

# 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 Les tourbières et le cycle du carbone . . . . .	8
1.1.1 Zones humides et tourbières : définitions et terminologies . . . .	8
1.1.2 Biodiversité dans les tourbières . . . . .	10
1.1.3 La formation des tourbières . . . . .	10
1.1.4 Les tourbières puits de carbone . . . . .	11
1.1.5 Les tourbières et les changements globaux . . . . .	12
1.2 Flux de gaz à effet de serre et facteurs contrôlants . . . . .	14
1.2.1 Les flux entre l’atmosphère et les tourbières . . . . .	14
1.2.2 Les facteurs majeurs contrôlant les flux . . . . .	16
1.2.3 Bilans de carbone . . . . .	19
<b>2 Sites d’études et méthodologies employées</b>	<b>19</b>
2.1 Présentation des sites d’études . . . . .	20
2.1.1 La Guette . . . . .	20
2.1.2 Frasne . . . . .	20
2.1.3 Landemarais . . . . .	20
2.1.4 Bernadouze . . . . .	20
2.2 Mesures de flux . . . . .	21
2.3 Facteurs contrôlants et suivi des flux . . . . .	22
<b>3 Bilan de C de la tourbière de La Guette</b>	<b>23</b>
3.1 Introduction . . . . .	24
3.2 Matériels et méthodes . . . . .	24
3.3 Les flux observés . . . . .	24
3.4 Le bilan de carbone . . . . .	24
3.5 Évaluation du bilan . . . . .	24

<b>4</b>	<b>Effets de l'hydrologie sur les flux de CO<sub>2</sub> et CH<sub>4</sub></b>	<b>25</b>
4.1	Introduction . . . . .	26
4.2	Manipulation du niveau de l'eau en mésocosmes . . . . .	26
4.2.1	Présentation de l'expérimentation . . . . .	26
4.2.2	Résultats . . . . .	26
4.3	Manipulation du niveau de l'eau (teneur en eau) in-situ . . . . .	26
4.3.1	Présentation de l'expérimentation . . . . .	26
4.3.2	Résultats . . . . .	27
<b>5</b>	<b>Variation journalière de la respiration de l'écosystème</b>	<b>29</b>
5.1	Introduction . . . . .	30
5.2	Présentation de l'expérimentation . . . . .	31
5.3	synchronisation et profiles (article) . . . . .	32
	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>33</b>
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>36</b>
	<b>Index</b>	<b>37</b>

# Liste des figures

1.1	Global distribution of peatlands . . . . .	9
1.2	TODO . . . . .	13



# Liste des tableaux

1.1	Estimations des stocks de C pour différents environnements . . . . .	11
1.2	Surface de tourbe utilisée selon les usages considérés (tourbières non-tropicale). Modifié d'après joosten1999 in joosten2002 . . . . .	12



# 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 concentrations en CO<sub>2</sub> étaient inférieures 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 estimées à 280 ppm (Siegenthaler and Oeschger, 1987).

Aujourd'hui, que ce soit pour le comprendre, le caractériser ou bien le prédire, de nombreux

Combien ? cf fact sheet IPCC

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 liées 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 importants, 98 et 123 PgC/yr pour le flux de respiration globale (+ les feux) et la photosynthèse respectivement (Bond-Lamberty and Thomson, 2010; Beer et al., 2010). Pour comparaison les flux liés à la production 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  
31 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 du  
42 carbone présent

43 Chiffres (surfaces...)

44 dans l'ensemble des terres émergées tandis qu'elle ne constituent que 3 % des sur-  
45 faces continentales (**Réf needed**). Ce ratio relativement important, correspond à un  
46 stock d'environ 455 Gt (Gorham, 1991; Turunen et al., 2002) est à mettre perspective  
47 avec les autres stock du cycle du carbone. On observe que ce stock est du même ordre  
48 de grandeur que celui de la végétation

