

## **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**  
**Fatima LAGGOUN**

Co-directeur de recherche, LPC2E, Orléans  
Co-directeur de recherche, ISTO, Orléans

**RAPPORTEURS :**

**Prénom NOM**  
**Prénom NOM**

Titre, établissement  
Titre, établissement

---

**JURY :**

**Prénom NOM**  
**Prénom NOM**  
**Prénom NOM**  
**Prénom NOM**  
**Prénom NOM**  
**Prénom NOM**  
**Prénom NOM**

Titre, établissement, Président du jury  
Titre, établissement  
Titre, établissement  
Titre, établissement  
Titre, établissement  
Titre, établissement  
Titre, établissement

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>ii</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>v</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>vii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>ix</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Synthèse Bibliographique</b>	<b>7</b>
1.1 Qu'est ce qu'une tourbière? . . . . .	8
1.1.1 Le CO <sub>2</sub> processus de productions/dégradations et de transport .	9
1.1.2 Le CH <sub>4</sub> processus de productions/dégradations et de transport .	11
1.2 Les facteurs majeurs contrôlant les flux . . . . .	12
1.2.1 La température et les flux . . . . .	12
1.2.2 L'hydrologie dans les tourbières et l'effet sur les flux . . . . .	12
1.2.3 La végétation dans les tourbières et l'effet sur les flux . . . . .	13
<b>2 Sites d'études et méthodologies employées</b>	<b>15</b>
2.1 Présentation des sites d'études . . . . .	16
2.1.1 La Guette . . . . .	16
2.1.2 Frasne . . . . .	17
2.1.3 Landemarais . . . . .	17
2.1.4 Bernadouze . . . . .	17
2.2 Mesures de flux . . . . .	17
2.3 Facteurs contrôlants et suivi des flux . . . . .	18
<b>3 Effets de la températures sur les variations journalière des flux de CO<sub>2</sub></b>	<b>19</b>
3.1 Introduction . . . . .	20
3.2 Présentation de l'expérimentation . . . . .	21
3.3 synchronisation et profils (article) . . . . .	22

<b>4</b>	<b>Effets de l'hydrologie sur les flux de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub></b>	<b>23</b>
4.1	Introduction . . . . .	24
4.2	Manipulation du niveau de l'eau en mésocosmes . . . . .	24
4.2.1	Présentation de l'expérimentation . . . . .	24
4.2.2	Résultats . . . . .	24
4.3	Manipulation du niveau de l'eau (teneur en eau) in-situ . . . . .	24
4.3.1	Présentation de l'expérimentation . . . . .	25
4.3.2	Résultats . . . . .	25
<b>5</b>	<b>Effets de la végétation sur les flux</b>	<b>27</b>
5.1	Introduction . . . . .	28
5.2	Mise en place d'un protocole . . . . .	28
5.3	Impact des mesures de CO <sub>2</sub> sur la végétation . . . . .	28
<b>6</b>	<b>Caractérisation de la variabilité spatio-temporelle des flux sur la tourbière de La Guette (Bilan de C)</b>	<b>29</b>
6.1	Introduction . . . . .	30
6.2	Présentation du suivi . . . . .	30
6.2.1	Suivi des GES . . . . .	31
6.2.2	Suivi des facteurs contrôlants . . . . .	31
6.2.3	Suivi des flux liquides (DOC, POC) . . . . .	31
<b>7</b>	<b>Apport à la modélisation globale</b>	<b>33</b>
7.1	Introduction . . . . .	34
7.2	Le modèle de Walter . . . . .	34
	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>35</b>
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>38</b>
	<b>Index</b>	<b>39</b>

## Liste des figures



# Liste des tableaux

1	Estimations des stocks de C pour différents environnements . . . . .	4
---	--	---



# Avant-propos





# Remerciements



# Introduction

# Contexte général

En 1957, Charles David Keeling, scientifique américain, met au point et utilise pour la première fois, un analyseur de gaz infra-rouge pour mesurer la concentration de CO<sub>2</sub> de l'atmosphère sur l'île d'Hawaii, à Mauna Loa. La précision et la fréquence importante de ses mesures lui permirent de voir pour la première fois les variations journalière et saisonnière des concentrations en CO<sub>2</sub> atmosphérique, mais également à plus long terme leur tendance haussière (Harris, 2010). Le CO<sub>2</sub> est un gaz à effet de serre (GES) et son accumulation dans l'atmosphère...

force ? comparaison ? explication effet de serre ?

