement de  $2,85 \pm 3,05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$   
877 et  $2,93 \pm 2,77 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Figure 3.8c).

878 Le CH<sub>4</sub> comme le CO<sub>2</sub> montre une variabilité saisonnière importante, cependant  
879 les flux mesurés sont un ordre de grandeur en dessous de ceux mesurés pour le CO<sub>2</sub>  
880 (Figure 3.9). À l'inverse de ce dernier, l'importance des flux de CH<sub>4</sub> mesurés en 2013 et  
881 2014 est différente. En 2013 les flux sont moins importants qu'en 2014 avec des maximums  
882 de  $0,078$  et  $0,196 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  respectivement.

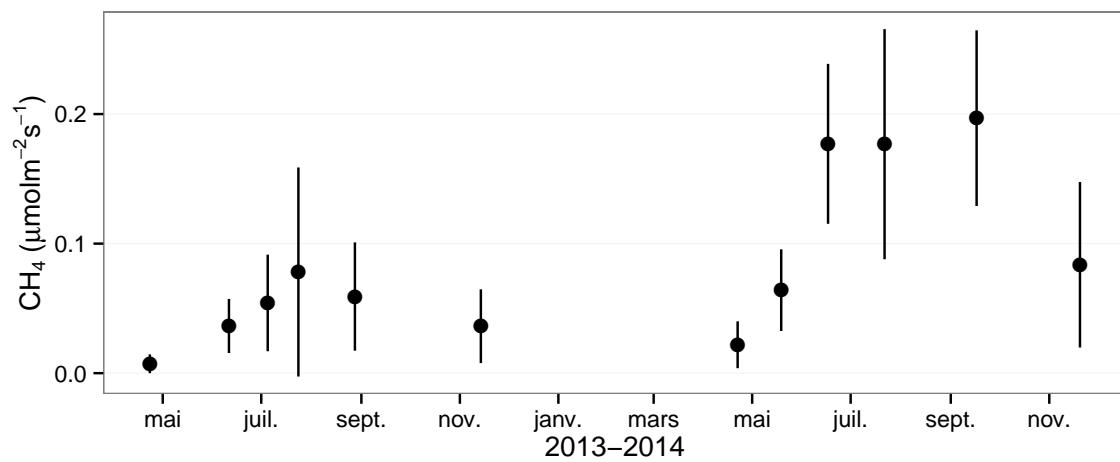


FIGURE 3.9 – Évolution des flux de méthane moyen (N ?) pendant la période de mesure (mars 2013 – février 2015)

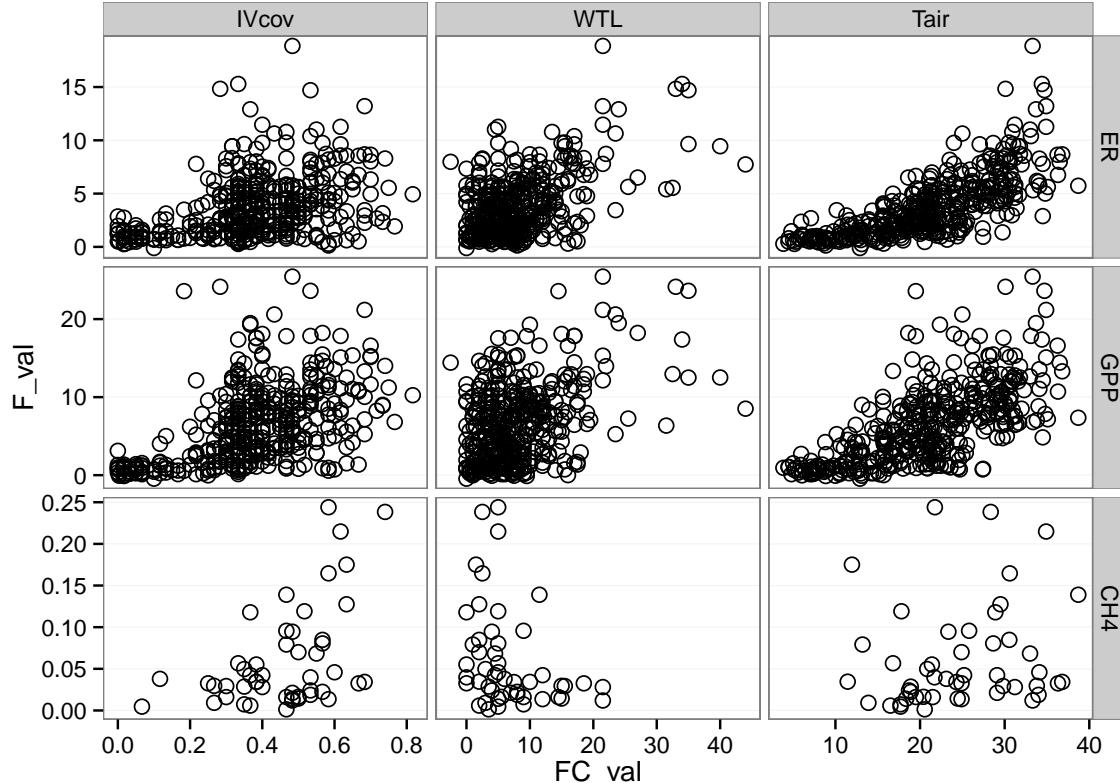


FIGURE 3.10 – Relations entre les flux de gaz et une sélection de facteurs contrôlant

### 3.3. Résultats

---

#### 883 Les relations flux gazeux et facteurs contrôlant

884 Comme précisé précédemment, le niveau de la nappe n'a que peu varié pendant les  
885 deux années de mesures. De ce fait aucune relation claire ne se distingue entre les flux  
886 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 3.10).  
887 La PPB et la RE présentent cependant des relations avec la température de l'air, et  
888 l'indice de végétation, même si pour ce dernier les tendances sont moins évidentes,  
889 particulièrement pour la RE. Le CH<sub>4</sub> quant à lui ne présente pas de relation avec la  
890 température de l'air, mais une tendance exponentielle est visible vis-à-vis de l'indice  
891 de végétation. (**CH<sub>4</sub> et Température dans la tourbe ?**)

#### 892 3.3.2 Sélection des modèles

##### 893 La Production Primaire Brute

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

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

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

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

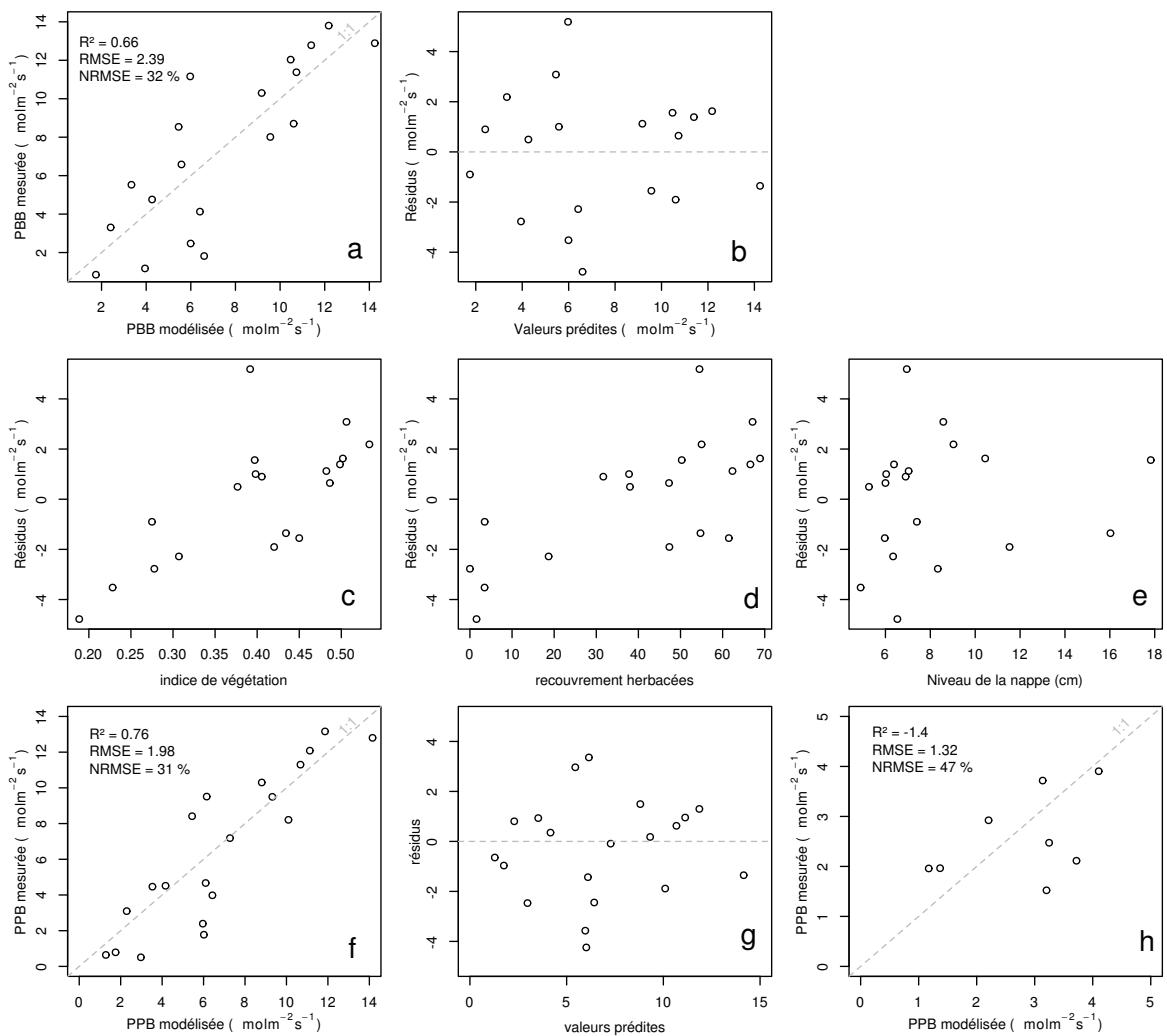


FIGURE 3.11 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.1

### 3.3. Résultats

---

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

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

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

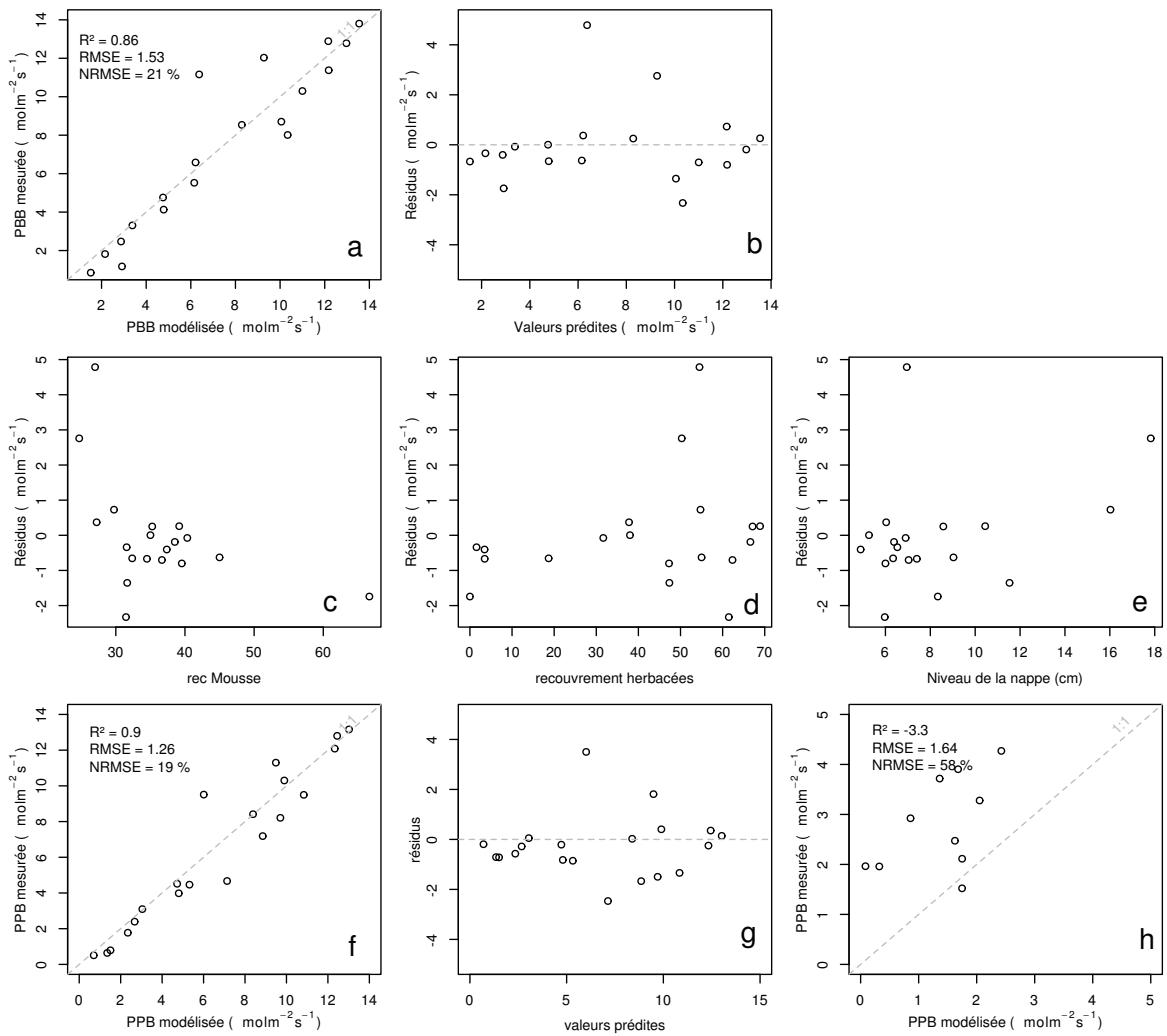


FIGURE 3.12 – PPBsat modèles Tair utilisant l'équation 3.3

### 3.3. Résultats

---

ou le niveau de la nappe (Figure 3.12-c,d,e). Comme précédemment, l'erreur standard de la PPB, de 19 %, est du même ordre de grandeur que celle de PPBsat. Pour PPBsat comme pour PPB l'erreur standard diminue donc avec l'ajout de l'indice de végétation lors de la calibration. En revanche, l'évaluation sur les données de test de ce dernier modèle montre une erreur importante (58 %), supérieure à celle du modèle ne prenant pas en compte la végétation. Cette évaluation montre également une tendance importante à sous-estimer les valeurs mesurées. Néanmoins ce modèle intégrant la végétation permet de diminuer de façon importante l'erreur standard associée à l'estimation des paramètres de l'équation. Dans la suite du texte le modèle permettant d'estimer la PPB à partir des équations 3.1 et 3.2 sera nommé PPB-1 et celui utilisant les équations 3.3 et 3.2 sera nommée PPB-2.

