

# 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 Définitions . . . . .	8
1.1.2 Caractéristiques spécifiques . . . . .	9
1.2 Tourbières et changements globaux . . . . .	10
1.2.1 Homme . . . . .	10
1.2.2 Climat . . . . .	10
1.3 Les tourbières et le cycle du carbone . . . . .	11
1.3.1 Le cycle global . . . . .	11
1.3.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières . . . . .	11
1.3.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux . . . . .	13
1.3.4 Bilans de carbone . . . . .	16
<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 CO2</b>	<b>19</b>
3.1 Introduction . . . . .	20
3.2 Présentation de l'expérimentation . . . . .	21
3.3 synchronisation et profiles (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
---	--	---





# 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 ?

## 1.1.1 Définitions

Les tourbières font partie d'un ensemble d'écosystèmes que l'on appelle les zones humides. Ces zones humides se définissent comme n'étant ni des écosystèmes terrestres au sens strict ni des écosystèmes aquatiques. Elles sont un mélange des deux. Elles ont pour caractéristique d'avoir un niveau de nappe proche de la surface du sol, quand ce n'est pas au dessus. Par conséquent les zones humides sont des milieux peu aérés dans lesquels l'accès à l'oxygène est une contrainte importante. Ces caractéristiques entraînent également le développement d'une végétation spécifique, adaptée aux milieux inondés. Cette dualité rend l'estimation de leur surface délicate, néanmoins on estime à **XX** leur étendu (**Réf needed**). Les zones humides regroupent des écosystèmes très variés parmi lesquels les marais, les mangroves, les plaines d'inondations et les tourbières.

Les tourbières représentent 50 à 70 % des zones humides ([Francez, 2000](#); [Joosten and Clarke, 2002](#)). La classification des tourbières n'est pas simple, de nombreux critères existent selon leur mode de formation, leur source d'eau, leur physico-chimie. La terminologie utilisée concernant ces écosystèmes n'a pas toujours été cohérente, de nombreux termes ont été utilisés parfois en contradiction les uns avec les autres ([Joosten and Clarke, 2002](#)), il est donc nécessaire de définir les termes utilisés par la suite. Une définition régulièrement utilisée pour caractériser ce qu'est une tourbière est : "Tout écosystème possédant au moins 30 cm de tourbe". Cette définition correspond au *peatland* anglo-saxon. Une autre définition existe : "écosystème dans lequel un

processus de tourbification est actif" qui correspond au *mire* anglo-saxon qui peut être traduit en français par tourbière active. Les deux concepts se chevauchent mais ne sont pas complètement similaires : une tourbière drainée peut avoir plus de 30 cm de tourbe et n'être plus active. À l'inverse il peut exister des zones où l'épaisseur de tourbe est inférieure à 30 cm malgré un processus de tourbification actif. Dans les deux cas ces définitions en appellent d'autres : Qu'est ce que la tourbe et 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.

Il existe différents types de tourbières, notamment on distingue des tourbières tempérées/boréales des tourbières tropicales dont le fonctionnement diffère. Dans la suite de ce document seule les tourbières tempérées/boréales seront décrites et étudiées.

### 1.1.2 Caractéristiques spécifiques

#### Localisation/surface

L'estimation des surfaces de tourbe n'est pas aisée. Les tourbières s'étendent sur plus de 4 000 000 km<sup>2</sup> (Lappalainen). Elles sont majoritairement situées dans les zones boréale et sub-boréale.

#### Biodiversité

Les tourbières sont le siège d'une biodiversité importante et spécifique. Ainsi les Sphaignes, qui sont des bryophytes, (des mousses) sont caractéristiques des écosystèmes tourbeux. Ce sont des espèces dites ingénieuses, capables de modifier l'environnement dans lequel elles vivent afin de l'adapter à leur besoin. Les sphaignes sont ainsi capables d'abaisser le pH, de capter des nutriments et de les séquestrer et ce même quand elles n'en ont pas besoin afin d'empêcher d'autres espèces notamment vasculaires d'en profiter. Plus précisément, le fait que les sphaignes capturent les nutriments via leur capitulum leur permet de les intercepter avant qu'ils ne soient captés par d'éventuelles racines positionnées plus bas. Les sphaignes, comme de nombreuses mousses ont des

litières relativement récalcitrante<sup>1</sup>.