Ce constat a probablement joué un rôle considérable dans la prise de conscience, par la communauté scientifique, de l'importance et de l'intérêt de l'étude du changement climatique et plus largement des changements globaux. Car si à l'époque les concentration en CO<sub>2</sub> était inférieure à 320 ppm (partie par millions) elles ont dépassées, au printemps 2014, la barre symbolique des 400 ppm selon un communiqué de l'Organisation Météorologique Mondiale. Les concentrations pré-industrielles (avant 1800) sont quand à elles généralement estimée à 280 ppm (Siegenthaler and Oeschger, 1987).

Aujourd'hui, que ce soit pour le comprendre, le caractériser ou bien le prédire, de nombreux scientifiques dans un grand nombre de disciplines, travaillent directement ou indirectement sur les changements globaux. Ils sont nombreux également à collaborer au sein du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), qui rassemble, évalue et synthétise les connaissances internationales liée au sujet.

De manière générale, parmi les flux de C mesurés entre la biosphère et l'atmosphère, la respiration et la photosynthèse sont les plus important, 98 et 123 PgC/yr pour le flux de respiration globale (+ les feux) et la photosynthèse respectivement

---

26 (Bond-Lamberty and Thomson, 2010; Beer et al., 2010). Pour comparaison les flux  
27 liés à la production de ciment et aux ressources fossiles (charbon, pétrole et gaz)  
28 représentent 7.8 PgC/yr (Ciais et al., 2014).

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

31 schéma ?

32 Zones humides tourbières

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

36 Pourquoi étudier les tourbières aujourd'hui ?

37 L'étude des tourbières se poursuit car, en plus de rendre de nombreux services éco-  
38 logiques (épuration du sol, régulation des flux hydriques, biodiversité), elles consti-  
39 tuent un stock de carbone relativement important au regard de la surface qu'elle  
40 occupent. Ainsi il est généralement admis que les tourbières contiennent un quart  
41 à un tiers du carbone présent dans l'ensemble des terres émergées tandis qu'elle ne  
42 constituent que 3 % des surfaces continentales (**Réf needed**). Ce ratio relativement  
43 important, correspond à un stock d'environ 455 Gt (Gorham, 1991; Turunen et al.,  
44 2002) est à mettre perspective avec les autres stock du cycle du carbone. On observe  
45 que ce stock est du même ordre de grandeur que celui de la végétation

Chiffres  
(surfaces...)

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

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

51

3

Pas d'en-  
trée "jour-  
nal" pour  
Post1982

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

Tableau 1 – Estimations des stocks de C pour différents environnements

## Transition modèles

En octobre 2013 le Groupe d’experts Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat (GIEC) a publié le rapport du groupe de travail I qui travaille sur les aspects scientifique physique du système et du changement climatique. S’il note que les connaissances ont avancées, il note également que de nombreux processus ayant trait à la décomposition du carbone sont toujours absent des modèles notamment en ce qui concerne le carbone des zones humides boréales et tropicales et des tourbières. (**Réf needed**)

## Objectif de la thèse et approche mise en oeuvre

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

Pour atteindre ces objectifs, nos travaux ont été articulés autour de trois volets

---

70 principaux : Dans un premier temps, l'**observation** régulière des flux de gaz (CO<sub>2</sub>  
71 et CH<sub>4</sub>) ainsi que d'un certain nombre de paramètres environnementaux servant à la  
72 caractérisation des variabilités spatiales et temporelles, ainsi qu'à l'étude des facteurs  
73 contrôlant. Certains facteurs contrôlant qui sont, dans un second temps, étudiés plus  
74 spécifiquement à travers un volet **expérimentation**. Ce dernier doit permettre une  
75 meilleure compréhension de processus clé avec notamment l'impact de l'hydrologie.  
76 Enfin un troisième volet axé sur la **modélisation**, avec le développement d'un modèle  
77 le plus mécaniste possible.