### 943 La Respiration de l'Écosystème

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

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

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

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

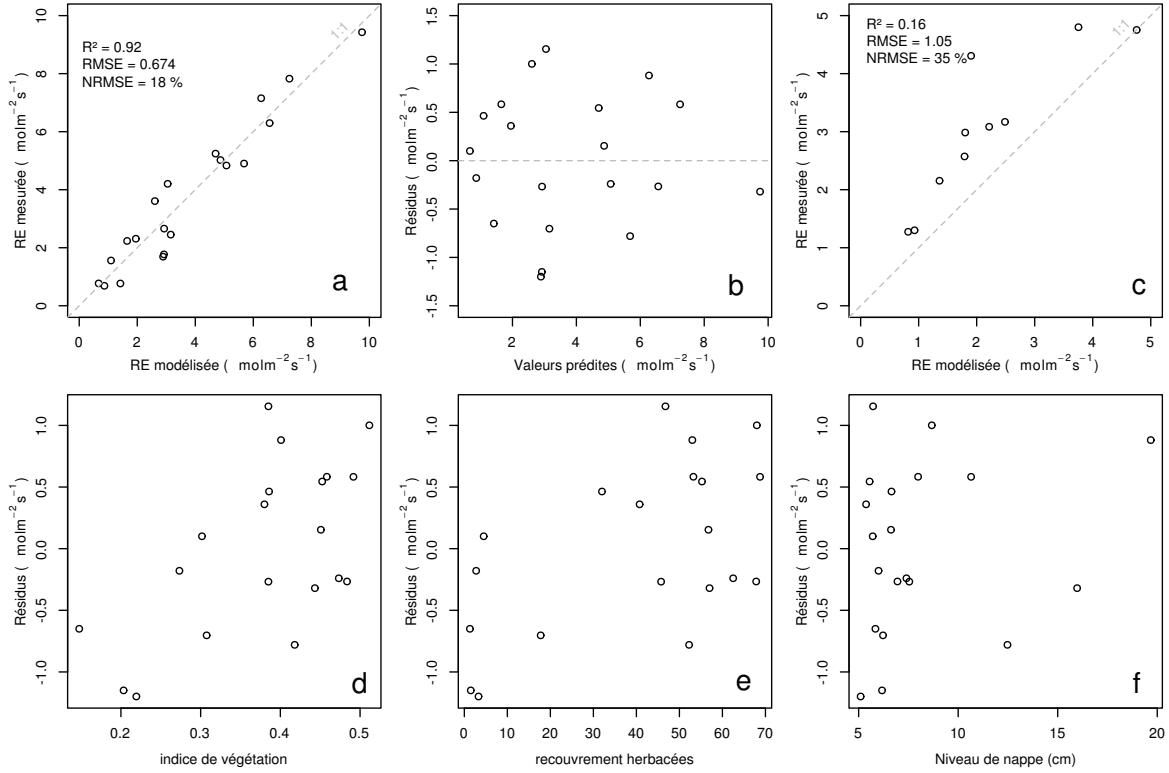


FIGURE 3.13 – RE modèles avec Tair

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

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

### 3.3. Résultats

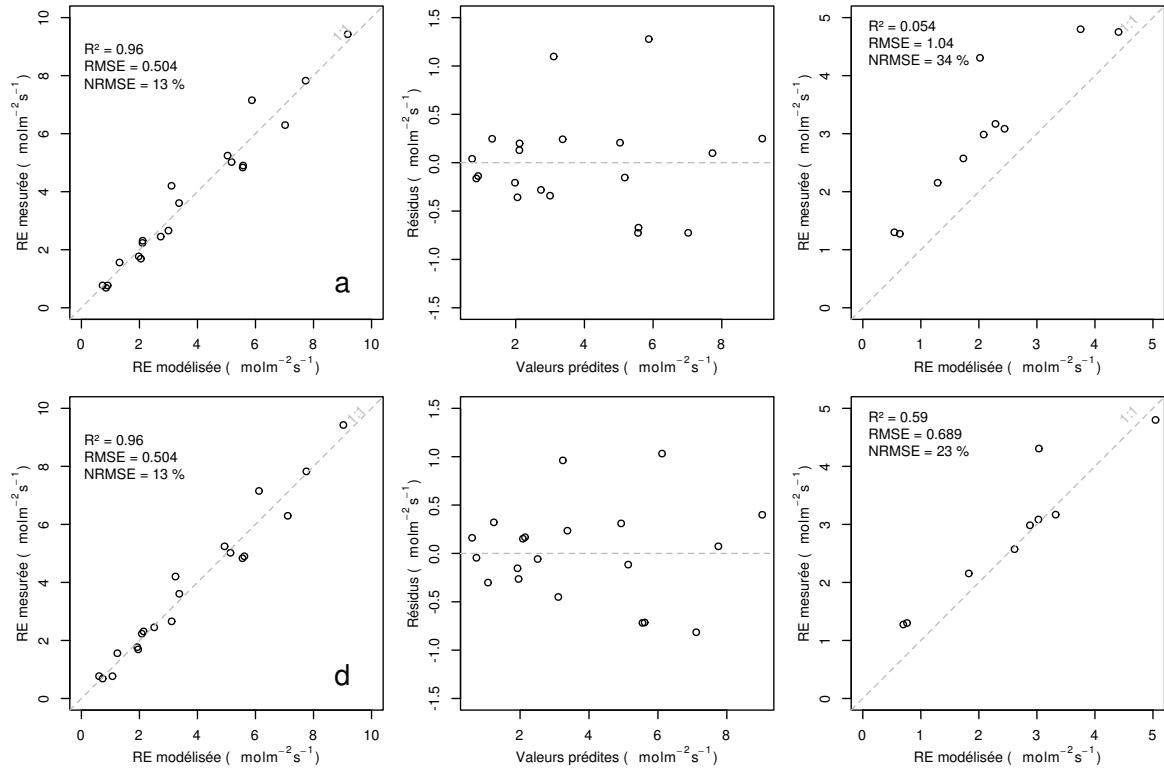


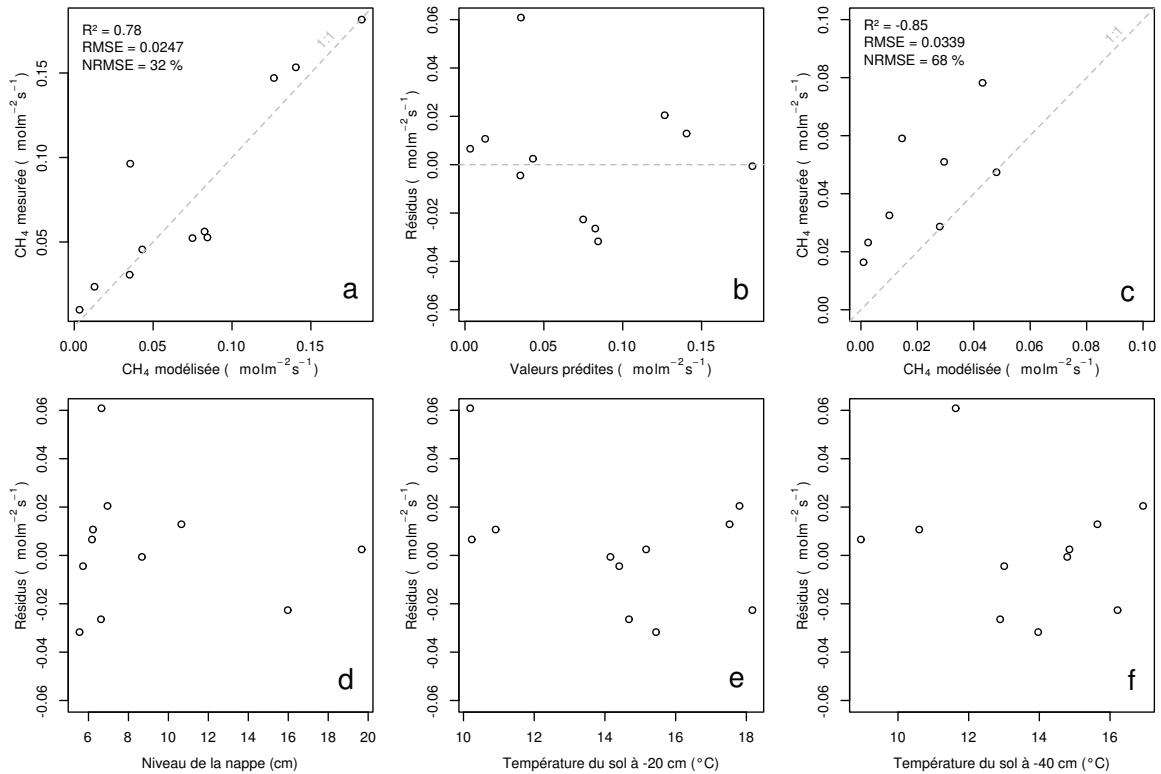
FIGURE 3.14 – RE modèles avec Tair

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

967 Les relations entre les facteurs contrôlant mesurés et le CH<sub>4</sub> sont moins claires  
 968 que celles concernant le CO<sub>2</sub>. La corrélation la plus importante semble être liée à  
 969 la végétation (Figure 3.10). le méthane est également corrélé avec les températures,  
 970 faiblement avec les températures de surface puis plus fortement avec les températures  
 971 du sol à plus forte profondeur. Enfin il est anti-corrélé ( $R=-0.51$ ) avec le niveau de la  
 972 nappe. Les relations CH<sub>4</sub> et végétation ont donc pu être modélisées avec

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

973 Avec les données acquises, l'indice de végétation est le meilleur prédicteur (Fi-  
 974 gure 3.15), il explique 78 % de la variabilité du CH<sub>4</sub> avec une erreur standard de 32 %.  
 975 Aucune tendance ne semble se dégager entre les résidus de cette équation et les facteurs  
 976 contrôlant mesurés. L'évaluation de cette équation montre une tendance à sous-estimer  
 977 les flux de CH<sub>4</sub> et une erreur standard qui double par rapport à la phase de calibration

FIGURE 3.15 – CH<sub>4</sub> modèle H

en atteignant 68 %. Les détails de l'estimation des paramètres de l'équation 3.7 est visible dans le tableau 3.1 sous le nom FCH4.

## 980 Le COD

### 981 3.3.3 Le bilan de carbone de la tourbière de La Guette à l'échelle 982 de l'écosystème

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

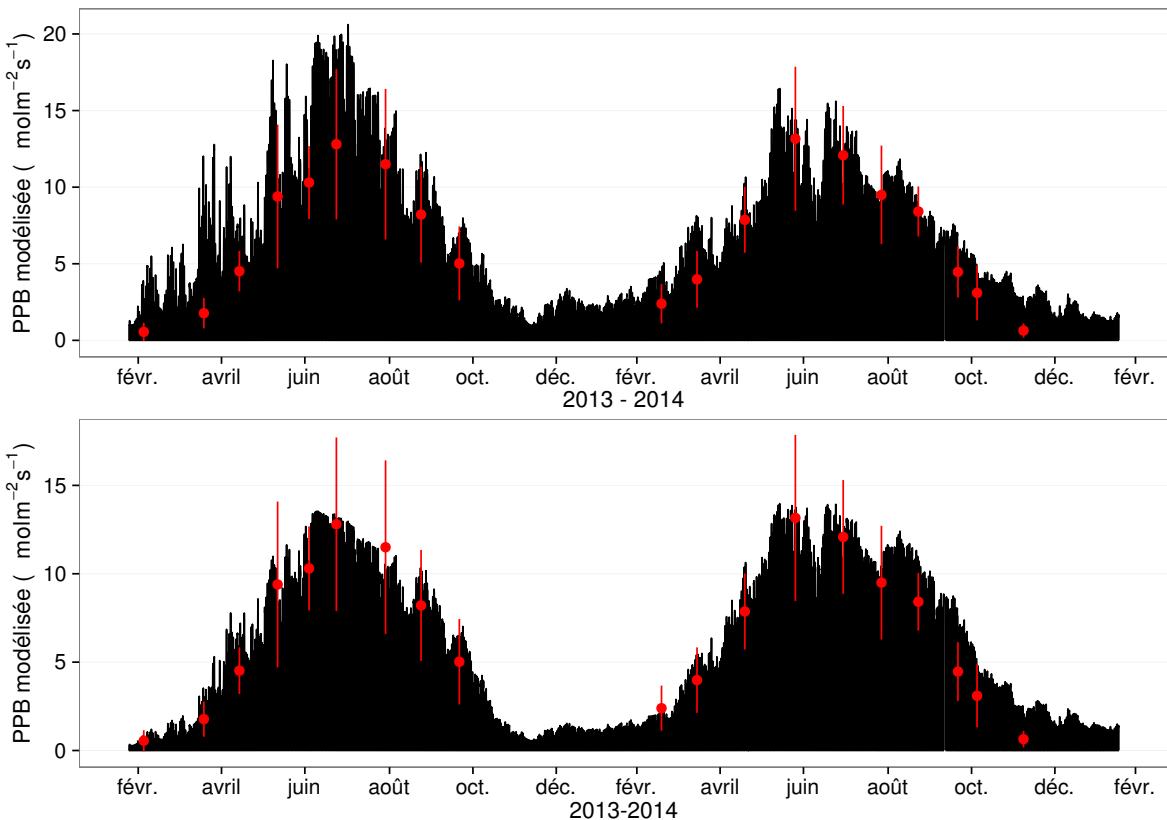
987 Pour la RE, l'interpolation suit également les variations saisonnières mesurées men-  
988 suellement (Figure 3.17). Les gammes de valeurs mesurées sont très proche des gammes  
989 interpolées. L'interpolation des flux de la RE est très proche quel que soit le modèle  
990 (Figure 3.17) utilisé.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

### 3.3. Résultats

---

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

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

FIGURE 3.16 – Flux de CO<sub>2</sub> interpolé à partir de PPB-1 et PPB-2

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

992 Les flux de CH<sub>4</sub> interpolés (Figure 3.18), suivent également une cyclicité saisonnière.

993 L'estimation du CH<sub>4</sub> semble rendre compte dans les grandes lignes de la différence de

994 flux mesurée entre 2013 et 2014.

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

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

997 PPB stocke du carbone pour 1070 à 1290 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> pour PPB-2 et PPB-1 respecti-

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

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

1000 2013 qu'en 2014. Tandis que le modèle prenant en compte la végétation (PPB-2) stocke

1001 moins de carbone en 2013 par rapport à 2014. L'intégration de la végétation minimise

1002 également l'erreur standard de l'estimation, la divisant approximativement par deux.

1003 La différence de comportement, entre les années de mesures, liée à l'intégration de

1004 la végétation est également visible sur l'estimation de la RE. La prise en compte de la

### 3.3. Résultats

---

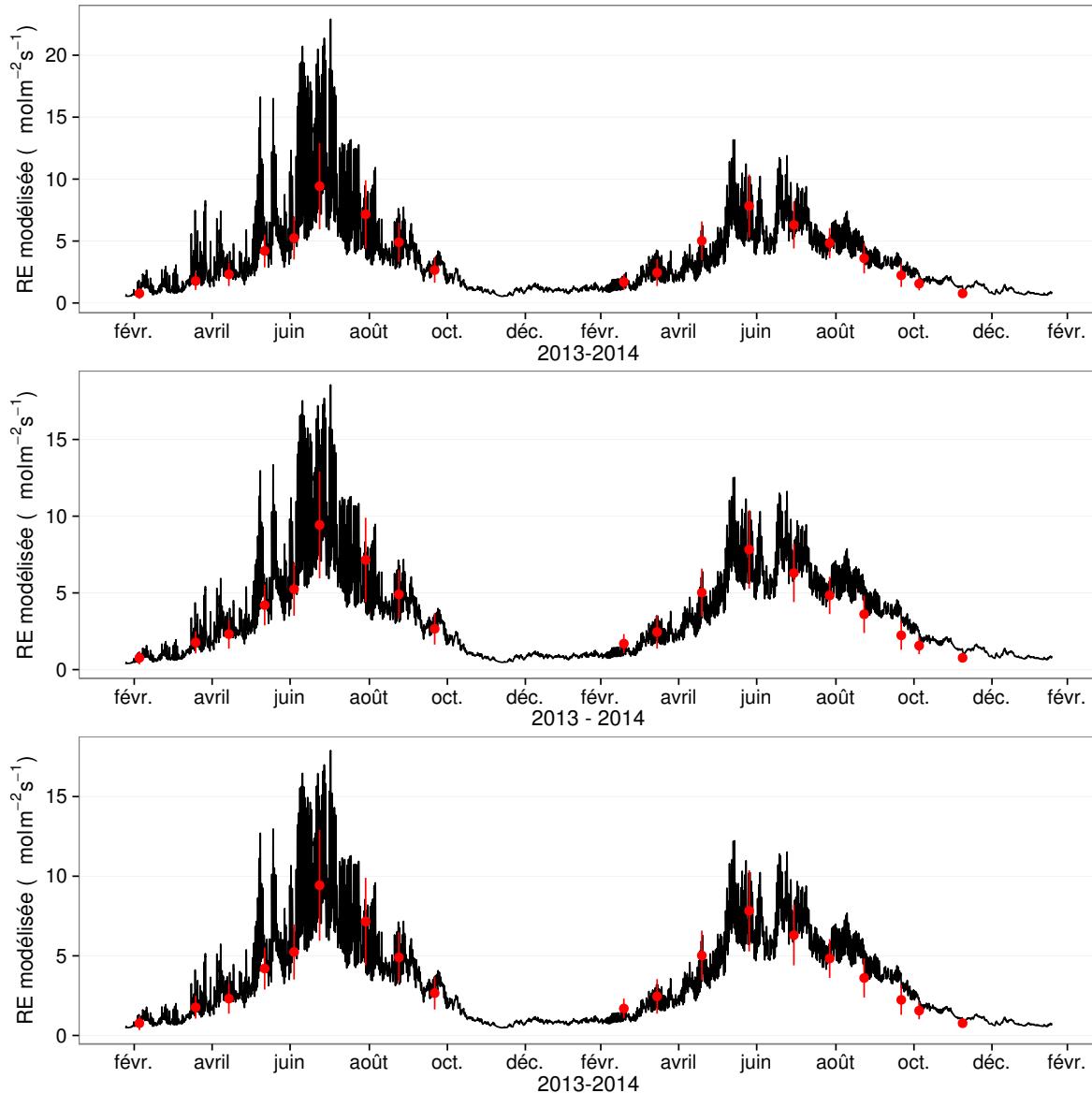


FIGURE 3.17 – Flux de  $\text{CO}_2$  interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3

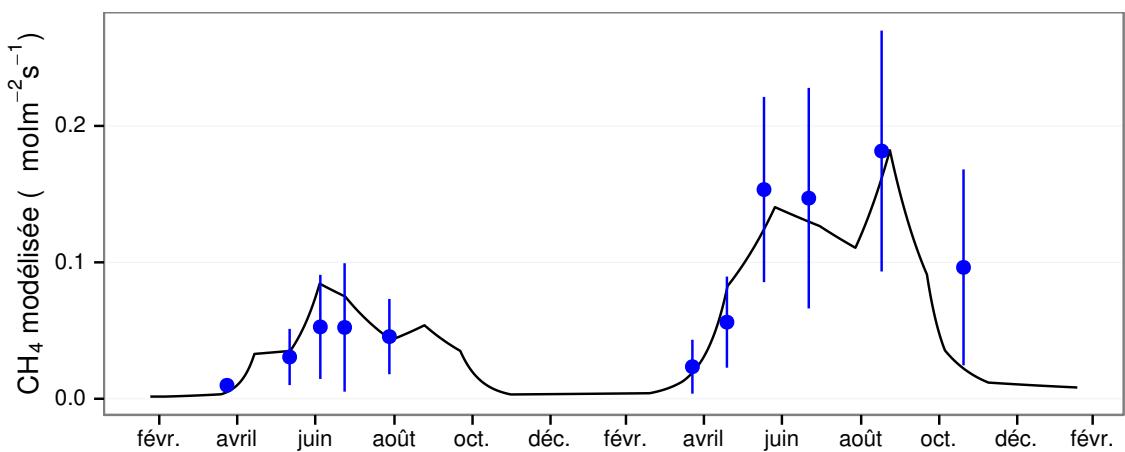


FIGURE 3.18 – Flux de  $\text{CO}_2$  interpolé à partir de RE-1, RE-2 et RE-3

Tableau 3.2 – Bilan des flux en gCm<sup>2</sup>an<sup>-1</sup>

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

Tableau 3.3 – Bilan des flux en gCm<sup>2</sup>an<sup>-1</sup>

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

1005 végétation (modèles RE-2 et RE-3) conduit à une respiration plus forte en 2014 qu'en  
 1006 2013 à l'inverse de RE-1. La différence entre l'estimation de la RE en 2013 et en 2014  
 1007 diminue avec l'intégration de la végétation. Elle passe de 102 pour RE-1 à 78 puis  
 1008 41 pour RE-2 et RE-3. Malgré ces différences, on observe une grande proximité dans  
 1009 les valeurs des flux interpolés sur les 2 années, quel que soit le modèle, avec un écart  
 1010 maximum de 25 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>.