## **Puits de carbone**

**La fonction puit de carbone.** Le niveau élevé de la nappe d'eau, par exemple, rend l'accès à l'oxygène est plus difficile diminuant d'autant l'activité aérobie, dont la respiration des micro-organismes et des plantes. Cela se traduit par une dégradation relativement faible des matières organiques. En comparaison avec un sol forestier, l'accumulation de matières organiques n'est donc pas liée à une production primaire plus forte, mais bien à une dégradation des matières produites plus faible.

Ces perturbations peuvent induire des modifications de fonctionnement, notamment l'envahissement de ces écosystèmes par une végétation vasculaire, et changer cette fonction puit

# 1.2 Tourbières et changements globaux

## **1.2.1 Homme**

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.

## **1.2.2 Climat**

L'impact anthropique direct n'est pas la seule perturbation auxquelles sont soumises les tourbières. D'après les modèles de prédictions du GIEC, les tourbières, comme de nombreux autres écosystèmes, vont subir un changement climatique important dans les années à venir. Toujours d'après le GIEC, les changements les plus rapides que ce soit en terme de précipitations ou de température sont à attendre dans les zones

---

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

boréales dans lesquelles se situe la majorité des tourbières. De ce constat découle un certain nombre de questions concernant ces écosystèmes et notamment le devenir de leur fonction puits de carbone.

Toutes ces perturbations posent notamment la question de la pérennité de la fonction puit de carbone de ces écosystèmes.

## 1.3 Les tourbières et le cycle du carbone

### 1.3.1 Le cycle global

Au cours des temps les tourbières ont donc accumulé du carbone... stock 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

Les tourbières ont donc accumulées du carbone au cours des 10 derniers milliers d'années. Pour ce faire il a donc fallu que davantage de carbone soit capturé que de carbone libéré par l'écosystème.

### 1.3.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières

#### Les flux entrants

Le carbone est principalement présent dans l'atmosphère sous forme de dioxyde de 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 moins présent dans l'atmosphère (CHIFFRES!). Cependant son "pouvoir de réchauffement" est bien plus important (effet radiatif  $\text{CO}_2 \times 100$ ) (CHIFFRES!) (D'abord la

vapeur d'eau, ensuite le  $\text{CO}_2$  et enfin le  $\text{CH}_4$ ) Il est usuellement convenu (???? ref) que dans une tourbière le méthane représente environ 5 % du bilan de C. **Devenir du méthane atm** Le transfert du  $\text{CO}_2$  atmosphérique vers la biosphère (de l'atmosphère à la tourbe) est principalement (**Réf needed**) liée à la photosynthèse. La photosynthèse est la réaction photochimique permettant l'assimilation du  $\text{CO}_2$  par les végétaux chlorophylliens. **dans le but de ?**.

### Détails ?

Si la photosynthèse est un processus majeur d'assimilation du  $\text{CO}_2$ , il existe d'autres voies métaboliques permettant la capture du  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère. Ainsi les micro-organismes chemolithotrophes (**expliquer**) sont capables d'assimiler le  $\text{CO}_2$  en utilisant l'énergie issue de l'oxydation de composés inorganiques.

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

### Les flux sortants

Dans les tourbières le  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  est l'oxydation du  $\text{CH}_4$  lors de sa migration des zones anoxiques aux zones oxiques de la colonne de tourbe. Enfin dans les zones anaérobies, le  $\text{CO}_2$  peut être produit par fermentation (respiration anaérobie). La production de  $\text{CO}_2$  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  $500 \text{ gC m}^{-2}$  (Francez, 2000).