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

volet... t'as  
pas mieux ?  
Branche ?  
- \_ -"



## Introduction

---

attention première citation ([Francez, 2000](#)) test d'une apostrophe! L'Année Biologique

# Chapitre 1

## Synthèse Bibliographique

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

### 1.1 Qu'est ce qu'une tourbière ?

Les tourbières font partie d'un ensemble d'écosystèmes que l'on appelle les zones humides. Ces écosystèmes ont, comme leur nom peut le laisser penser, un lien étroit avec l'eau. Ainsi outre les tourbières, les lacs, les deltas, les mangroves en font également partie. Les tourbières représentent 50 à 70 % des zones humides (francez2000, wise use of peatland), s'étendant sur plus de 4000000 de km<sup>2</sup> (Lappalainen). Une définition régulièrement utilisée pour caractériser ce qu'est une tourbière est : "Tout écosystème possédant au moins 30 cm de tourbe". Malgré le fait que cette définition ne soit pas très éclairante, elle est souvent préférée à une définition plus stricte : "écosystème dans lequel un processus de tourbification est actif". qui n'est pas beaucoup plus lumineuse. Qu'est ce que la tourbe ? Et qu'est ce que la tourbification ? La tourbe est le résultat de l'accumulation et de la, faible, dégradation de litières végétales. C'est ce que l'on appelle la tourbification. La structure de la tourbe est liée à une production primaire particulièrement importante, comparée à un sol forestier par exemple, mais plutôt à une dégradation plus faible des matières organiques. **Attention tu parles ici des tourbières boréales spécifiquement sans les avoir décrites auparavant.** Cette faible dégradation est due notamment au fait que ces écosystèmes, sont saturés en eau une grande partie de l'année (ce sont des zones humides). Par conséquent, l'accès à l'oxygène est plus difficile diminuant d'autant l'activité aérobie, dont

la respiration des micro-organismes et des plantes.

La classification des tourbières n'est pas simple, de nombreux critères existent selon leur mode de formation, leur source d'eau, leur physico-chimie. Au niveau terminologie, de nombreux termes ont été utilisés parfois en contradiction les uns avec les autres. Les tourbières sont donc des zones dans lesquelles l'eau a un rôle majeur. Les tourbières sont le siège d'une biodiversité spécifique relativement importante et rendent un certain nombre de services écologiques. Parmi la végétation caractéristique de ces écosystèmes, les sphaignes, des bryophytes (des mousses) sont normalement présentes en abondance. Ces écosystèmes ont été et sont encore perturbés par différentes activités humaines, notamment l'agriculture, l'utilisation de la tourbe comme combustible, et comme substrat horticole. Ces perturbations peuvent induire des modifications de fonctionnement, notamment l'envahissement de ces écosystèmes par une végétation vasculaire. Ces écosystèmes s'étendent sur 4 000 000 de km<sup>2</sup>.

Depuis quand sont-elles étudiées D'abord étudiées pour leurs propriétés physiques afin de connaître leur qualité en tant que combustible. Elle sont maintenant majoritairement étudiée à travers le prisme des changements globaux. Ainsi les études concernent les flux de GES, ...

### 1.1.1 Le CO<sub>2</sub> processus de productions/dégradations et de transport

Le CO<sub>2</sub> est un des principaux gaz à effet de serre si bien que les autres sont souvent classés en fonction de ce dernier.

**\*\* Historique précis des études concernant les GES (CH<sub>4</sub>)**

## La production de CO<sub>2</sub> : La respiration de l'écosystème (processus de production)

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

Les tourbières sont des écosystèmes dont la production primaire est estimée à environ 500 g C.m<sup>-2</sup> (Francez, 2000). La strate muscinale pouvant jouer/participer/produire jusqu'à 80% de la production primaire (Francez, 2000). Cette production primaire n'est pas particulière élevée (**Réf needed**) et c'est en fait la faible décomposition des matières organiques qui permet aux tourbières de stocker du carbone. L'accumulation moyenne estimée dans les tourbières boréales est de 30 g C.m<sup>-2</sup>. Le taux d'accumulation varie en fonction des espèces végétales présentes ((**Réf needed**)), le niveau d'eau ((**Réf needed**)), ... (??)

### **La capture du CO<sub>2</sub> :(processus de stockage)**

C'est évidemment par photosynthèse que le CO<sub>2</sub> est pompé de l'atmosphère pour être stocké dans tissus des végétaux avant d'être en partie non dégradé et donc stockés dans les litières puis dans la tourbe à proprement parler. La vitesse de stockage a pu varier au cours du temps mais elle est estimée à XXXX, ainsi la majorité des tourbières actuelles ont un stock qui remonte à quelques milliers d'années. Les estimations précises du stock de C présent dans ces écosystèmes sont délicates, à la fois car la définition de ce qu'est une tourbière peut varier selon les régions, mais également car leur étendue exacte n'est pas triviale à estimer, pas davantage que leur profondeur moyenne. Cependant il est usuellement admis que le stock de carbone se situe entre 270 et 500 Gt de C.