1011 Les flux de CH<sub>4</sub> entachés d'une erreur importante, sont cependant beaucoup plus  
 1012 faible en valeur absolue que ceux de la PPB ou de la RE. On y observe malgré tout un  
 1013 flux qui fait plus que doubler en 2014 par rapport à 2013.

1014 Les bilans issus des différentes combinaisons (à l'exception de RE-3, très proche de  
 1015 RE-2) de modèles sont présentés dans le tableau 3.3 et varient de -233 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>  
 1016 à +12 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> stocké dans la tourbière. L'intégration de la végétation dans la  
 1017 modélisation de PPB fait baisser les bilans de carbone dans le négatif au-delà de  
 1018 -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.  
 1019 Cette différence sur les bilans est bien moindre, environ 26 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> entre les mo-  
 1020 dèles de RE qui intègrent et ceux qui n'intègrent pas la végétation.

### 3.3. Résultats

---

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

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

#### 1021 Évaluation du bilan

1022 L'analyse de sensibilité, consistant à faire varier chaque paramètre des modèles  
 1023 de  $\pm 10\%$ , les combinaisons de modèles PPB-1, PPB-2, RE-1 et RE-3 ont été testé  
 1024 (Tableau 3.4). Le modèle RE-2, très proche du modèle RE-3 n'a pas été testé. **Attente**  
 1025 **du COD, les valeurs du tableau sont fausse pour le moment**

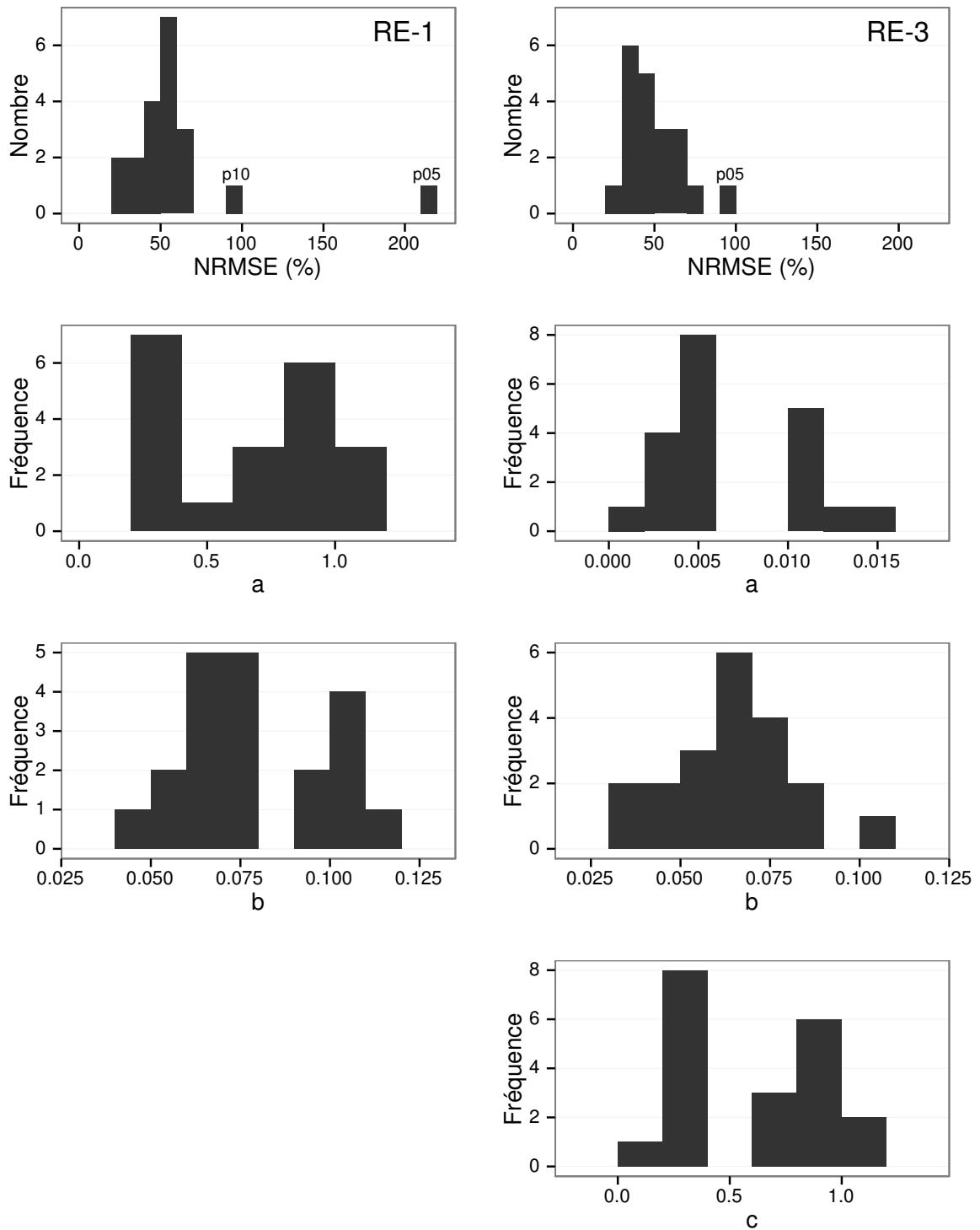


FIGURE 3.19 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres des modèles RE-1 et RE-3

### 3.3. Résultats

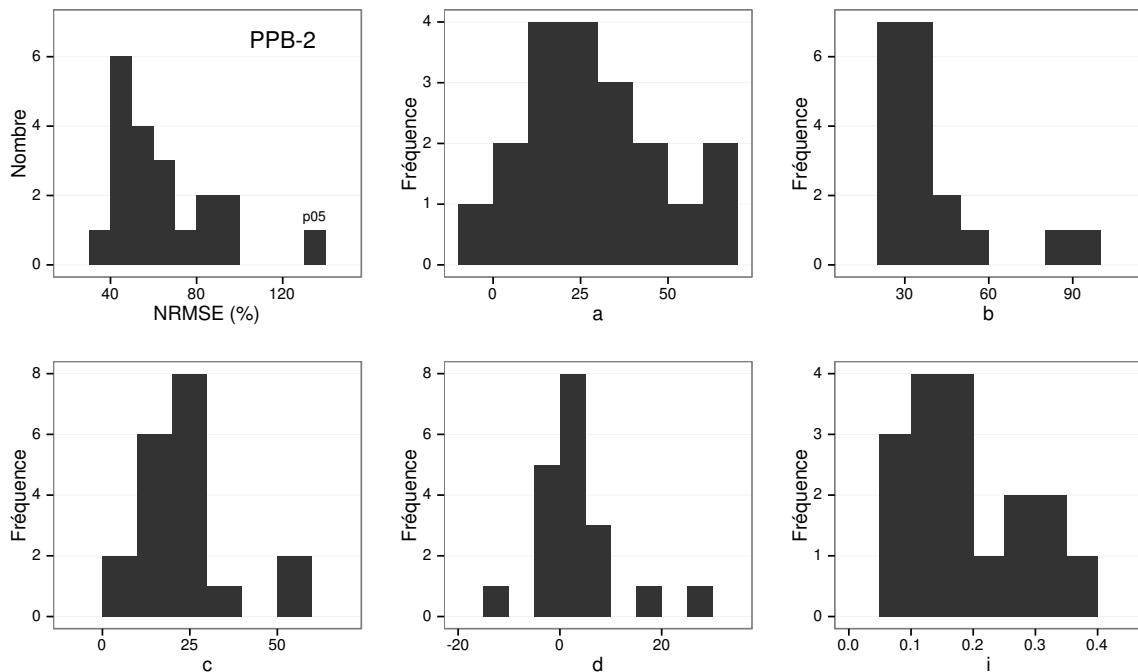


FIGURE 3.20 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2

#### 3.3.4 Variabilité spatiale du bilan

##### Représentativité locale

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

Les bilans de CO<sub>2</sub> calculés par groupe de végétations sont présentés dans le ta-

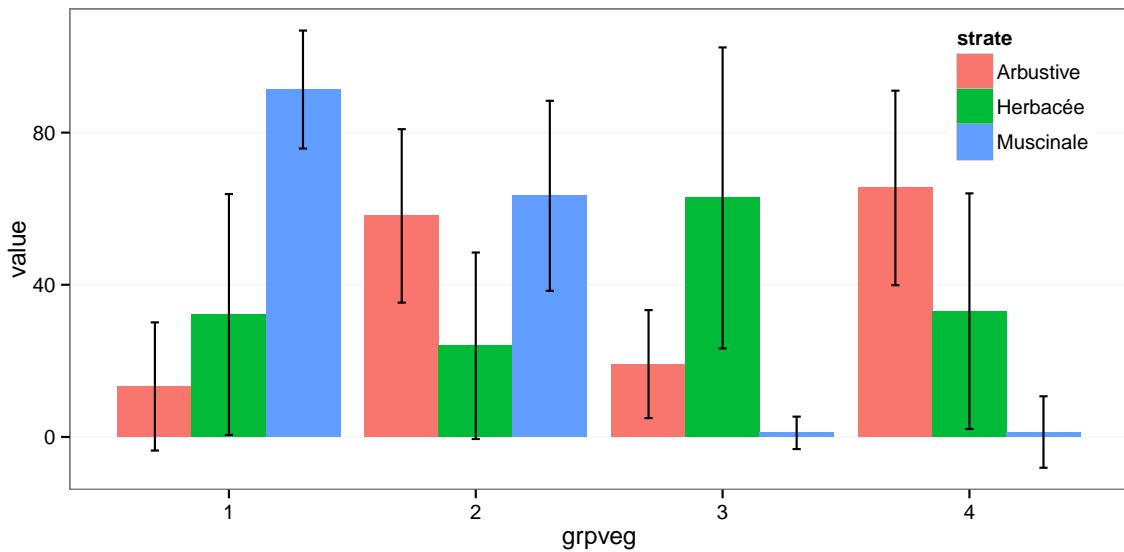


FIGURE 3.21 – Distribution de l'erreur standard par placette et des paramètres du modèle PPB-2

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

groupe	PPB-2	RE-3	ENE
1	714	1023	-308
2	1045	1385	-340
3	1323	1057	266
4	1002	1262	-260

bleau 3.5. On constate que du point de vue de l'ENE les groupes 1 et 2 sont relativement proche, et que le groupe 3 est du même ordre de grandeur bien qu'avec une ENE un peu moins négative. Le groupe 3 est le seul groupe présentant une ENE positive, du même ordre de grandeur que les précédentes en valeur absolue. Dans le détail, la RE est la plus forte, supérieure à 1200 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>, dans les groupes 2 et 4. Elle est plus faible dans les groupes 1 et 3 (environ 1000 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>). Pour la PPB, la valeur la plus faible est dans le groupe 1 et la plus forte dans le groupe 3 avec plus de 1300 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>, soit une différence de plus de 600 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>. Les groupes 2 et 4 sont relativement proches avec des valeurs intermédiaires avoisinant 1000 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>.

### **3.4. Discussion**

---

**1049 Modélisation par placette**

**1050 Corrélation avec facteurs contrôlant**

## **1051 3.4 Discussion**

### **1052 3.4.1 Estimations des flux**

**1053 PPB**

1054 L'estimation des flux de PPB, est comprise entre 957 et 1322 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> selon  
1055 l'année et le modèle utilisé. Ces valeurs sont très élevées comparées à des tourbières  
1056 boréales comme celles étudiées par ([Trudeau et al., 2014](#)) ou encore ([Peichl et al., 2014](#))  
1057 dont les valeurs de PPB sont respectivement comprise entre 123 et 131 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>  
1058 et entre 203 et 503 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>. Une première hypothèse permettant d'expliquer une  
1059 telle différence, est la différence entre les températures moyennes sur les sites. -4,3 °C  
1060 et 1,2 °C respectivement pour [Trudeau et al. \(2014\)](#) et [Peichl et al. \(2014\)](#). Ces tempé-  
1061 ratures sont bien plus faible pour les sites des études pré-citées que sur la tourbière de  
1062 La Guette. Une seconde hypothèse, qui n'exclue pas la première, serait la composition  
1063 végétale de ces sites. La tourbière de La Guette envahie par une végétation vasculaire,  
1064 notamment herbacée, est peut-être plus proche d'une prairie tourbeuse. En effet lorsque  
1065 la compare à ce type d'écosystèmes les valeurs observées sont plutôt proche. ([Jacobs](#)  
1066 *et al.*, 2007) estime des valeurs de PPB comprises entre 400 et 2000 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> avec  
1067 une moyenne de 1300 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> dans des prairies tourbeuses hollandaises. Sur des  
1068 écosystèmes similaires, au Danemark, ([Görres et al., 2014](#)) trouve des valeurs de PPB  
1069 plus importantes encore, entre 1555 et 2590 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>. Il apparaît cohérent que la  
1070 tourbière de La Guette, par sa position géographique, et donc le climat qu'elle subit,  
1071 mais également par sa problématique d'envahissement important par une végétation  
1072 vasculaire notamment herbacée, s'approche en termes de flux de site tourbeux utilisés  
1073 comme prairie.

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

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

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

## 1097 RE

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

### 3.4. Discussion

1102 2014; Trudeau *et al.*, 2014) (pour reprendre les études citées précédemment) qui s'éta-  
1103 blissent 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>. Elles  
1104 sont en revanche plus faible que celle mesurées par (Jacobs *et al.*, 2007), entre 500 et  
1105 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>.

1106 À l'inverse de la PPB, l'intégration de la végétation pour modéliser la RE n'amé-  
1107 liore que peu l'estimation de la RE lors de la phase de calibration : la différence entre  
1108 les valeurs d'erreur standard est de 5 %. En revanche lors de la phase d'évaluation,  
1109 l'utilisation du recouvrement des herbacées semble améliorer l'estimation de façon plus  
1110 importante avec une différence de 11 % entre les valeurs d'erreur standard. Contraî-  
1111 rement à la PPB la différence apportée par l'intégration de la végétation (RE-2 ou  
1112 RE-3) est du même ordre de grandeur en 2013 et en 2014. Sur les 2 années, l'effet  
1113 de l'intégration de la végétation est limité avec une différence de 25 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> au  
1114 maximum (entre ER-1 et ER-3), soit moins de 2 % du flux. Encore une fois l'intérêt  
1115 de l'évaluation est mis en avant puisqu'il permet de distinguer des modèles très proche  
1116 lors de la calibration.

1117 Les incertitudes sur l'estimation des paramètres RE sont beaucoup moins impor-  
1118 tante que celle de la PPB. L'estimation des paramètres des modèles, à l'exception du  
1119 paramètre c du modèles RE-2, ont une p-value inférieure à 0.05. L'erreur calculée lors  
1120 de l'évaluation de ces modèles, si elle augmente par rapport à la calibration, reste faible  
1121 particulièrement pour le modèle RE-3 où elle vaut moins de 25 %. La RE semble donc  
1122 relativement contrainte, avec une estimation des paramètres fiable et une différence  
1123 entre les estimations issues des modèles relativement limitée.