La strate muscinale pouvant jouer/participer/produire jusqu'à 80 % de la production primaire (Francez, 2000). Cette production primaire n'est pas particulièrement 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  $30 \text{ gC m}^{-2}$ . Le taux d'accumulation varie en fonction des espèces végétales présentes ((**Réf needed**)), le niveau d'eau ((**Réf needed**)), ... (??)

**storage ?**

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

La vitesse de stockage au cours du temps ?

L'accumulation de matières organiques et donc de carbone dans les tourbières est donc fonction de la prépondérance relative de ces flux entre l'écosystème et l'atmosphère.

### 1.3.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux

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

#### Facteurs majeurs

L'augmentation de la vitesse de réaction de nombreuses réactions biochimiques avec la température est connue depuis longtemps. Elle a été mise en évidence par un chimiste suédois en 1889 : Svante August Arrhenius sur la base de travaux réalisés par un autre chimiste, néerlandais, Jacobus Henricus Van't Hoff. Depuis, de nombreuses mesures

de terrain confirment cette relation (**Réf needed**) La photosynthèse et l'ensemble des respirations sont donc contrôlées, au moins en partie, par la température. 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 "libre" ? Et la teneur en eau du sol qui est une estimation de la quantité d'eau présente dans le sol.

### L'effet du niveau de la nappe

Le niveau de la nappe est important car il sépare la colonne de tourbe en une zone oxique, 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 oxique, 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 oxique. 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 physique 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 recouverte en totalité. 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 dégradable que celle des espèces vasculaires. Ensuite parce qu'elle favorisent dans leur environnement local, les conditions favorable 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'espèce 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?)?

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

température et ER Concernant la, ou plutôt les respirations de l'écosystème, l'influence de la température sera différente selon les sources considérés. 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.

Updegraf2001

Montre, dans une expérimentation à base de mésocosme, que la respiration de l'écosystème est contrôlée presque exclusivement par la température du sol.

Cai2010

Mesures in-situ, sécheresse court terme, plus chaud et plus sec (1an). Sensibilité à la température (Q<sub>10</sub>) identique l'année humide et l'année sèche. Dans les conditions plus chaude et plus sèche Cai observe une augmentation de la Respiration (plus forte que celle de la photosynthèse)

Stratck2006

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



Ballantyne2014

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

### **Facteurs contrôlant la production primaire brute**

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.

### **Facteurs contrôlant les flux de méthane**

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

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

### **1.3.4 Bilans de carbone**

Les flux gazeux entrants et sortant des écosystèmes tourbeux ont été précisé précédemment. Il s'agit bien sur des respirations ( $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ ) et de la photosynthèse. Cependant d'autres flux de C peuvent jouer sur le bilan de carbone : Les flux dissous, le carbone organique dissous et de carbone inorganique dissous. Les flux de carbone particulaire, et plus anecdotiquement les flux liées au composés organo-volatils (COV),

au monoxyde de carbone.

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

**passé**

**présent**

# 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.
- 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, u. (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 Sci. Soc. Am. J.*, 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. *Ecol. Appl.*, 1(2) :182–195.
- Harris, D. C. (2010). Charles david keeling and the story of atmospheric CO<sub>2</sub> measurements<sup>†</sup>. *Anal. Chem.*, 82(19) :7865–7870.

- Joosten, H. and Clarke, D. (2002). *Wise use of mires and peatlands*. International mire conservation group.
- 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

## S

services écologiques.....[3](#)



# 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
Lister les amélioration à faire ou non . . . . .	18
combien ? qu'est ce qu'une haute fréquence ? . . . . .	20
liste des sites ? . . . . .	20
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 ? . . . . .	20
Expliquer ici ou ailleurs que les flux de CH4 ne représente a priori que 5 % du bilan de C sur une tourbière . . . . .	30