#### **1.1.2 Le CH<sub>4</sub> processus de productions/dégradations et de transport**

Comparé au CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub> est un GES qui est bien moins présent dans l'atmosphère (CHIFFRES!). Cependant son "pouvoir de réchauffement" est bien plus important (effet radiatif CO<sub>2</sub> x 100) (CHIFFRES!) (D'abord la vapeur d'eau, ensuite le CO<sub>2</sub> et enfin le CH<sub>4</sub>). Il est usuellement convenu (???? ref) que dans une tourbière le méthane représente environ 5% du bilan de C.

## 1.2 Les facteurs majeurs contrôlant les flux

### 1.2.1 La température et les flux

La température est le premier facteur contrôlant les flux. Comme pour toute (la majorité ? y a-t-il des réactions chimiques non influencées par la température ?) les réactions chimiques la température influe sur les vitesses de réactions. Plus la température augmente plus la vitesse de réaction augmente. La température a donc un rôle important à jouer au niveau des flux.

température et ER Concernant la, ou plutôt les respirations de l'écosystème, l'influence de la température sera différente selon les sources considérées. Ainsi à la fois les plantes et les communauté de micro-organisme ne réagiront probablement pas de la même façon, au mêmes moments et avec les même intensités.

température et NEE Pour la NEE même s'il semble y avoir moins de sources possible puisque seule la végétation photosynthétique est concernée, l'influence de la température est également fonction de la végétation présente. De plus ce signal est plus ou moins covariant avec la luminosité ce qui ne facilite pas son interprétation.

Synchronisation

### 1.2.2 L'hydrologie dans les tourbières et l'effet sur les flux

L'hydrologie est comme nous l'avons précisé un peu plus haut, un facteur d'une grande importance dans les tourbières. Nous distinguerons ici le niveau de la nappe qui est la hauteur sous la surface du sol permettant d'accéder à la zone saturée ? à l'eau "lirbe" ? Et l'humidité du sol qui est une estimation de la quantité d'eau présente dans la zone non-saturée.

### **L'effet du niveau de la nappe**

Le niveau de la nappe est important car il sépare la colonne de tourbe en une zone oxygène, ou il y a présence d'oxygène, et une zone anoxique dans laquelle l'oxygène est absent. Ces deux zones vont avoir des comportements différents. La zone anoxique, sous le niveau de la nappe, est une zone dans laquelle la production de CO<sub>2</sub> est très faible car sans oxygène seule les processus de respiration anaérobie peuvent avoir lieu. Par contre dans c'est dans cette zone que sera produit le méthane. La zone oxygène, proche de la surface, va permettre à la fois aux racines et aux micro-organismes de respirer. Cette zone est donc l'endroit où est produit la majorité du CO<sub>2</sub>, l'endroit où la matière organique est le plus dégradée. Lors de la migration du méthane dans la colonne de tourbe ce dernier aura tendance à être oxydé en CO<sub>2</sub> lors de son passage dans cette zone oxygène. Certaines plantes permettent cependant au méthane de passer à travers l'aérenchyme et d'éviter ainsi d'être oxydé.

### **L'effet de l'humidité relative**

### **Résilience de la tourbe**

Les propriétés physiques de la tourbe jouent bien évidemment un rôle important sur cette capacité de rétention d'eau. Cependant dans le cas d'épisode de sécheresse important, il a été constaté que ces capacités n'étaient pas immédiatement recouvertes en totalité.

### **1.2.3 La végétation dans les tourbières et l'effet sur les flux**

Les communautés végétales évoluent en parallèle de l'évolution de la tourbière (succession végétale). Les tourbières sont le siège d'une végétation caractéristique : Les sphaignes. Ces bryophytes sont la clef de voûte de ces écosystèmes d'abord parce