### **1124 CH<sub>4</sub>**

1125 Les flux de CH<sub>4</sub> sont faibles comparés aux flux de CO<sub>2</sub>. Les valeurs mesurées sont  
1126 plus forte que celles mesurés entre 0 et 0,03 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> par Bortoluzzi *et al.* (2006).  
1127 Pour 2013 les valeurs mesurées sont proches de celle mesurée par Long *et al.* (2010).  
1128 L'absence d'étiage en 2014 explique peut-être le doublement des flux... (**Réf needed**)

1129 La faible relation observée entre le niveau de la nappe et les flux de méthane va dans

1130 le même sens que les observations faites par [Trudeau et al. \(2012\)](#) et (à développer, de  
1131 ref ds trudeau2012)

1132 **COD**

1133 **3.4.2 Estimations des bilans**

1134 D'une manière générale, les bilans sont principalement contraint par les flux de CO<sub>2</sub>,  
1135 le CH<sub>4</sub> ne jouant qu'un rôle marginal en termes de quantité de carbone. Ces observations  
1136 sont cohérentes avec d'autres études comme [Bortoluzzi et al. \(2006\)](#); [Worrall et al.](#)  
1137 ([2009](#)). La forte variabilité entre les différents bilans est à attribuer en grande majorité  
1138 à l'erreur sur l'estimation du flux de PPB.

1139 Selon le bilan considéré, la tourbière de La Guette stocke légèrement du C pour  
1140 une dizaine de grammes par mètre carré, ou relâche du carbone dans l'atmosphère soit  
1141 un légèrement, soit de façon important pour plus de 200 gC m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>. La tourbière de  
1142 La Guette ayant subie un drainage et un envahissement important d'une végétation  
1143 vasculaire, ces derniers chiffres ne sont pas incohérents.

1144 **3.4.3 Sensibilité et limitations du bilan**

1145 Les incertitudes les plus fortes du bilan sont sur les flux de CH<sub>4</sub> avec une erreur  
1146 standard de 32 % lors de la calibration et de 68 % lors de la validation. Cette différence  
1147 importante montre que l'estimation des flux de CH<sub>4</sub> à l'aide de l'indice de végétation  
1148 à permis l'estimation de sa contribution au bilan de carbone de l'écosystème, mais que  
1149 sont utilisation dans d'autre conditions est fortement limité. L'importance faible du  
1150 CH<sub>4</sub> dans le bilan de carbone de la tourbière rend ces erreurs moins critiques que celles  
1151 faite lors de l'estimation de la PPB. Les incertitudes importantes sur la PPB, sont  
1152 mise en évidence par les variations fortes des flux interpolés selon l'équation utilisée.  
1153 Elles sont la source des variations observées en termes de bilan. L'ajout d'un indice de  
1154 végétation diminue d'incertitude des paramètres du modèle, mais cet apport semble  
1155 spécifique à l'étude, n'étant pas reflété par l'évaluation. À l'inverse la RE semble rela-

### **3.4. Discussion**

---

1156 tivement bien contrainte, sur les 2 années la différence entre les différentes équations  
1157 utilisées ne dépassent pas  $25 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$ .

#### **1158 sensibilité du bilan au variation des paramètres**

1159 **limitations** Outre ces aspects ce bilan de carbone est aussi limité par sa repré-  
1160 sentativité. Ainsi la strate arborée fortement présente dans certaines zones n'est pas  
1161 directement prise en compte. De la même manière une partie restreinte de la tourbière  
1162 mais néanmoins présente est constitué de touradons dont l'effet n'a pas été pris en  
1163 compte.**(Réf needed)(biblio effet microtype)**.

- 1164 — pas de cartographie (pas grave si p7 maj bien représentée par mdl ecos)  
1165 — extrapolation sur d'autres site difficile (cf validation)

#### **1166 3.4.4 Représentativité locale du modèle**

1167 Distribution des paramètres

1168 Pourquoi certaines placette mieux que d'autres

1169 Concernant la respiration la représentativité locale des modèles calibrés à l'échelle  
1170 de l'écosystème semble plus homogène pour le modèle RE-3 que pour le modèle RE-1.

1171 Une telle comparaison entre PPB-1 et PPB-2 n'a pas été possible car vu le faible  
1172 nombre de données et la qualité relative des modèles PPB par rapport aux modèles  
1173 RE, peu de modèles sont parvenus à converger pour PPB-1 (11 sur 20 placettes) et  
1174 pour PPB-2 (17 sur 20 placettes).

#### **1175 3.4.5 Variation du bilan avec la végétation**

1176 Le calcul des bilans avec les groupes de végétation permet de mettre en évidence  
1177 des comportements différents des flux selon la végétation majoritaire. Ainsi le groupe 3  
1178 dans lequel la strate herbacée est la plus importante est celui où la PPB est la plus forte.  
1179 Ce point semble en cohérence avec la croissance annuelle importante des herbacées. À  
1180 l'inverse le groupe 1 dans lequel la strate muscinale est la plus importante est également  
1181 le groupe pour lequel la PPB est la plus faible. **(Réf needed)**

1182 Pour la RE, ce sont les groupes 3 et 4 qui ont les flux estimés les plus importants  
1183 avec une différence d'environ  $200 \text{ gC m}^{-2} \text{ an}^{-1}$  avec les deux autres groupes. Malgré  
1184 leurs différences, le groupe 2 possède une strate muscinale importante alors qu'elle est  
1185 absente dans le groupe 3, ils ont en commun d'avoir une strate arbustive importante.

1186 **3.4.6 perspectives**

1187 cartographie ?



<sub>1188</sub> 4 Effets de l'hydrologie sur les flux de GES

<sub>1189</sub>

<sub>1190</sub>	<b>4.1 Introduction</b>	<sub>76</sub>
<sub>1191</sub>		
<sub>1192</sub>	<b>4.2 Procédure expérimentale</b>	<sub>77</sub>
<sub>1193</sub>	4.2.1 Expérimentation A	<sub>78</sub>
<sub>1194</sub>	4.2.2 Expérimentation B	<sub>78</sub>
<sub>1195</sub>	4.2.3 traitement	<sub>79</sub>
<sub>1196</sub>	<b>4.3 Résultats</b>	<sub>80</sub>
<sub>1197</sub>	4.3.1 Expérimentation A	<sub>80</sub>
<sub>1198</sub>	4.3.2 Expérimentation B	<sub>83</sub>
<sub>1199</sub>	4.3.3 tendances générales	<sub>86</sub>
<sub>1200</sub>	<b>4.4 Discussion</b>	<sub>86</sub>
<sub>1201</sub>	4.4.1 Comparaison aux mesures <i>in-situ</i>	<sub>86</sub>
<sub>1202</sub>	4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de gaz	<sub>88</sub>
<sub>1203</sub>	4.4.3 Effet cycles multiples	<sub>89</sub>
<sub>1205</sub>		

## 1206 4.1 Introduction

1207 Au cours des deux années qu'ont duré les suivis des émissions de flux de CO<sub>2</sub> et  
1208 de CH<sub>4</sub> sur la tourbière de La Guette, le niveau de la nappe n'a que très faiblement  
1209 varié comparé aux années précédentes bien plus sèches. En conséquence de cette faible  
1210 variation peu de variations des flux ont pu y être relié. Malgré tout il est connu que  
1211 l'hydrologie est un facteur contrôlant important des flux.

1212 Ainsi de nombreuses études on reliées les émissions de CO<sub>2</sub> au niveau de la nappe  
1213 avec, cependant, des résultats et des conclusions variables. La majorité des études  
1214 montrent qu'une tourbière dont le niveau de la nappe est abaissé, soit par un drainage,  
1215 soit par une sécheresse, aura tendance à avoir un ENE plus faible : Ainsi [Strack et](#)  
1216 [Zuback \(2013\)](#) expliquent des valeurs d'ENE plus faibles qu'escompté, par des mesures  
1217 faites pendant une période relativement sèche. Une observation similaire est faite par  
1218 [Aurela et al. \(2007\)](#) qui mesure un ENE plus faible lors d'une année sèche, sur une  
1219 tourbière à Carex du sud de la Finlande. Ils attribuent la variation de l'ENE à une  
1220 augmentation de la RE et à une baisse de la PPB, dans des conditions plus chaudes  
1221 et plus sèches. [Peichl et al. \(2014\)](#) observent également une baisse de l'ENE lors d'une  
1222 année où le niveau de la nappe baisse de façon importante, au delà de -30 cm. Ils  
1223 expliquent cette baisse par une baisse de la PPB. Cette observation va dans le même  
1224 sens que [Lund et al. \(2012\)](#) qui, lors de l'étude d'une tourbière située au sud de la suède,  
1225 observent en 2008 une baisse de l'ENE. Les mesures de RE faites cette année là étant  
1226 similaires à celles effectuées les autres années, ils lient cette baisse à une diminution  
1227 de la PPB. En 2006, sur la même tourbière, [Lund et al. \(2012\)](#) observent une autre  
1228 baisse de l'ENE. Mais cette fois, les mesures de PPB à leur tour similaires à celle  
1229 des autres années n'expliquent pas cette baisse. À l'inverse de 2008, cette baisse est  
1230 expliqué par une augmentation de la RE Ce paradoxe apparent est interprété grâce  
1231 au type de sécheresse : courte et intense pendant la saison de végétation de 2006 et  
1232 d'intensité plus faible mais d'une durée plus longue en 2008. Enfin et à l'inverse des

1233 résultats précédemment cités, [Ballantyne et al. \(2014\)](#) dans une étude des effets à long  
 1234 terme d'une baisse du niveau de la nappe, n'observe que peu d'effet sur l'ENE tandis  
 1235 que les flux de RE et de PPB augmentent tous deux. Toutes ces études montrent que  
 1236 si le niveau de la nappe est incontestablement reconnu comme un facteur de contrôle  
 1237 des flux de CO<sub>2</sub>, il est difficile d'en dégager, avec certitude, un comportement valable  
 1238 de façon générale.

1239 Concernant le méthane, une baisse du niveau de la nappe est généralement liée à  
 1240 une baisse des émissions de CH<sub>4</sub>, et inversement ([Strack et al., 2006; Pelletier et al.,](#)  
 1241 [2007; Turetsky et al., 2008](#)). Cependant d'autres études, principalement dans des sites  
 1242 où le niveau de la nappe est proche de la surface du sol, montrent une absence de  
 1243 relation entre le niveau de la nappe et les émissions de méthane, voire une relation  
 1244 inverse, avec des flux plus faibles liés à des niveaux de nappe plus élevés ([Kettunen](#)  
 1245 [et al., 1996; Bellisario et al., 1999; Treat et al., 2007](#)). Là encore selon les conditions  
 1246 environnementales, la relation entre les flux de CH<sub>4</sub> et le niveau de la nappe n'est pas  
 1247 aisément généralisable.

1248 L'objectif de ce chapitre est donc d'explorer plus en avant l'effet du niveau de la  
 1249 nappe sur les émissions de GES, effet peu ou pas visible *in-situ*. Plus précisément il  
 1250 s'agit de déterminer l'effet de cycles de dessication/ré-humectation sur les émissions de  
 1251 CO<sub>2</sub> et de CH<sub>4</sub>.

## 1252 4.2 Procédure expérimentale

1253 L'étude des cycles de dessication/ré-humectation s'est effectué sur des mésocosmes,  
 1254 prélevés sur la tourbière de La Guette. L'expérimentation a été testé durant l'été 2013  
 1255 avec un seul cycle relativement long, on s'y référera par la suite comme l'expérimenta-  
 1256 tion A. Cette expérimentation a été renouvelée l'été 2014 afin d'augmenter à trois le  
 1257 nombre de cycles, ceux-ci étant plus court. On appellera cette seconde expérimentation,  
 1258 l'expérimentation B (Tableau 4.1).

### **1259 4.2.1 Expérimentation A**

1260 Le 12 avril 2013, ont été prélevés, sur la tourbière de La Guette 6 mésocosmes. Le  
1261 prélèvement de mésocosmes s'effectue à l'aide de cylindres de PVC qui, dans un premier  
1262 temps, posé sur le sol, permettent de faire un pré-découpage au couteau, puis dans un  
1263 second temps sont insérés, délicatement, dans la tourbe. Les mésocosmes sont finale-  
1264 ment dégagés en creusant de chaque côté (Figure 4.1). Les mésocosmes sont transportés  
1265 au laboratoire où ils sont enterrés en extérieur et saturé en eau (eau prélevée dans la  
1266 tourbière), afin que leur conditions hydrologique de départ soient les plus proche pos-  
1267 sible (Figure 4.2). Trois mésocosmes sont choisi pour servir de contrôle, et trois vont  
1268 subir un cycle de dessication/ré-humectation. À partir du 31 mars 2013 les précipita-  
1269 tions ont été interceptées à l'aide d'abri bâchés installable rapidement en cas de pluie  
1270 et la nuit. Ces interceptions ont été faites jusqu'au 17 juillet dans les 3 mésocosmes  
1271 traités pour simuler une sécheresse. À cette date de l'eau est ajouté aux mésocosmes,  
1272 que ce soit les contrôles ou les traitements, pour simuler de fortes précipitations.

### **1273 4.2.2 Expérimentation B**

1274 Le 17 avril 2014, 6 nouveaux mésocosmes ont été prélevés sur la tourbières de La  
1275 Guette et installé près du laboratoire, en suivant le même protocole que pour l'expéri-  
1276 mentation A. Une station météo a été installée à côté des mésocosmes afin de mesurer  
1277 la température de l'air, l'humidité relative, l'irradiation solaire, la vitesse et la direction  
1278 du vent et les précipitations toutes les 15 minutes. Cette station permettait également  
1279 l'enregistrement des températures mesurées par des sondes (T107) installées à -5, -10,  
1280 et -20 cm. Les conditions météorologiques moins ensoleillée qu'en 2013 et l'objectif de  
1281 suivre plusieurs cycles de dessication/réhumectation ont nécessité la mise en place  
1282 d'un abaissement manuel du niveau de la nappe. Pendant les phases d'assèchement les  
1283 niveaux de nappes des placettes traitées étaient donc abaissés en moyenne de 2,5 cm  
1284 par jour. Le premier cycle de dessication/réhumectation dura du 30 juin au 6 juillet  
1285 pour la phase de dessication est du 7 au 16 juillet pour la phase de réhumectation.



FIGURE 4.1 – Prélèvement des mésocosmes

Tableau 4.1 – Récapitulatif des mesures pour les deux expérimentations

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

<sup>1286</sup> Le deuxième cycle dura du 17 au 28 juillet et du 29 juillet au 3 aout, Enfin le dernier  
<sup>1287</sup> cycle fut mesuré du 4 au 11 aout pour la dessication et du 12 au 14 aout pour la  
<sup>1288</sup> réhumectation.

### <sup>1289</sup> 4.2.3 traitement

<sup>1290</sup> Les flux sont moyennés par jour de mesure.

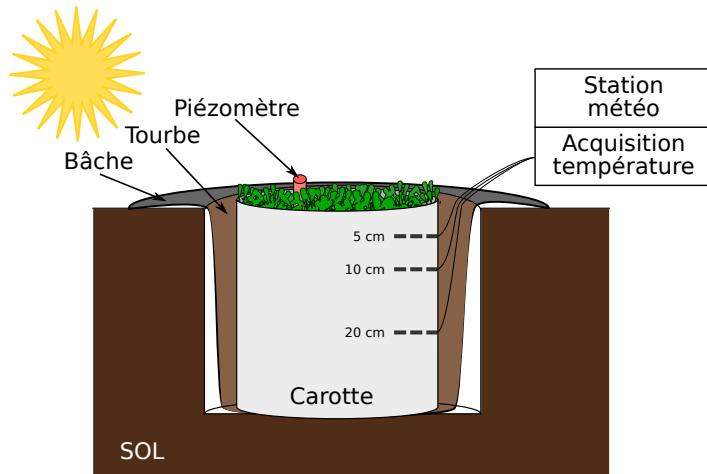


FIGURE 4.2 – Schéma d'un mésocosme

## <sub>1291</sub> 4.3 Résultats

### <sub>1292</sub> 4.3.1 Expérimentation A

<sub>1293</sub> Pendant la phase de dessication de l'expérimentation A, on observe une baisse du  
<sub>1294</sub> niveau de la nappe pour les placettes contrôles comme pour les placettes traitements  
<sub>1295</sub> (Figure 4.3–A). Malgré tout leur comportement est différent : les placettes contrôles ont  
<sub>1296</sub> un niveau de nappe relativement élevé jusqu'au 24 juin puis ce niveau baisse fortement  
<sub>1297</sub> alors que les placettes du groupe traité ont un niveau de nappe qui diminue de façon  
<sub>1298</sub> plus continue sur l'ensemble de la phase. La remontée du niveau de la nappe s'effectue  
<sub>1299</sub> de façon similaire pour les deux groupes. Enfin après la phase de ré-humectation, le  
<sub>1300</sub> niveau de la nappe baisse à nouveau, plus rapidement pour le groupe traitement que  
<sub>1301</sub> pour le groupe contrôle.