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

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

54 Pas d'entrée "journal" pour Post1982

55 Transition modèles

56 En octobre 2013 le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat  
57 (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 absents 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 acquises, 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

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

principaux : Dans un premier temps, l'**observation** régulière des flux de gaz ( $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$ ) ainsi que d'un certain nombre de paramètres environnementaux servant à la caractérisation des variabilités spatiales et temporelles, ainsi qu'à l'étude des facteurs contrôlant. Certains facteurs contrôlant qui sont, dans un second temps, étudiés plus spécifiquement à travers un volet **expérimentation**. Ce dernier doit permettre une meilleure compréhension de processus clés avec notamment l'impact de l'hydrologie. Enfin un troisième volet axé sur la **modélisation**, avec le développement d'un modèle le plus mécaniste possible.

Cette thèse est structurée de la façon suivante : Le chapitre 1 est une synthèse bibliographique, un état de l'art des connaissances liées au sujet. Les chapitres 2 et 3 rassemblent les travaux du volet observation, ils concernent respectivement le suivi XX et le suivi YY Les chapitres 4 et 5 développent la partie expérimentale à travers

---

85 l'impact d'un assèchement et celui d'un rehaussement du niveau de l'eau. Le chapitre 6  
86 concerne plus spécifiquement la modélisation, même si ce volet interviendra par ailleurs  
87 de façon transverse dans les autres chapitres. Enfin une conclusions et des perspectives  
88 seront exposées.



# 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 Les tourbières et le cycle du carbone

## 1.1.1 Zones humides et tourbières : définitions et terminologies

Les tourbières font partie d'un ensemble d'écosystèmes plus large que l'on appelle les zones humides. Les zones humides ne sont ni des écosystèmes terrestres au sens strict, ni des écosystèmes aquatiques. Elles sont à la frontière, un mix des deux. Les zones humides sont caractérisées par un niveau de nappe élevé, proche de la surface du sol, voire au dessus. L'omniprésence de l'eau entraîne une autre caractéristique : la faible aération de ces zones contraint plus ou moins l'accès à l'oxygène. Il résulte des deux points précédents le développement dans ces milieux d'une végétation spécifique qui s'est adaptée aux milieux fortement humides ou inondés. 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 ([Joosten and Clarke, 2002](#)). Elles sont généralement définies par rapport à la tourbe, qu'il convient donc de définir au préalable. La tourbe est un sol organique (histosol) formé suite à l'accumulation de litières végétales partiellement décomposées dans un milieu saturé en eau. Ce processus de formation est appelé la tourbification. Les propriétés physiques de la tourbe dépendent du type de végétation, mais également de sa profondeur dans le profil (pédogenèse, diagenèse).

La définition des tourbières est variable selon les régions (**(Réf needed)**, exple). Deux définitions sont régulièrement utilisées. La première définit comme tourbières les écosystèmes possédant au moins 30 cm de tourbe (parfois 40). Cette définition corres-