que leur litière sont moins facilement dégradables que celle des espèces vasculaires. Ensuite parce qu'elle favorise dans leur environnement local, les conditions favorables à leur développement. On les appelle d'ailleurs des espèces ingénieuses. Ces végétaux sans racines ont également une grande capacité à retenir l'eau (ce sont de véritables éponges) retenant également les nutriments. Ceci favorisant un milieu pauvre en nutriment et donc défavorable aux autres espèces (vasculaires?). Il existe un grand nombre d'espèces de sphaignes (CHIFFRES+REF). Par la suite il ne sera pas fait de distinction entre les différentes espèces présentes sur les différents sites étudiés. Cependant dans de nombreuses tourbières on constate un envahissement par des végétaux vasculaires. Ces plantes, sont souvent des pins, des bouleaux et des molinie? Elles ont un effet sur la production de CO<sub>2</sub> principalement en aérant le sol, permettant à l'oxygène de migrer plus loin dans le profil, permettant à l'activité aérobie (plus efficace) d'agir sur une plus grande profondeur. Ces végétaux peuvent également pomper de l'eau en quantité (arbre?) ?

Descriptif et comparaison des méthodes permettant de mesurer les flux de gaz

## Chapitre 2

### Sites d'études et méthodologies employées

## 2.1 Présentation des sites d'études

L'ensemble des sites d'études sont regroupés au sein d'un service d'observation

### 2.1.1 La Guette

La tourbière de La Guette est situé à Neuvy-sur-Barangeon, en Sologne, dans le département du Cher. Le site s'étend sur une surface d'une vingtaine d'hectare avec une géométrie relativement allongée. Avec une conductivité généralement inférieur à 80 uS/m<sup>2</sup> et un pH compris entre 4 et 5 elle se classe parmi les "transitionnal poor fen". Les datations effectuées sur le site permettent de dire que la tourbière est âgée de 5 à 6000 ans. Dans les années 19XX la construction d'une route coupe la tourbière dans sa partie sud. En 2008 le récurage du fossé de drainage bordant la route semble entrainer une augmentation significative des pertes d'eau du système.

Des travaux (SOURCE, Émelie) d'analyse de photos aériennes ont ainsi montré une progression importante du boisement (principalement des pins (*Pinus Sylvestris*) et des bouleaux (*Betula* sp.). Des herbacées envahissent également le site avec une forte présence de la molinie (*Molinia caerulea*)

Sont présente sur le site un certain nombre d'espèces caractéristiques des tourbières comme les sphaignes (principalement *Sphagnum cuspidatum* et *Sphagnum rubellum*) et *Eriophorum angustifolium*.

### 2.1.2 Frasne

### 2.1.3 Landemarais

### 2.1.4 Bernadouze

Au sein de ses sites de nombreuses mesures ont été effectuée et notamment des mesures de flux de GES à la fois concernant le CO<sub>2</sub> et le CH<sub>4</sub>. La méthodologie étant transverse à de nombreuses expérimentations il convient de l'expliquer au préalable.

## 2.2 Mesures de flux

Il existe de nombreuses façon de mesurer des flux de gaz. Des méthodes globale comme les tour à flux utilisant des méthodes d'Eddy Covariance. Des méthodes plus locale, les chambres d'accumulation de gaz qui peuvent être statique ou dynamique, selon que la sonde mesurant le gaz soit directement dans la chambre ou que le gaz soit apportée à cette dernière via un système de pompe. Elles peuvent être ouverte ou fermée.

La méthode de mesure retenue pour ces travaux est l'utilisation de chambre statique fermée, permettant une mesure locale et directe des flux. Pour cela des embases sont placées sur le terrain. Il s'agit de cylindre de PVC d'une dizaine de cm, percés dans leur partie basse afin de minimiser les impacts sur les flux d'eau et sur de développement racinaire et enfoncé dans le sol. Les embases sont généralement posée 12h avant toute mesure afin de ne pas mesurer de dégagement gazeux liés à l'installation.

Que mesure-t-on ? Le plus souvent 2 mesures consécutives sont effectuées la première avec une chambre transparente permettant d'accéder à la NEE et l'autre avec une chambre recouverte d'un isolant permettant de bloquer la lumière et permettant

de mesurer les respirations. (pourquoi les respirations?)

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 bruyère n'est pas toujours évident. Plus anecdotiquement des sphaignes gelées, recouvrant les bords de l'embase rendent la pose de la chambre difficile voire impossible. Selon l'heure de la journée des gradients de concentrations peuvent être présent et augmenter localement les concentrations de CO<sub>2</sub> de façon importante allant jusqu'à saturer la sonde.

QUESTIONS :

\*Taille des embases ? Effets de bord ? \*Perturbation du milieu ? (Mesure de végétation, pose de la chambre, mesure piézo...) \*Impact de la strate arborée ? \*Validité des profils de température ? Méthode de Chambre fermée (Biais ?)