<sub>1302</sub> Les émissions de  $\text{CH}_4$ , s'étendant de 0 et  $0,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , sont relativement si-  
<sub>1303</sub> milaires entre les deux groupes jusqu'au 24 juin 2013, date à partir de laquelle ils  
<sub>1304</sub> commencent à diverger (Figure 4.3–B). À cette date les émissions du groupe contrôle  
<sub>1305</sub> augmentent rapidement pour atteindre  $0,55 \pm 0,31 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  tandis que celles du  
<sub>1306</sub> groupe traité restent stable. Finalement mi-juillet, à la fin de la phase de dessicca-  
<sub>1307</sub> tion les deux groupes retrouvent des niveaux d'émission similaires compris entre 0,1 et

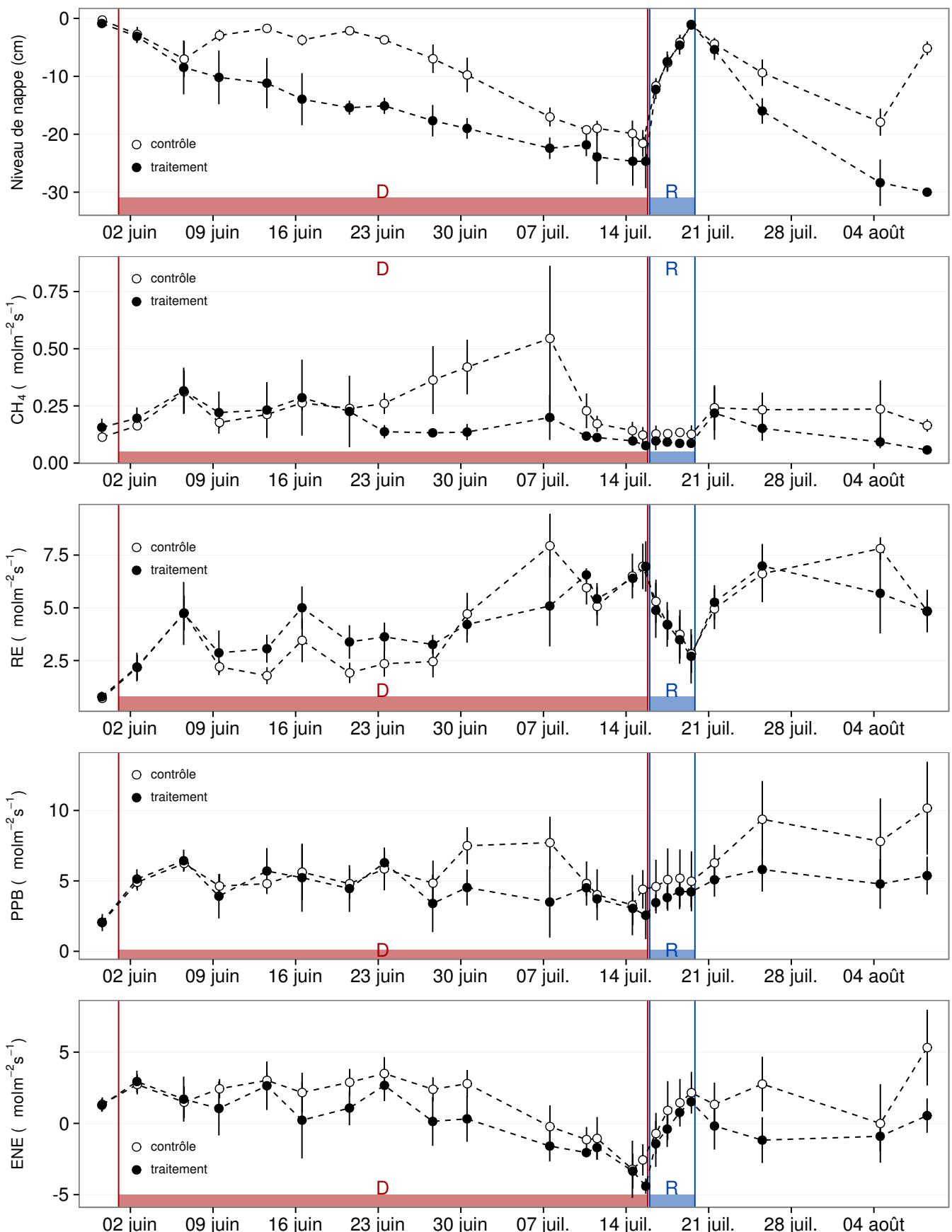


FIGURE 4.3 – Expérimentation A : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux,  $\text{CH}_4$ , RE, PPB, ENE en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent à la phase de dessiccation (D) en rouge et à la phase de réhumectation (R) en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

### 4.3. Résultats

---

1308 0,2  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Ces niveaux restent constant pendant toute la phase de réhumecta-  
1309 tion, avant d'augmenter légèrement par la suite ; ils ne dépassent pas 0,25  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$   
1310 mais franchissent la barre des 0,2  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

1311 Pendant la phase de dessication, les valeurs de la RE tendent à augmenter quel  
1312 que soit le groupe de placettes considéré (Figure 4.3–C). Ces valeurs inférieures à  
1313 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  
1314 mi-juillet, avant la réhumectation. Dans le détail cependant les deux groupes ne se  
1315 comportent pas de la même façon : la RE du groupe traité augmente régulièrement  
1316 pendant l'ensemble de cette phase, tandis que les valeurs du groupe de contrôle res-  
1317 tent, dans un premier temps, stable jusque fin juin. La RE de ce groupe vaut alors  
1318  $2,45 \pm 0,75 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  contre  $3,26 \pm 0,46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  pour le groupe traité. Cet  
1319 écart, pouvant varier dans le temps, étant installé depuis le 9 juin. À partir de dé-  
1320 but juillet, les valeurs de RE du groupe de contrôle augmentent fortement dépas-  
1321 sant les valeurs du groupe traité. La RE de ce groupe atteint alors un maximum à  
1322  $7,93 \pm 1,52 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  le 8 juillet avant de retrouver des valeurs proche de celles ob-  
1323 servées dans le groupe traité. Cette augmentation brusque correspond temporellement  
1324 à celle observé, pour le même groupe, dans les flux de CH<sub>4</sub>. Lors de la phase de réhu-  
1325 mectation, les flux de RE diminuent de façon très similaire pour les deux groupes ou  
1326 ils atteignent un minimum proche de 2,75  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Ce minimum reste cependant  
1327 plus élevé que les valeurs mesurées initialement. Après la phase de réhumectation, les  
1328 flux des deux groupe restent relativement proches pendant le reste des mesures, où ils  
1329 remontent à mesure que le niveau de la nappe diminue à nouveau.

1330 Pour les deux groupes, les flux de PPB restent relativement stables pendant la  
1331 phase de dessiccation (Figure 4.3–D). Jusqu'au 24 juin, les flux des deux groupes sont  
1332 très proches et sont compris entre 5 et 6  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  ( $5,29 \pm 0,76 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  de  
1333 moyenne pour les deux groupes). Après cette date, et comme pour le CH<sub>4</sub> et la RE,  
1334 les valeurs de la PPB du groupe de contrôle augmentent et s'écartent de celles me-  
1335 surées dans le groupe traité, en attendant de les rejoindre avant la fin de cette phase  
1336 de dessiccation. Par ailleurs, à la fin de cette phase, les flux diminuent légèrement at-

teignant un minimum proche de  $3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Pendant la phase de réhumectation, la PPB augmente très légèrement pour les deux groupes, le groupe de contrôle ayant des valeurs systématiquement supérieures à celles du groupe traité. Après la réhumectation, la PPB augmente un peu pour le groupe traité, atteignant un maximum de  $5,83 \pm 1,61 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , et plus fortement pour le groupe de contrôle où le maximum atteint, de  $10,17 \pm 3,30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , est quasiment le double du précédent.

L'ENE mesuré sur les deux groupes est systématiquement supérieure pour le groupe contrôle, avec une évolution parallèle des flux pour les deux groupes (Figure 4.3–E). Pendant la phase de dessiccation l'ENE reste relativement constante jusque fin juin avec une valeur moyenne pour les deux groupes de  $1,18 \pm 0,58 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . L'écart entre le groupe contrôle et le groupe traitement tend à augmenter du 10 au 30 juin environ, avant que les valeurs du groupe de contrôle ne rejoignent celles du groupe traité. Au delà du 24 juin, l'ENE baisse fortement pour les deux groupes pour atteindre un minimum proche de  $-4,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Pendant la phase de réhumectation l'ENE monte rapidement pour atteindre  $1,52 \pm 0,36$  et  $2,15 \pm 1,47 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  pour le groupe de contrôle et de groupe traité respectivement. Après la réhumectation, l'ENE du groupe contrôle varie en suivant généralement les variations du niveau de nappe. Pour le groupe traité, l'ENE baisse par rapport au maximum atteint lors de la réhumectation puis se stabilise autour de 0.

Les variations du niveau de la nappe sont principalement liée à la RE (Figure 4.5–C) et, à travers elle, à l'ENE (Figure 4.5–G). L'effet des variations du niveau de la nappe sur la PPB est quasiment nul (Figure 4.5–E), même si la PPB semble diminuer aux plus fortes profondeurs. Pour le CH<sub>4</sub> il est également difficile de distinguer des tendances générales entre les flux et les niveaux de nappe (Figure 4.5–A).

### 4.3.2 Expérimentation B

Contrairement à l'expérimentation A, le niveau de nappe du groupe de contrôle de l'expérimentation B reste relativement constant pendant l'ensemble de la période de mesure. Le drainage artificiel du groupe traité permet d'abaisser le niveau de la nappe

### 4.3. Résultats

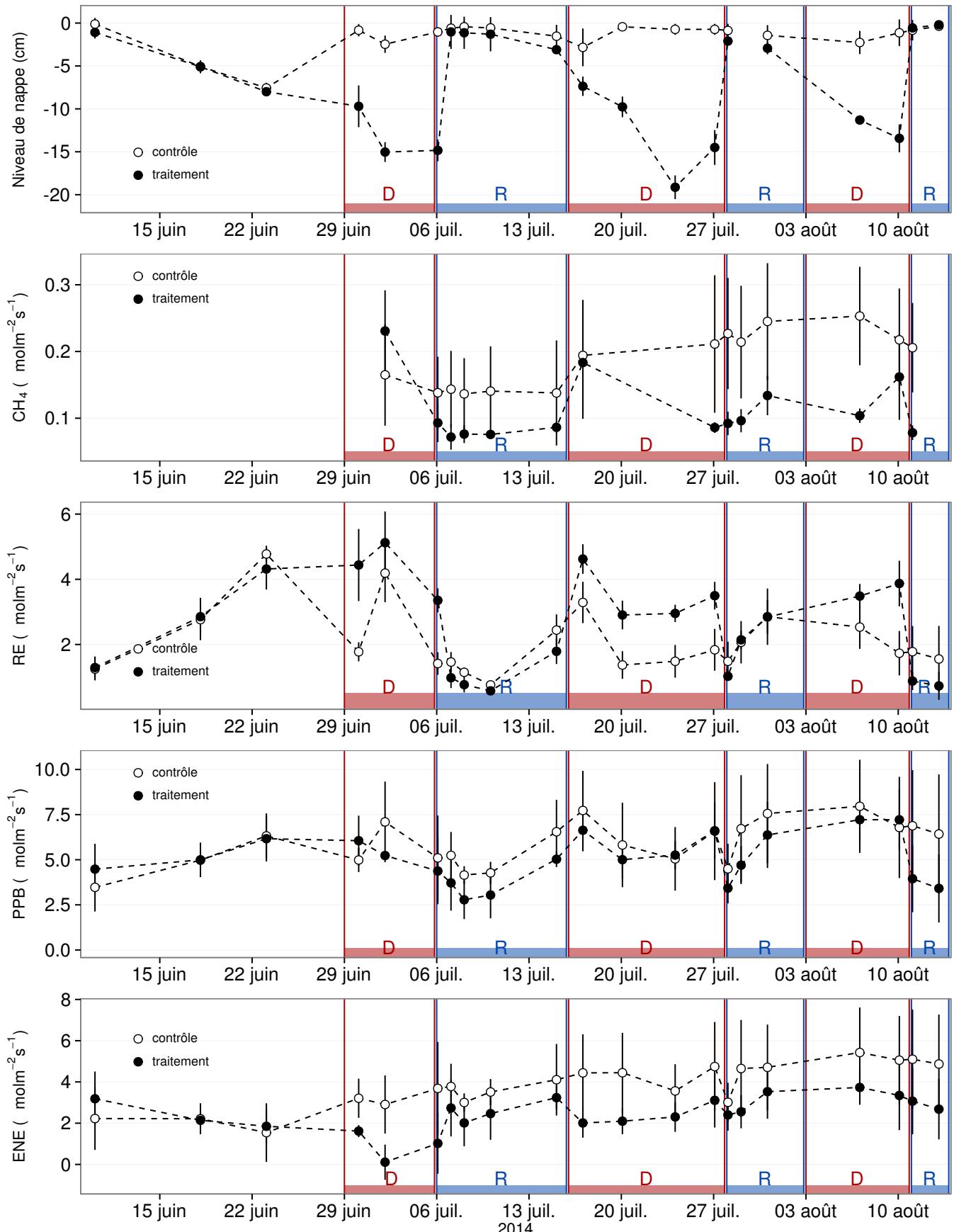


FIGURE 4.4 – Expérimentation B : Moyenne journalière du niveau de nappe en cm (A), et des flux,  $\text{CH}_4$ , RE, PPB, ENE en  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , B, C, D, E. Les cadres et bandes colorées correspondent aux phases de dessiccation (D) en rouge et aux phases de réhumectation (R) en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

1365 d'une quinzaine de centimètres en moyenne pour chaque cycle (Figure 4.4–A).

1366 Les flux de CH<sub>4</sub> moyen s'étendent de 0,07 à 0,34 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Les flux du groupe  
1367 de contrôle, à l'exception de la première mesure, sont supérieurs aux flux du groupe  
1368 traité, leurs moyennes respectives sur l'ensemble des mesures étant de 0,20 ± 0,06 et  
1369 0,11 ± 0,05 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> respectivement. Les émissions du groupe de contrôle tendent  
1370 à augmenter sur la période de mesure. Une tendance similaire, quoique moins mar-  
1371 quée, est également visible pour le groupe traité. Concernant les cycles de dessicca-  
1372 tion/réhumectation, il est difficile de dégager des comportements communs, même s'il  
1373 semble que l'assèchement conduit à une baisse des émissions (Figure 4.4–B) Cette re-  
1374 lation, mise en exergue pas un nombre de points très faible, n'apparaît cependant pas  
1375 sur l'ensemble des données (Figure 4.5–B) Un pic d'émission de CH<sub>4</sub> est également à  
1376 noter pour chaque cycle pendant la phase de dessiccation.

1377 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–C)).  
1378 Avant le démarrage des manipulations du niveau de la nappe, les valeurs des deux  
1379 groupes sont très proches et augmentent tandis que le niveau de nappe diminue. Pen-  
1380 dant les phases de dessication, les valeurs du groupe traité sont systématiquement supé-  
1381 rieures, de 1,5 à 1,8 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> en moyenne par phase, par rapport à celle du groupe  
1382 de contrôle. À l'inverse pendant les phases de réhumectation les flux entre les deux  
1383 groupes sont beaucoup plus proches avec une tendance de la RE du groupe de contrôle  
1384 à être au dessus de celle du groupe traité. La RE du groupe traité est systématiquement  
1385 plus faible pendant les phases de réhumectations que pendant les phases de dessicca-  
1386 tions. En moyenne la RE vaut respectivement 2,28 ± 1,00 et 3,86 ± 0,80 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>  
1387 pour les groupes de contrôle et traité pendant les phases de dessiccation et 1,70 ± 0,62  
1388 et 1,51 ± 0,98 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> pendant les phases de réhumectation.

1389 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>.

1390 Avant le début des traitements les flux des deux groupes sont similaires (Figure 4.4–D).  
1391 La première phase de dessiccation fait passer la PPB du groupe de contrôle au dessus  
1392 du groupe traité. Pour les deux groupes, la PPB est plus importante lors des phases  
1393 de dessiccation comparée aux phase de réhumectation, avec des moyennes respectives

## **4.4. Discussion**

---

<sub>1394</sub> de  $6,35 \pm 2,19$  contre  $5,80 \pm 2,20$  pour le groupe de contrôle et de  $5,95 \pm 1,46$  contre  
<sub>1395</sub>  $4,05 \pm 1,60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  pour le groupe traité.

<sub>1396</sub> Les valeurs d'ENE mesurées sont comprises entre  $0,11$  et  $5,42 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , elles  
<sub>1397</sub> ont tendance à augmenter au cours du temps. Passé la période pré-traitements pendant  
<sub>1398</sub> laquelle les flux de l'ENE sont similaires pour les deux groupes l'ENE du groupe de  
<sub>1399</sub> contrôle est systématiquement supérieure à celle du groupe de traitement (Figure 4.4–  
<sub>1400</sub> E). L'évolution des deux groupes reste cependant relativement conjointe pendant la  
<sub>1401</sub> période de mesure avec pour le groupe traité une diminution récurrente de l'ENE au  
<sub>1402</sub> début de chaque phase de dessiccation.

### **4.3.3 tendances générales**

<sub>1404</sub> Pour les deux expérimentations une relation nette est visible entre le niveau de la  
<sub>1405</sub> nappe et l'ENE qui diminue lorsque le niveau de nappe augmente (Figure 4.5–G,H).  
<sub>1406</sub> La relation inverse est visible, pour les deux expérimentations, entre la RE et le niveau  
<sub>1407</sub> de la nappe (Figure 4.5–C,D). La PPB par contre ne montre aucune tendance claire  
<sub>1408</sub> quelle que soit l'expérimentation. On peut malgré tout noter que les valeurs de PPB les  
<sub>1409</sub> plus faibles correspondent aux niveaux de nappe les plus élevés(Figure 4.5–E,F). Pour  
<sub>1410</sub> le méthane, que ce soit pour l'expérimentation A ou B, aucune tendance ne semble se  
<sub>1411</sub> dégager vis à vis du niveau de la nappe (Figure 4.5–A,B).

## **4.4 Discussion**

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

<sub>1414</sub> Les flux moyen de  $\text{CH}_4$  mesurés dans les mésocosmes des deux expérimentations  
<sub>1415</sub> font partie des valeurs hautes mesurées sur le terrain. Certaines campagnes dépassent  
<sub>1416</sub> nettement, en faisant plus que doubler, le maximum de  $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  mesuré en  
<sub>1417</sub> 2014 sur la tourbière de La Guette.

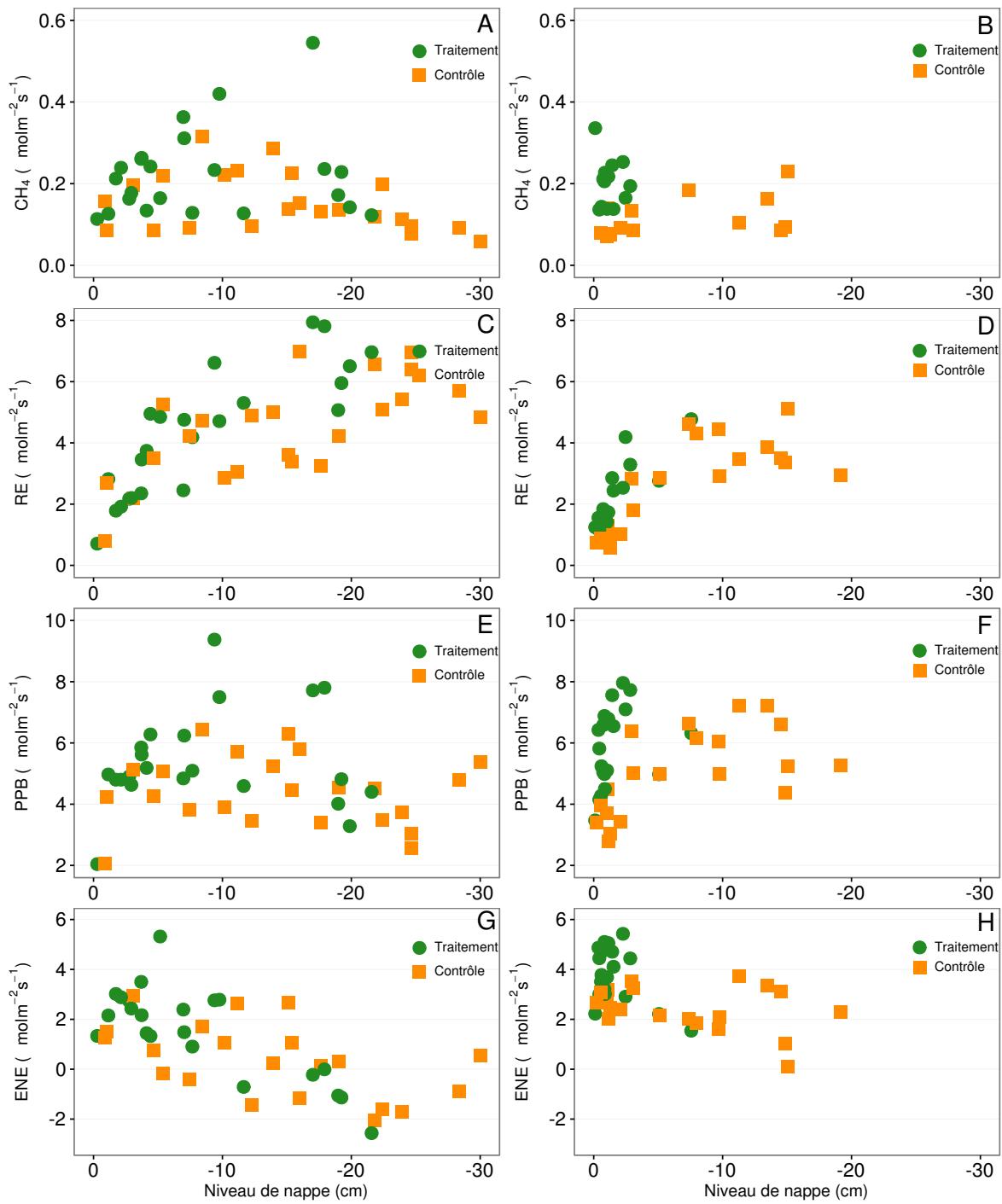


FIGURE 4.5 – Relations entre les flux de GES et le niveau de la nappe

#### 4.4. Discussion

---

1418 Pour le CO<sub>2</sub> les flux sont généralement dans la gamme des valeurs mesurée sur la  
1419 tourbière de La Guette. Pour l'expérimentation A, l'ENE moyen est plus faible que  
1420 celui mesuré sur le terrain la même année : 0,81 contre 2,85 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Pour l'expé-  
1421 rimentation B en revanche l'ENE moyen vaut 0,71 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> ce qui est relativement  
1422 proche de celui mesuré sur le terrain : 2,93 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Les flux de RE et de PPB  
1423 sont moins fort que les flux mesurés sur le terrain mais restent dans leur gamme de  
1424 valeurs. Ces comparaisons sont par ailleurs à relativiser puisque les mesures de flux  
1425 n'ont pas nécessairement lieu aux mêmes moment de la journée.

1426 Comme pour la RE, les flux de PPB sont du même ordre de grandeur que ceux me-  
1427 surés sur le terrain, mais légèrement plus faible : les maxima moyens mesurés dans les  
1428 mésocosmes sont d'environ 7,5 pour des valeurs de 13 µmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> mesuré directement  
1429 sur la tourbière.

##### 1430 4.4.2 Effet des variations du niveau de la nappe sur les flux de 1431 gaz

1432 Les résultats de ces deux expérimentations montrent clairement une augmentation  
1433 de la RE quand le niveau de la nappe diminue. Ceci est en accord avec les résultats  
1434 d'autres études que ce soit in-situ (Ballantyne *et al.*, 2014) ou en mésocosmes (Blodau  
1435 *et al.*, 2004; Dinsmore *et al.*, 2009). Dans ces deux dernières publications, la baisse  
1436 du niveau de la nappe diminue la PPB. Pas de variations claires de la PPB n'est vi-  
1437 sible dans les données présentées, même si une légère tendance semble émergée aux  
1438 plus fortes profondeur de nappe pour l'expérimentation A, ces observations restent à  
1439 confirmer. Cette absence d'effet du niveau de la nappe sur la PPB peut, peut être,  
1440 être liée à la profondeur des mésocosmes (30 cm). En effet dans Blodau *et al.* (2004)  
1441 et Dinsmore *et al.* (2009), les mésocosmes utilisés sont plus grands, 75 et 41 cm res-  
1442 pectivement, ont permis d'abaisser le niveau de l'eau au delà de -30 cm. Cette limite  
1443 a été rapportée plusieurs fois comme étant un seuil au delà duquel son observés des  
1444 changements importants (Blodau *et al.*, 2004; Peichl *et al.*, 2014). Ce seuil est expliqué  
1445 comme étant la limite au delà de laquelle les forces de capillarités ne permettent plus

1446 d'alimenter en eau les sphaignes (Rydin et Jeglum, 2013b; Ketcheson et Price, 2014).  
1447 Il résulte des constats précédents qu'une baisse du niveau de nappe, faisant augmenter  
1448 la RE et ne changeant pas ou peu la PPB, conduit à une baisse de l'ENE. Cette di-  
1449 minution de l'ENE est cohérente avec la littérature, que ce soit des expérimentations  
1450 en mésocosmes (Aerts et Ludwig, 1997; Blodau *et al.*, 2004), ou in-situ (Bubier *et al.*,  
1451 2003; Sonnentag *et al.*, 2010). Malgré tout l'extrapolation de ses résultats à d'autres  
1452 situations n'est pas évidente car fortement fonction du contexte. D'autre études n'ont,  
1453 par exemple, pas observé d'influence du niveau de la nappe sur la RE (Updegraff *et al.*,  
1454 2001). Par ailleurs Laiho (2006) a montré l'importance du contexte et notamment celui  
1455 de l'échelle de temps considéré qui peut impliquer des phénomènes différents et donc  
1456 avoir des conséquences différentes.

1457 La dépendance entre les flux de CH<sub>4</sub> et le niveau de la nappe, devant conduire à une  
1458 baisse des émissions quand le niveau de la nappe diminue, comme décrite dans Aerts et  
1459 Ludwig (1997), Pelletier *et al.* (2007) ou Turetsky *et al.* (2008), n'a pas été clairement  
1460 observée. Ce constat rejoins d'autres études dans lesquelles une relation inverse ou un  
1461 absence de relation a été trouvé entre le CH<sub>4</sub> et le niveau de la nappe Kettunen *et al.*  
1462 (1996); Bellisario *et al.* (1999); Treat *et al.* (2007). L'observation d'un pic de méthane  
1463 suivant de quelques jours une phase de hausse du niveau de la nappe, est également  
1464 rapportée par Kettunen *et al.* (1996). (**And so what ?**)

#### 1465 4.4.3 Effet cycles multiples



# <sup>1466</sup> 5 Variation journalière de la respiration de l'écosystème (article) <sup>1467</sup>

1469	<b>5.1 Introduction</b>	93
1470		
1471	<b>5.2 Procédure expérimentale et analytique</b>	93
1472	5.2.1 Synchronisation des données	93
1473	5.2.2 Différence entre mesures de jour et mesures de nuit	93
1474	5.2.3 Caractérisation physico-chimique	93
1475	<b>5.3 Résultats</b>	93
1476	5.3.1 Température de l'air et variabilité de RE	93
1477	5.3.2 Synchronisation RE et température du sol	93
1478	5.3.3 Équations utilisées	93
1479	5.3.4 Relation entre RE et la température	93
1480	5.3.5 Évolution du Q10	93
1481	5.3.6 Différence entre mesures de jour et de nuit	93
1482	5.3.7 Caractérisation de la tourbe	93
1483	<b>5.4 Discussion</b>	93
1484	5.4.1 Différence de RE entre les différents sites	93
1485	5.4.2 Temps de latence entre température et RE	93
1486	5.4.3 La synchronisation entre RE et la température améliore la	
1487	représentation de la sensibilité de RE à la température	93
1488	5.4.4 Différence entre mesure de RE faite le jour et la nuit	93
1489	5.4.5 La sensibilité du Q10 à la profondeur de la température et à	
1490	la synchronisation	93

#### 5.4. Discussion

<sub>1493</sub> 5.1 Introduction

<sub>1494</sub> 5.2 Procédure expérimentale et analytique

<sub>1495</sub> 5.2.1 Synchronisation des données

<sub>1496</sub> 5.2.2 Différence entre mesures de jour et mesures de nuit

<sub>1497</sub> 5.2.3 Caractérisation physico-chimique

<sub>1498</sub> 5.3 Résultats

<sub>1499</sub> 5.3.1 Température de l'air et variabilité de RE

<sub>1500</sub> 5.3.2 Synchronisation RE et température du sol

<sub>1501</sub> 5.3.3 Équations utilisées

<sub>1502</sub> 5.3.4 Relation entre RE et la température

<sub>1503</sub> 5.3.5 Évolution du Q10

<sub>1504</sub> 5.3.6 Différence entre mesures de jour et de nuit

<sub>1505</sub> 5.3.7 Caractérisation de la tourbe

<sub>1506</sub> 5.4 Discussion

<sub>1507</sub> 5.4.1 Différence de RE entre les différents sites

<sub>1508</sub> 5.4.2 Temps de latence entre température et RE

<sub>1509</sub> 5.4.3 La synchronisation entre RE et la température améliore



<sup>1514</sup> Conclusions et perspectives

<sub>1515</sub> 5.5 Bilan du bilan (de C) ?

- <sub>1516</sub> Flux fort
- <sub>1517</sub> sensibilité param forte
- <sub>1518</sub> Modèles multi annuel et prise en compte de la végétation
- <sub>1519</sub> Quid des variations journalières dans un bilan annuel ?
- <sub>1520</sub> Les prendre en compte améliorerait-il les modèles
- <sub>1521</sub> modèles globaux ? **limitations des équations** : Plus généralement, la majorité des
- <sub>1522</sub> tourbières sont sous la neige une partie de l'année, ce qui n'arrive que rarement sur
- <sub>1523</sub> la tourbière de La Guette et une partie possède également des zones d'eau libre, qui
- <sub>1524</sub> n'existent pas sur ce site.
- <sub>1525</sub> modèles globaux et profondeur de tourbe

<sub>1526</sub> 5.6 Résilience de la tourbe par rapport aux

- <sub>1527</sub> 2 années sèches qui précèdent le BdC

<sub>1528</sub> (lien chap 3 et 4)

<sub>1529</sub> 5.7 Ouverture vers d'autre méthodes de me-

<sub>1530</sub> sures

- <sub>1531</sub> — chambre automatique (lien chap 5, et chap 3?)
- <sub>1532</sub> — tour eddy covariance (lien chap 5 et chap 3?)

<sub>1533</sub> Bibliographie

- <sub>1534</sub> AERTS, R. et LUDWIG, F. (1997). Water-table changes and nutritional status affect  
<sub>1535</sub> trace gas emissions from laboratory columns of peatland soils. *Soil Biology and*  
<sub>1536</sub> *Biochemistry*, 29(11–12):1691–1698.
- <sub>1537</sub> ALM, J., SAARNIO, S., NYKÄNEN, H., SILVOLA, J. et MARTIKAINEN, P. (1999). Winter  
<sub>1538</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>1539</sub> *chemistry*, 44(2):163–186.
- <sub>1540</sub> ALM, J., TALANOV, A., SAARNIO, S., SILVOLA, J., IKKONEN, E., AALTONEN, H.,  
<sub>1541</sub> NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1997). Reconstruction of the carbon balance  
<sub>1542</sub> for microsites in a boreal oligotrophic pine fen, Finland. *Oecologia*, 110:423–431.
- <sub>1543</sub> ANDREJKO, M. J., FIENE, F. et COHEN, A. D. (1983). Comparison of ashing techniques  
<sub>1544</sub> for determination of the inorganic content of peats. In *Testing of Peats and Organic*  
<sub>1545</sub> *Soils : A Symposium*, volume 820, pages 5–10. ASTM International.
- <sub>1546</sub> AURELA, M., RIUTTA, T., LAURILA, T., TUOVINEN, J.-P., VESALA, T., TUITILA,  
<sub>1547</sub> E.-S., RINNE, J., HAAPANALA, S. et LAINE, J. (2007). CO<sub>2</sub> exchange of a sedge fen  
<sub>1548</sub> in southern Finland—the impact of a drought period. *Tellus B*, 59(5):826–837.
- <sub>1549</sub> BALLANTYNE, D. M., HRIBLJAN, J. A., PYPKER, T. G. et CHIMNER, R. A. (2014).  
<sub>1550</sub> Long-term water table manipulations alter peatland gaseous carbon fluxes in nor-  
<sub>1551</sub> thern Michigan. *Wetlands Ecol. Manage.*, 22(1):35–47.
- <sub>1552</sub> BEER, C., REICHSTEIN, M., TOMELLERI, E., CIAIS, P., JUNG, M., CARVALHAIS, N.,  
<sub>1553</sub> RÖDENBECK, C., ARAIN, M. A., BALDOCCHI, D., BONAN, G. B., BONDEAU, A.,  
<sub>1554</sub> CESCATTI, A., LASSLOP, G., LINDROTH, A., LOMAS, M., LUSSAERT, S., MARGO-  
<sub>1555</sub> LIS, H., OLESON, K. W., ROUPSARD, O., VEENENDAAL, E., VIOVY, N., WILLIAMS,  
<sub>1556</sub> C., WOODWARD, F. I. et PAPALE, D. (2010). Terrestrial Gross Carbon Dioxide Up-  
<sub>1557</sub> take : Global Distribution and Covariation with Climate. *Science*, 329(5993):834–838.
- <sub>1558</sub> BELLISARIO, L. M., BUBIER, J. L., MOORE, T. R. et CHANTON, J. P. (1999). Controls  
<sub>1559</sub> on CH<sub>4</sub> emissions from a northern peatland. *Global Biogeochemical Cycles*, 13(1):81–  
<sub>1560</sub> 91.
- <sub>1561</sub> BLODAU, C., BASILIKO, N. et MOORE, T. R. (2004). Carbon turnover in peatland  
<sub>1562</sub> mesocosms exposed to different water table levels. *Biogeochemistry*, 67(3):331–351.
- <sub>1563</sub> BOND-LAMBERTY, B. et THOMSON, A. (2010). Temperature-associated increases in  
<sub>1564</sub> the global soil respiration record. *Nature*, 464(7288):579–582.
- <sub>1565</sub> BORTOLUZZI, E., EPRON, D., SIEGENTHALER, A., GILBERT, D. et BUTTLER, A.  
<sub>1566</sub> (2006). Carbon balance of a European mountain bog at contrasting stages of re-  
<sub>1567</sub> generation. *New Phytol.*, 172(4):708–718.