Améliorations ?

## 2.3 Facteurs contrôlants et suivi des flux

Afin de déterminer l'impact de facteurs contrôlants sur ces flux, mesurer les flux ne suffit pas il faut également mesurer les variables environnementales dont on pense qu'elles seront des facteurs contrôlants important. Le nombre de ces variables et la méthodologie employée pour les mesurer étant différente selon l'expérimentation ils seront détaillés au fil des besoins par la suite.

## Chapitre 3

Effets de la températures sur les  
variations journalière des flux de CO<sub>2</sub>

## 3.1 Introduction

Les flux de gaz et notamment les flux de CO<sub>2</sub> sont fonctions de la température. La température dépend quand à elle de l'énergie reçue par le soleil et donc varie de façon journalière, saisonnière et au delà !

Afin de palier à ces deux aspects un autre suivi a été mis en place : l'étude des flux de CO<sub>2</sub> à relativement haute fréquence

combien ? qu'est ce qu'une haute fréquence ?

pendant 3 jours et sur 4 sites différents

liste des sites ?

.

Nous avons donc avec ces deux suivis, une vision à la fois sur la variabilité spatiale, au sein d'un site ou inter-site, et une vision sur la variabilité temporelle quelle soit saisonnière, annuelle ou journalière.

Ce schéma n'est bien sur pas parfait, ainsi les sites étudiés restent des sites situés en France alors que la majorité des tourbières se situent à des latitudes plus élevées, dans les zones boréales et sub-boréale.

Proportion des tourbières qui ont été exploités ? qui sont encore à l'état naturel ? à mettre en regard avec la représentativité d'une tourbière comme La Guette. Est-elle représentative ? La majorité des tourbières sont perturbées... Sont-elles envahies par des végétaux vasculaires ?

L'étude d'un système complexe de façon globale permet d'avoir une vision globale, cependant il est difficile de comprendre certains processus quand s'ils sont noyés dans un tel système. L'expérimentation, qu'elle soit sur le terrain ou en laboratoire permet de simplifier notre système afin de pouvoir déterminer l'impact de tel ou tel facteur plus particulièrement, afin de mieux comprendre tel ou tel processus. Ainsi ont été mis en place différentes expérimentation bla bla bla.

## 3.2 Présentation de l'expérimentation

La respiration de l'écosystème (Re) est mesurée tous les quarts d'heure avec une méthode de chambre fermée. La chambre, en plexiglas, est recouverte d'un isolant, un ventilateur placé à l'intérieur de la chambre permet d'homogénéiser l'air. Ce dernier permet d'occulter la lumière du jour, et de conserver une température à l'intérieur de la chambre proche de la température extérieure. Le CO<sub>2</sub> est mesuré à l'aide d'une sonde Vaisala ((**Réf needed**)précise). Chaque mesure dure au maximum 5 minutes, délai permettant d'avoir une stabilisation du flux après la pose de la chambre et suffisant de points pour avoir une pente claire.

Les mesures sont faites en continu pendant 72h sur 4 embases. Chaque embase est donc mesurée une fois par heure et l'ordre des mesures a été déterminé de façon aléatoire.

En plus des mesures de CO<sub>2</sub> un piézomètre et une station météo a été installé à proximité des embases. La station météo nous permet d'acquérir des données à haute fréquence (1 Hz, une mesure par seconde). Les paramètres suivis sont, la radiation solaire, la température de l'air à 5 cm, la température du sol à différentes profondeurs (5, 10, 20, 30 cm) et l'humidité.

Des profils de températures réalisés (avec quelle sonde ?) ponctuellement dans les embases permettent de recalculer chaque embase par rapport aux profils de la station.

Des mesures de NEE ont été testées, la première série sur la tourbière de La-Guette en utilisant le protocole de la variabilité spatiale (à préciser) LE problème de ce protocole est l'augmentation de la température à l'intérieur de la chambre. Cette augmentation peut engendrer dans les cas extrêmes une différence de température de plus de 10°C et entraîner l'arrêt de la photosynthèse dans la chambre. (Probablement par fermeture des stomates des végétaux.) Pour pallier à ce problème des "bloc de



froid" ont été utilisé afin de minimiser la différence de température entre l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre. Cette solution permet de diminuer la différence de température, mais il est difficile de contrôler précisément la température... Un autre souci lors de l'expérimentation a été la perturbation de la végétation. Répéter aussi régulièrement les mesures perturbe la végétation sur 4 à 5 cm de part et d'autre de l'embase.