- 1568 BUBIER, J., COSTELLO, A., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et SAVAGE, K. (1993).  
 1569 Microtopography and methane flux in boreal peatlands, northern Ontario, Canada.  
 1570 *Canadian Journal of Botany*, 71(8):1056–1063.
- 1571 BUBIER, J. L., BHATIA, G., MOORE, T. R., ROULET, N. T. et LAFLEUR, P. M. (2003).  
 1572 Spatial and Temporal Variability in Growing-Season Net Ecosystem Carbon Dioxide  
 1573 Exchange at a Large Peatland in Ontario, Canada. *Ecosystems*, 6:353–367.
- 1574 BUBIER, J. L., CRILL, P. M., MOORE, T. R., SAVAGE, K. et VARNER, R. K. (1998).  
 1575 Seasonal patterns and controls on net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in a boreal peatland  
 1576 complex. *Global Biogeochemical Cycles*, 12(4):703–714.
- 1577 BUBIER, J. L., MOORE, T. R., BELLISARIO, L., COMER, N. T. et CRILL, P. M. (1995).  
 1578 Ecological controls on methane emissions from a Northern Peatland Complex in the  
 1579 zone of discontinuous permafrost, Manitoba, Canada. *Global Biogeochemical Cycles*,  
 1580 9(4):455–470.
- 1581 BUCKLAND, P. C. (1993). Peatland archaeology : a conservation resource on the edge  
 1582 of extinction. *Biodivers. Conserv.*, 2(5):513–527.
- 1583 CHAPMAN, S., BUTTLER, A., FRANCEZ, A.-J., LAGGOUN-DÉFARGE, F., VASANDER,  
 1584 H., SCHLOTER, M., COMBE, J., GROSVERNIER, P., HARMS, H., EPRON, D. et  
 1585 OTHERS (2003). Exploitation of northern peatlands and biodiversity maintenance :  
 1586 a conflict between economy and ecology. *Front. Ecol. Environ.*, 1(10):525–532.
- 1587 CHRISTENSEN, J. H., HEWITSON, B., BUSUIOC, A., CHEN, A., GAO, X., HELD, R.,  
 1588 JONES, R., KOLLI, R. K., KWON, W. K., LAPRISE, R. et OTHERS (2007). Regional  
 1589 climate projections. *Clim. Change 2007 Phys. Sci. Basis Contrib. Work. Group*  
 1590 *Fourth Assess. Rep. Intergov. Panel Clim. Change Univ. Press Camb. Chapter 11*,  
 1591 pages 847–940.
- 1592 CHRISTENSEN, J. H., KANIKICHLARLA, K. K., MARSHALL, G. et TURNER, J. (2013).  
 1593 Climate phenomena and their relevance for future regional climate change.
- 1594 CIAIS, P., SABINE, C., BALA, G., BOPP, L., BROVKIN, V., CANADELL, J., CHHABRA,  
 1595 A., DEFRIES, R., GALLOWAY, J., HEIMANN, M. et OTHERS (2014). Carbon and  
 1596 other biogeochemical cycles. In *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis.*  
 1597 *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovern-*  
 1598 *mental Panel on Climate Change*, pages 465–570. Cambridge University Press.
- 1599 CROW, S. E. et WIEDER, R. K. (2005). Sources of CO<sub>2</sub> emission from a northern  
 1600 peatland : root respiration, exudation, and decomposition. *Ecology*, 86(7):1825–1834.
- 1601 DINSMORE, K. J., SKIBA, U. M., BILLETT, M. F. et REES, R. M. (2009). Effect  
 1602 of water table on greenhouse gas emissions from peatland mesocosms. *Plant Soil*,  
 1603 318(1-2):229–242.
- 1604 ESWARAN, H., VAN DEN BERG, E. et REICH, P. (1993). Organic carbon in soils of  
 1605 the world. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57(1):192–194.
- 1606 FRANCEZ, A.-J. (2000). La dynamique du carbone dans les tourbières à Sphagnum,  
 1607 de la sphaine à l'effet de serre. *L'Année Biologique*, 39:205–270.

- 1608 FROLKING, S., TALBOT, J., JONES, M. C., TREAT, C. C., KAUFFMAN, J. B., TUIT-  
1609 TILA, E.-S. et ROULET, N. (2011). Peatlands in the Earth's 21st century climate  
1610 system. *Environ. Rev.*, 19(NA):371–396.
- 1611 GOGO, S., GUIMBAUD, C., LAGGOUN-DÉFARGE, F., CATOIRE, V. et ROBERT, C.  
1612 (2011). In situ quantification of CH<sub>4</sub> bubbling events from a peat soil using a new  
1613 infrared laser spectrometer. *Journal of Soils and Sediments*, 11:545–551.
- 1614 GORHAM, E. (1991). Northern Peatlands : Role in the Carbon Cycle and Probable  
1615 Responses to Climatic Warming. *Ecol. Appl.*, 1(2):182–195.
- 1616 GÖRRES, C. M., KUTZBACH, L. et ELSGAARD, L. (2014). Comparative modeling of  
1617 annual CO<sub>2</sub> flux of temperate peat soils under permanent grassland management.  
1618 *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 186:64–76.
- 1619 GUIMBAUD, C., CATOIRE, V., GOGO, S., ROBERT, C., CHARTIER, M., LAGGOUN-  
1620 DÉFARGE, F., GROSSEL, A., ALBÉRIC, P., POMATHIOD, L., NICOULLAUD, B. et  
1621 RICHARD, G. (2011). A portable infrared laser spectrometer for flux measurements  
1622 of trace gases at the geosphere-atmosphere interface. *Measurement Science & Tech-*  
1623 *nology*, 22(7):1–17.
- 1624 HARRIS, D. C. (2010). Charles David Keeling and the Story of Atmospheric CO<sub>2</sub>  
1625 Measurements†. *Anal. Chem.*, 82(19):7865–7870.
- 1626 JACOBS, C. M. J., JACOBS, A. F. G., BOSVELD, F. C., HENDRIKS, D. M. D., HENSEN,  
1627 A., KROON, P. S., MOORS, E. J., NOL, L., SCHRIER-UIJL, A. et VEENENDAAL, E. M.  
1628 (2007). Variability of annual CO<sub>2</sub> exchange from Dutch grasslands. *Biogeosciences*,  
1629 4(5):803–816.
- 1630 JONES, M. C. et YU, Z. (2010). Rapid deglacial and early Holocene expansion of  
1631 peatlands in Alaska. *PNAS*, 107(16):7347–7352.
- 1632 JOOSTEN, H. et CLARKE, D. (2002). *Wise use of mires and peatlands*. International  
1633 mire conservation group.
- 1634 JUNE, T., EVANS, J. R. et FARQUHAR, G. D. (2004). A simple new equation for the  
1635 reversible temperature dependence of photosynthetic electron transport : a study on  
1636 soybean leaf. *Funct. Plant Biol.*, 31(3):275–283. WOS :000220831200008.
- 1637 KAUFMAN, D. S., AGER, T. A., ANDERSON, N. J., ANDERSON, P. M., ANDREWS,  
1638 J. T., BARTLEIN, P. J., BRUBAKER, L. B., COATS, L. L., CWYNAR, L. C., DUVALL,  
1639 M. L., DYKE, A. S., EDWARDS, M. E., EISNER, W. R., GAJEWSKI, K., GEIRSDÓT-  
1640 TIR, A., HU, F. S., JENNINGS, A. E., KAPLAN, M. R., KERWIN, M. W., LOZHKNIN,  
1641 A. V., MACDONALD, G. M., MILLER, G. H., MOCK, C. J., OSWALD, W. W., OTTO-  
1642 BLIESNER, B. L., PORINCHU, D. F., RÜHLAND, K., SMOL, J. P., STEIG, E. J. et  
1643 WOLFE, B. B. (2004). Holocene thermal maximum in the western Arctic (0–180°W).  
1644 *Quaternary Science Reviews*, 23(5–6):529–560.
- 1645 KETCHESON, S. J. et PRICE, J. S. (2014). Characterization of the fluxes and stores of  
1646 water within newly formed Sphagnum moss cushions and their environment. *Ecohy-  
1647 drology*, 7(2):771–782.

- 1648 KETTUNEN, A., KAITALA, V., ALM, J., SILVOLA, J., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN,  
1649 P. J. (1996). Cross-correlation analysis of the dynamics of methane emissions from  
1650 a boreal peatland. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 10(3):457–471.
- 1651 KIM, J. et VERMA, S. B. (1992). Soil surface CO<sub>2</sub> flux in a Minnesota peatland.  
1652 *Biogeochemistry*, 18(1):37–51.
- 1653 LAIHO, R. (2006). Decomposition in peatlands : Reconciling seemingly contrasting  
1654 results on the impacts of lowered water levels. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8):  
1655 2011–2024.
- 1656 LANDVA, A. O., KORPIJAAKKO, E. O. et PHEENEY, P. E. (1983). Geotechnical clas-  
1657 sification of peats and organic soils. In *Testing of peats and organic soils*, volume  
1658 820, pages 37–51.
- 1659 LAPPALAINEN, E. (1996). *Global peat resources*, volume 4. International Peat Society  
1660 Jyskä.
- 1661 LIVINGSTON, G. P. et HUTCHINSON, G. L. (1995). Enclosure-based measurement of  
1662 trace gas exchange : applications and sources of error. *Biog. Trace Gases Meas.*  
1663 *Emiss. Soil Water*, pages 14–51.
- 1664 LONG, K. D., FLANAGAN, L. B. et CAI, T. (2010). Diurnal and seasonal variation in  
1665 methane emissions in a northern Canadian peatland measured by eddy covariance.  
1666 *Global Change Biology*, 16(9):2420–2435.
- 1667 LUND, M., CHRISTENSEN, T. R., LINDROTH, A. et SCHUBERT, P. (2012). Effects  
1668 of drought conditions on the carbon dioxide dynamics in a temperate peatland.  
1669 *Environ. Res. Lett.*, 7(4):045704.
- 1670 LUO, Y. et ZHOU, X. (2006). Chapter 8 - Methods of measurements and estimations.  
1671 In LUO, Y. et ZHOU, X., éditeurs : *Soil Respiration and the Environment*, pages 161  
1672 – 185. Academic Press, Burlington.
- 1673 MACDONALD, G. M., BEILMAN, D. W., KREMENETSKI, K. V., SHENG, Y., SMITH,  
1674 L. C. et VELICHKO, A. A. (2006). Rapid early development of circumarctic peatlands  
1675 and atmospheric CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> variations. *Science*, 314(5797):285–288.
- 1676 MANNEVILLE, O. (1999). *Le monde des tourbières et des marais : France, Suisse,*  
1677 *Belgique et Luxembourg*. Delachaux & Niestle.
- 1678 NATIONAL WETLANDS WORKING GROUP (1997). *The Canadian wetland classifica-*  
1679 *tion system*. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 2nd edition édition.
- 1680 PEICHL, M., ÖQUIST, M., LÖFVENIUS, M. O., ILSTEDT, U., SAGERFORS, J., GRELLÉ,  
1681 A., LINDROTH, A. et NILSSON, M. B. (2014). A 12-year record reveals pre-growing  
1682 season temperature and water table level threshold effects on the net carbon dioxide  
1683 exchange in a boreal fen. *Environ. Res. Lett.*, 9(5):055006.
- 1684 PELLETIER, L., MOORE, T. R., ROULET, N. T., GARNEAU, M. et BEAULIEU-AUDY,  
1685 V. (2007). Methane fluxes from three peatlands in the La Grande Rivière watershed,  
1686 James Bay lowland, Canada. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).

- 1687 POST, W. M., EMANUEL, W. R., ZINKE, P. J. et STANGENBERGER, A. G. (1982). Soil  
1688 carbon pools and world life zones. *Nature*, 298:156–159.
- 1689 PUMPANEN, J., KOLARI, P., ILVESNIEMI, H., MINKKINEN, K., VESALA, T., NIINISTÖ,  
1690 S., LOHILA, A., LARMOLA, T., MORERO, M., PIHLATIE, M., JANSENS, I., YUSTE,  
1691 J. C., GRÜNZWEIG, J. M., RETH, S., SUBKE, J.-A., SAVAGE, K., KUTSCH, W., ØS-  
1692 TRENG, G., ZIEGLER, W., ANTHONI, P., LINDROTH, A. et HARI, P. (2004). Com-  
1693 parison of different chamber techniques for measuring soil CO<sub>2</sub> efflux. *Agric. For.  
1694 Meteorol.*, 123(3–4):159–176.
- 1695 RAMEAU, J.-C., MANSION, D. et DUMÉ, G. (2008). *Flore forestière française : Plaines  
1696 et collines*. Forêt privée française.
- 1697 RAMSAR, C. (1987). *Convention relative aux zones humides d'importance internatio-  
1698 nale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau, (Ramsar, Iran, 1971) telle  
1699 qu'amendée en 1982 et 1987.*
- 1700 ROBERT, C. (2007). Simple, stable, and compact multiple-reflection optical cell for  
1701 very long optical paths. *Appl. Opt.*, 46(22):5408.
- 1702 ROBERT, M. et SAUGIER, B. (2003). Contribution des écosystèmes continentaux à la  
1703 séquestration du carbone. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(6–7):577–595.
- 1704 RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013a). Peat and organic soil. In *The biology of Peatlands*,  
1705 pages 85–107. Oxford University Press.
- 1706 RYDIN, H. et JEGLUM, J. (2013b). Sphagnum - the builder of boreal peatlands. In  
1707 *The biology of Peatlands*, pages 65–84. Oxford University Press.
- 1708 SIEGENTHALER, U. et OESCHGER, H. (1987). Biospheric CO<sub>2</sub> emissions during the  
1709 past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus B*, 39B(1-  
1710 2):140–154.
- 1711 SILVOLA, J., ALM, J., AHLHOLM, U., NYKÄNEN, H. et MARTIKAINEN, P. J. (1996).  
1712 The contribution of plant roots to CO<sub>2</sub> fluxes from organic soils. *Biol Fertil Soils*,  
1713 23(2):126–131.
- 1714 SMITH, L. C., MACDONALD, G. M., VELICHKO, A. A., BEILMAN, D. W., BORISOVA,  
1715 O. K., FREY, K. E., KREMENETSKI, K. V. et SHENG, Y. (2004). Siberian Peatlands  
1716 a Net Carbon Sink and Global Methane Source Since the Early Holocene. *Science*,  
1717 303(5656):353–356.
- 1718 SONNENTAG, O., VAN DER KAMP, G., BARR, A. G. et CHEN, J. M. (2010). On the  
1719 relationship between water table depth and water vapor and carbon dioxide fluxes  
1720 in a minerotrophic fen. *Glob. Change Biol.*, 16(6):1762–1776.
- 1721 STRACK, M. (2008). *Peatlands and climate change*. IPS, International Peat Society,  
1722 Jyväskylä, Finland.
- 1723 STRACK, M., WALLER, M. F. et WADDINGTON, J. M. (2006). Sedge succession and  
1724 peatland methane dynamics : A potential feedback to climate change. *Ecosystems*,  
1725 9(2):278–287.