### 3.3 synchronisation et profiles (article)

## Chapitre 4

# Effets de l'hydrologie sur les flux de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub>

## 4.1 Introduction

## 4.2 Manipulation du niveau de l'eau en mésoecosmes

### 4.2.1 Présentation de l'expérimentation

### 4.2.2 Résultats

## 4.3 Manipulation du niveau de l'eau (teneur en eau) in-situ

L'étude des effets de l'hydrologie sur les émissions de flux de GES a également pu être menée directement in-situ au sein du projet CARBIODIV (Restauration hydrologique de la tourbière de La Guette : effets sur l'évolution de la biodiversité et le stockage du carbone.) dont l'objectif est de restaurer le fonctionnement hydrologique de la tourbière de La Guette.

### **4.3.1 Présentation de l'expérimentation**

#### **Les travaux**

#### **Les stations scientifiques**

Deux stations ont été installées sur le site, dans deux sous-hydrosystèmes différents. Le premier en amont n'étant pas impacté par les travaux permet de contrôler les effets de site, et le second, en aval, enregistrera les effets de la restauration hydrologique.

### **4.3.2 Résultats**



## Chapitre 5

### Effets de la végétation sur les flux

## 5.1 Introduction

## 5.2 Mise en place d'un protocole

## 5.3 Impact des mesures de CO<sub>2</sub> sur la végétation

destruction...

## Chapitre 6

Caractérisation de la variabilité  
spatio-temporelle des flux sur la  
tourbière de La Guette (Bilan de C)



## 6.1 Introduction

## 6.2 Présentation du suivi

Étudier la variabilité spatiale et temporelle des flux de carbone nécessite de mettre en place une observation régulière, un suivi adapté. Qu'est ce qu'un suivi adapté ? Dans le cas des flux des gaz, on ne peut heureusement ou malheureusement pas suivre en permanence un site avec une fréquence importante (Qu'est ce qu'une fréquence importante). Il faut donc choisir qu'elle(s) échelle(s) l'on souhaite étudier. Lors de cette thèse nous avons choisi de mettre en place deux suivi différents et complémentaire.

Le premier est un suivi mensuel à l'échelle d'une tourbière. Plus précisément, les flux de  $\text{CO}_2$  ont été mesurés, à minima, une fois par mois sur 20 points distribués sur l'étendue du site (La Tourbière de La Guette, Neuvy sur Barangeon, Cher, France). À cause de contrainte technique et de leur importance relative

Expliquer ici ou ailleurs que les flux de  $\text{CH}_4$  ne représente a priori que 5 % du bilan de C sur une tourbière

les flux de  $\text{CH}_4$  ont été mesuré plus ponctuellement. Ce suivi permet d'étudier la variabilité spatiale des flux au sein du site et cela sur une échelle temporelle de l'ordre de l'année qui permet d'avoir une vision sur les variations saisonnières.

Ce protocole d'observation seul ne nous permet cependant pas de rendre compte d'autres échelles de variabilité qui semble d'importance non négligeable. Tout d'abord la variabilité des flux journalière : Le système étant très lié à la photosynthèse les flux sont très dépendant de l'ensoleillement et donc des alternances jour/nuit Ensuite qu'elle représentativité un site en particulier peut-il avoir par rapport à l'ensemble des sites existants ?

### **6.2.1 Suivi des GES**

### **6.2.2 Suivi des facteurs contrôlants**

Par ailleurs pour chaque embase le PAR a été mesuré, ainsi que la pression atmosphérique, la température de l'air et de la tourbe à différente profondeur (profils). Des mesures d'humidité ont également été effectuées, 5 par embase afin de prendre en compte l'hétérogénéité présente.

### **6.2.3 Suivi des flux liquides (DOC, POC)**

Mesures de DOC Principe Non Purgeable Organic Carbon Pyrolyse oxydative Ne mesure pas le CO<sub>2</sub> dissous L'acidification et le bullage permet d'expulser le CO<sub>2</sub> dissous Tout le carbone est ensuite pyrolysé le carbone est transformé en CO<sub>2</sub> et mesuré



## Chapitre 7

### Apport à la modélisation globale

## 7.1 Introduction

Enfin pour synthétiser l'ensemble de ces résultats, essayer d'en faire un tout cohérent et donc de comprendre notre système, nous l'avons modélisé en ayant pour objectif cet esprit de synthèse et de compréhension.

## 7.2 Le modèle de Walter

## Conclusions et perspectives

Synthèse générale et discussion

Variabilité temporelle

Variabilité spatiale

# Bibliographie

- Beer, C., Reichstein, M., Tomelleri, E., Ciais, P., Jung, M., Carvalhais, N., Rödenbeck, C., Arain, M. A., Baldocchi, D., Bonan, G. B., Bondeau, A., Cescatti, A., Lasslop, G., Lindroth, A., Lomas, M., Luyssaert, S., Margolis, H., Oleson, K. W., Rouspard, O., Veenendaal, E., Viovy, N., Williams, C., Woodward, F. I., and Papale, D. (2010). Terrestrial Gross Carbon Dioxide Uptake : Global Distribution and Covariation with Climate. *Science*, 329(5993) :834–838. PMID : 20603496.
- Bond-Lamberty, B. and Thomson, A. (2010). Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature*, 464(7288) :579–582.
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., and others (2014). Carbon and other biogeochemical cycles. In *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 465–570. Cambridge University Press.
- Eswaran, H., Van Den Berg, E., and Reich, P. (1993). Organic carbon in soils of the world. *Soil science society of America journal*, 57(1) :192–194.
- Francez, A.-J. (2000). La dynamique du carbone dans les tourbières à Sphagnum, de la sphaine à l’effet de serre. *L’Année Biologique*, 39 :205–270.



- Gorham, E. (1991). Northern Peatlands : Role in the Carbon Cycle and Probable Responses to Climatic Warming. *Ecological Applications*, 1(2) :182–195.
- Harris, D. C. (2010). Charles David Keeling and the Story of Atmospheric CO<sub>2</sub> Measurements†. *Analytical Chemistry*, 82(19) :7865–7870.
- Post, W. M., Emanuel, W. R., Zinke, P. J., and Stangenberger, A. G. (1982). Soil carbon pools and world life zones.
- Robert, M. and Saugier, B. (2003). Contribution des écosystèmes continentaux à la séquestration du carbone. *Comptes Rendus Geoscience*, 335(6–7) :577–595.
- Siegenthaler, U. and Oeschger, H. (1987). Biospheric CO<sub>2</sub> emissions during the past 200 years reconstructed by deconvolution of ice core data. *Tellus B*, 39B(1–2) :140–154.
- Turunen, J., Tomppo, E., Tolonen, K., and Reinikainen, A. (2002). Estimating carbon accumulation rates of undrained mires in Finland—application to boreal and subarctic regions. *The Holocene*, 12(1) :69–80.

# Index

services écologiques, [3](#)

[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 Domitiani gener, paulo ante agens palatii Caesaris curam, ad Mesopotamiam missus a socero per militares numeros immodice scrutabatur, an quaedam altiora meditantis iam Galli secreta susceperint 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 Domitiani gener, paulo ante agens palatii Caesaris curam, ad Mesopotamiam missus a socero per militares numeros immodice scrutabatur, an quaedam altiora meditantis iam Galli secreta susceperint scripta, qui conpertis Antiochiae gestis per minorem Armeniam lapsus Constantinopolim petit.

Mots clés : mot 1, mot 2, ...



# Todo list

force ? comparaison ? explication effet de serre ? . . . . .	2
Combien ? cf fact sheet IPCC . . . . .	2
schéma ? . . . . .	3
Chiffres (surfaces...) . . . . .	3
Pas d'entrée "journal" pour Post1982 . . . . .	3
volet... t'as pas mieux ? Branche ? -_- " . . . . .	5
Descriptif et comparaison des méthodes permettant de mesurer les flux de gaz . . . . .	14
Lister les améliorations à faire ou non . . . . .	18
combien ? qu'est-ce qu'une haute fréquence ? . . . . .	20
liste des sites ? . . . . .	20
Proportion des tourbières qui ont été exploitées ? qui sont encore à l'état naturel ? à mettre en regard avec la représentativité d'une tourbière comme La Guette. Est-elle repré- sentative ? La majorité des tourbières sont perturbées... Sont-elles envahies par des végétaux vasculaires ? . . . . .	20
Expliquer ici ou ailleurs que les flux de CH <sub>4</sub> ne représentent a priori que 5 % du bilan de C sur une tourbière . . . . .	30