- 1726 STRACK, M. et ZUBACK, Y. C. A. (2013). Annual carbon balance of a peatland 10 yr  
1727 following restoration. *Biogeosciences*, 10(5):2885–2896.
- 1728 TREAT, C. C., BUBIER, J. L., VARNER, R. K. et CRILL, P. M. (2007). Timescale  
1729 dependence of environmental and plant-mediated controls on CH<sub>4</sub> flux in a temperate  
1730 fen. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 112(G1).
- 1731 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2012). Methane fluxes from a  
1732 patterned fen of the northeastern part of the La Grande river watershed, James Bay,  
1733 Canada. *Biogeochemistry*, 113(1-3):409–422.
- 1734 TRUDEAU, N. C., GARNEAU, M. et PELLETIER, L. (2014). Interannual variability in  
1735 the CO<sub>2</sub> balance of a boreal patterned fen, James Bay, Canada. *Biogeochemistry*,  
1736 118(1-3):371–387.
- 1737 TURETSKY, M. R., TREAT, C. C., WALDROP, M. P., WADDINGTON, J. M., HAR-  
1738 DEN, J. W. et MC GUIRE, A. D. (2008). Short-term response of methane fluxes and  
1739 methanogen activity to water table and soil warming manipulations in an Alaskan  
1740 peatland. *J. Geophys. Res. Biogeosciences 2005–2012*, 113(G3).
- 1741 TURUNEN, J., TOMPOPO, E., TOLONEN, K. et REINIKAINEN, A. (2002). Estimating  
1742 carbon accumulation rates of undrained mires in Finland—application to boreal and  
1743 subarctic regions. *The Holocene*, 12(1):69–80.
- 1744 UPDEGRAFF, K., BRIDGHAM, S. D., PASTOR, J., WEISHAMPEL, P. et HARTH, C.  
1745 (2001). Response of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> emissions from peatlands to warming and water  
1746 table manipulation. *Ecol. Appl.*, 11(2):311–326.
- 1747 VIEL, E., BINET, S., GOGO, S. et LAGGOUN-DÉFARGE, F. (2015). Tree invasion  
1748 controls the drainage pattern in La Guette peatland (France) : impact on the water  
1749 storage capacity of the peat. *Journal of Hydrology (submitted)*.
- 1750 WADDINGTON, J. M. et ROULET, N. T. (2000). Carbon balance of a boreal patterned  
1751 peatland. *Global Change Biology*, 6(1):87–97.
- 1752 WORRALL, F., BURT, T., ROWSON, J., WARBURTON, J. et ADAMSON, J. (2009).  
1753 The multi-annual carbon budget of a peat-covered catchment. *Science of The Total  
1754 Environment*, 407(13):4084–4094.
- 1755 YU, Z., BEILMAN, D. W. et JONES, M. C. (2009). Sensitivity of northern peatland car-  
1756 bon dynamics to Holocene climate change. In *Carbon cycling in northern peatlands*,  
1757 volume 184, pages 55–69. American Geophysical Union, Geophysical Monograph Se-  
1758 ries Washington, DC.
- 1759 YU, Z., LOISEL, J., BROSSEAU, D. P., BEILMAN, D. W. et HUNT, S. J. (2010). Global  
1760 peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophys. Res. Lett.*, 37(13).

# Index

## A

1761 atterrissage ..... 11

## C

1764 carbone

1765 stock ..... 12

1766 changements globaux ..... 2, 14

## E

1768 échange net de l'écosystème

1769 contrôle ..... 21

## P

1771 paludification ..... 11

1772 photosynthèse ..... 17

1773 production primaire brute

1774 contrôle ..... 21

## R

1776 respiration ..... 18

1777 de l'écosystème ..... 18

1778 contrôle ..... 20

1779 du sol ..... 18

## S

1781 services écologiques ..... 3

## T

1783 tourbières ..... 8–16

1784 distribution ..... 11

1785 formation ..... 11

1786 surface ..... 10

1787 utilisation ..... 14

1788 tourbification ..... 10

## Z

1790 zone humide ..... 8



<sup>1791</sup> Annexes

<sub>1792</sub> A Photos supplémentaires



(a) droséra

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

<sub>1793</sub> B protocole végétation

<sub>1794</sub> Le suivi non-destructif d'une végétation n'est pas triviale et nécessite la mise en  
<sub>1795</sub> place de protocoles particuliers en fonction du type de végétation. L'objectif est de  
<sub>1796</sub> pouvoir estimer une biomasse produite en impactant au minimum la végétation en  
<sub>1797</sub> place. Pour l'ensemble des espèces végétales présentes dans les embases servant à la  
<sub>1798</sub> mesure des flux un recouvrement à été estimé, à l'œil.

<sub>1799</sub> **La strate arbustive**

<sub>1800</sub> Pour la strate arbustive des mesures de hauteur moyenne ont été effectuées, en  
<sub>1801</sub> mesurant depuis le niveau du sol, ou le toit des sphaignes, si elles étaient présentes,  
<sub>1802</sub> jusqu'au sommet de l'individu.

<sub>1803</sub> **La strate herbacée**

<sub>1804</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>1805</sub> les mesurer plusieurs fois au cours de la saison. Cependant les difficultés à retrouver  
<sub>1806</sub> les individus marqués couplés à la mort d'un nombre important d'entre eux n'ont pas  
<sub>1807</sub> permis d'acquérir de résultats significatifs. En conséquence en 2014 ces deux espèces  
<sub>1808</sub> ont fait l'objet de comptage exhaustif et de mesure de hauteur moyenne.  
<sub>1809</sub>

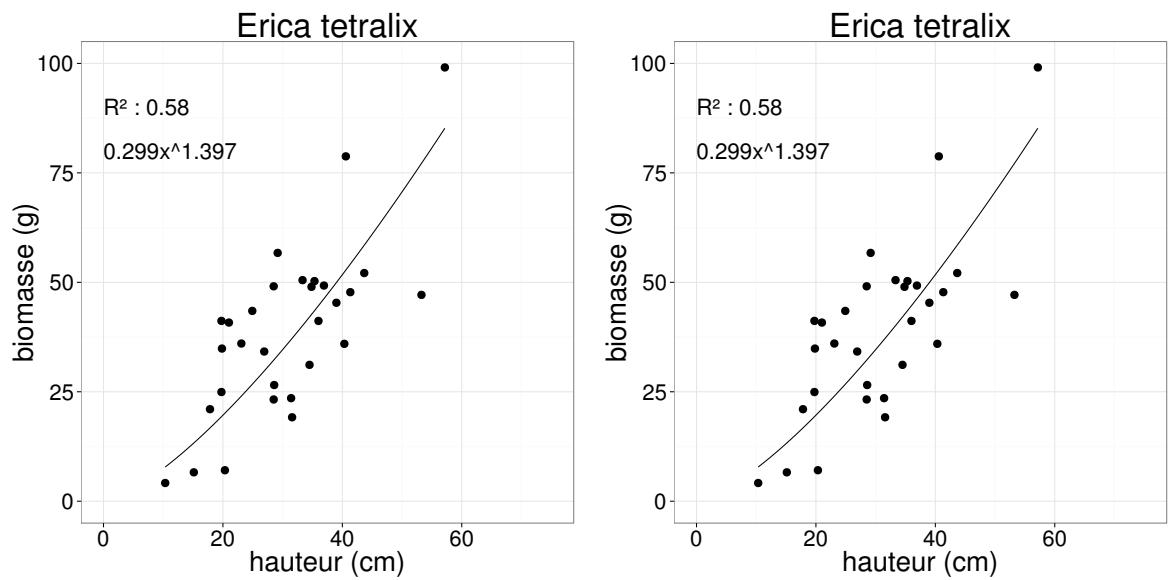


FIGURE 2 – Calibration de la biomasse en fonction de la hauteur

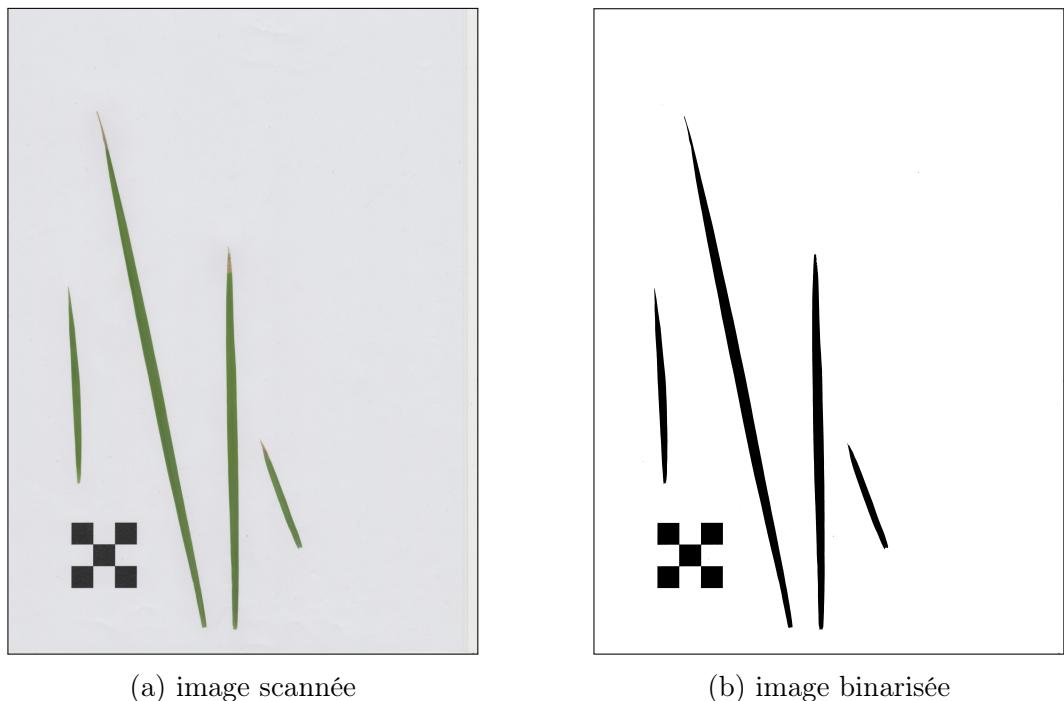


FIGURE 3 – Scanne des feuilles

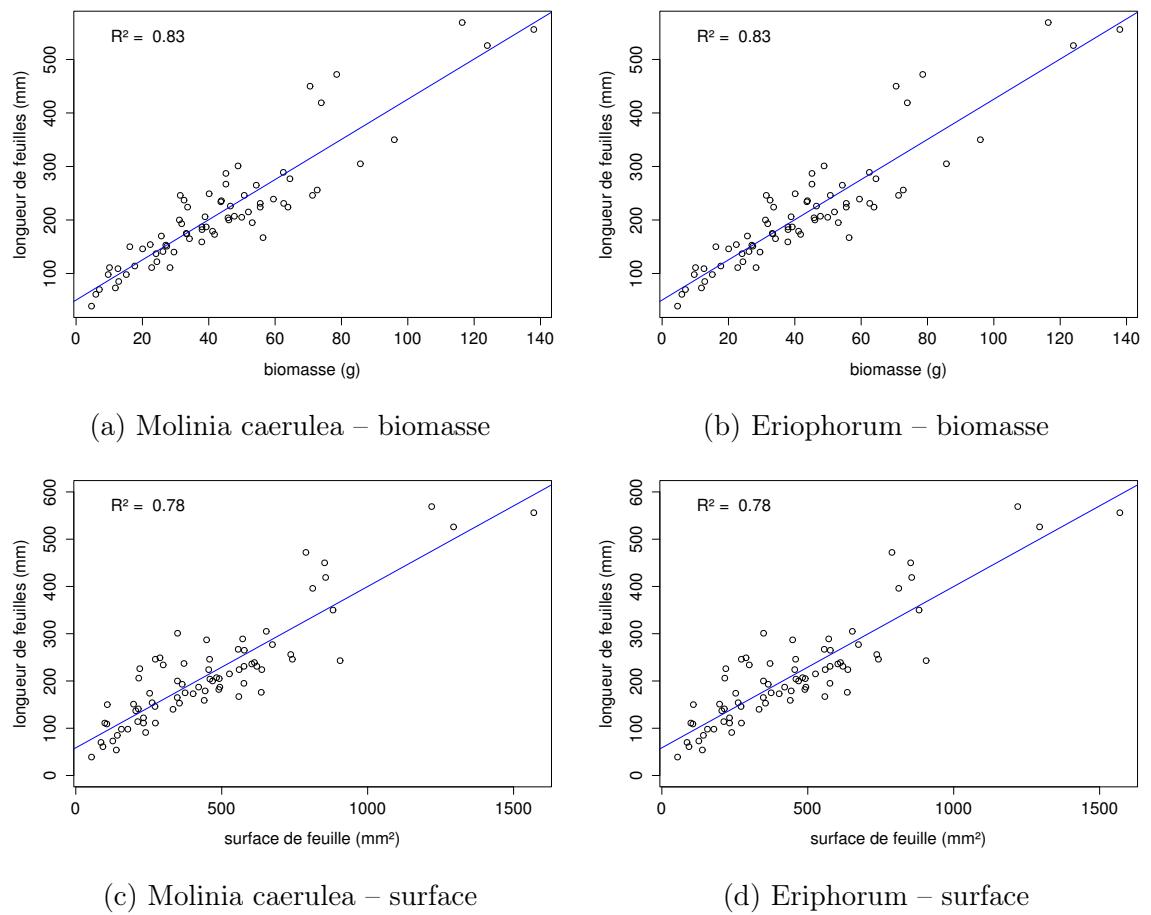


FIGURE 4 – Calibration de la biomasse herbacées pour *Molinia Caerulea* (a), pour *Eriophorum* (b) et de la surface de feuille pour *Molinia Caerulea* (c), pour *Eriophorum* (d) en fonction de la hauteur

<sub>1810</sub> C CARBIODIV

<sub>1811</sub> D package m70r

[Prénom NOM]  
**[Titre de la thèse (en français)]**

Résumé : (1700 caractères max.)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Proin volutpat ipsum id purus ultrices lobortis. Maecenas ornare enim quis eros. Nunc eget mauris ut quam malesuada mattis. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae ; Integer vel tellus. Nam rutrum, purus non sodales rhoncus, quam magna imperdiet eros, sit amet euismod justo metus at orci. Suspendisse neque turpis, feugiat interdum, faucibus vel, aliquet quis, risus. Etiam est elit, eleifend a, consequat sit amet, scelerisque nec, odio. Quisque id odio quis libero iaculis tincidunt. Sed non mi. Morbi aliquam commodo nibh. Integer justo purus, pulvinar a, suscipit vel, iaculis a, justo. Morbi ut orci. Maecenas fringilla orci. Phasellus auctor, enim vitae tempus egestas, justo mi cursus sem, vel blandit leo turpis vitae quam. Etiam sit amet felis vitae eros ornare porttitor.

Curabitur felis velit, aliquam at, aliquet in, iaculis vitae, velit. Nunc lobortis magna id ligula. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae ; Integer congue ultrices mi. Isdem diebus Apollinaris Domitianus gener, paulo ante agens palatii Caesaris curam, ad Mesopotamiam missus a socero per militares numeros immode dicte scrutabatur, an quaedam altiora meditantis iam Galli secreta suscepit scripta, qui conpertis Antiochiae gestis per minorem Armeniam lapsus Constantinopolim petit.

Mots clés : mot 1, mot 2, ...

**[Titre de la thèse (en anglais)]**

Résumé : (1700 caractères max.)

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Proin volutpat ipsum id purus ultrices lobortis. Maecenas ornare enim quis eros. Nunc eget mauris ut quam malesuada mattis. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae ; Integer vel tellus. Nam rutrum, purus non sodales rhoncus, quam magna imperdiet eros, sit amet euismod justo metus at orci. Suspendisse neque turpis, feugiat interdum, faucibus vel, aliquet quis, risus. Etiam est elit, eleifend a, consequat sit amet, scelerisque nec, odio. Quisque id odio quis libero iaculis tincidunt. Sed non mi. Morbi aliquam commodo nibh. Integer justo purus, pulvinar a, suscipit vel, iaculis a, justo. Morbi ut orci. Maecenas fringilla orci. Phasellus auctor, enim vitae tempus egestas, justo mi cursus sem, vel blandit leo turpis vitae quam. Etiam sit amet felis vitae eros ornare porttitor.

Curabitur felis velit, aliquam at, aliquet in, iaculis vitae, velit. Nunc lobortis magna id ligula. Vestibulum ante ipsum primis in faucibus orci luctus et ultrices posuere cubilia Curae ; Integer congue ultrices mi. Isdem diebus Apollinaris Domitianus gener, paulo ante agens palatii Caesaris curam, ad Mesopotamiam missus a socero per militares numeros immode dicte scrutabatur, an quaedam altiora meditantis iam Galli secreta suscepit scripta, qui conpertis Antiochiae gestis per minorem Armeniam lapsus Constantinopolim petit.

Mots clés : mot 1, mot 2, ...