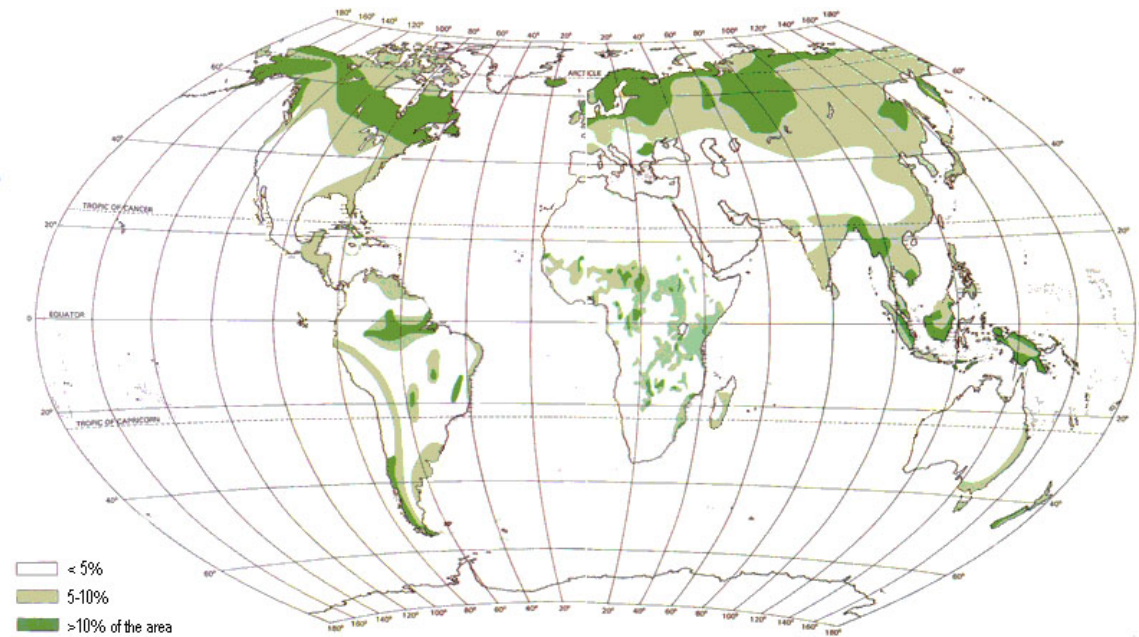


FIGURE 1.1 – Global distribution of peatlands

pond au *peatland* anglo-saxon. La seconde définition considère comme tourbières les écosystèmes dans lesquels un processus de tourbification est actif. Cette définition correspond au *mire* anglo-saxon et peut être traduite en français par le terme de 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 ne plus être 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.

Ces variations de définitions ajoutées aux limites floues qui peuvent exister entre certains écosystèmes tourbeux et non-tourbeux rendent la cartographie de ces écosystèmes délicate. Les estimations généralement citées évaluent la surface occupée par les tourbières à environ 4 000 000 km<sup>2</sup> ([Lappalainen, 1996](#)). Cette surface correspond à 3 % de l'ensemble des terres émergées du globe. Plus de 85 % d'entre elles sont situées dans l'hémisphère nord, majoritairement dans les zones boréales et sub-boréales ([Society, 2008](#)).

Différentes classifications sont utilisées pour classer ces écosystèmes. De nombreux critères existent pour classer les tourbières 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 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 Biodiversité dans les tourbières

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, capable de modifier l'environnement dans lequel elles vivent afin de l'adapter à leurs besoins. Les sphaignes sont ainsi capable 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 vasculaire d'en profiter. Plus précisément, le fait que les sphaignes captent 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>.

### 1.1.3 La formation des tourbières

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

---

1. 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	455	( <a href="#">Gorham, 1991</a> ; <a href="#">Turunen et al., 2002</a> )
Végétation	450 – 650	( <a href="#">Robert and Saugier, 2003</a> )
Sols	1500 – 2000	( <a href="#">Robert and Saugier, 2003</a> ; <a href="#">Post et al., 1982</a> ; <a href="#">Eswaran et al., 1993</a> )
CO <sub>2</sub> atmosphérique	750 – 800	( <a href="#">Robert and Saugier, 2003</a> )
Permafrost	1700	

### 1.1.4 Les tourbières puits de carbone

Par définition les tourbières stockent ou ont stocké du carbone. C’est cette fonction de puits de carbone qui rend l’importance de ces écosystèmes non négligeable malgré la faible surface qu’ils représentent. Les estimations du stock de carbone présent dans les tourbières tempérées/boréales sont comprises entre 270 et 455 Gt C ([Gorham, 1991](#); [Turunen et al., 2002](#)). Les différences entre les estimations sont liées aux incertitudes de cartographie citées précédemment auxquelles s’ajoutent des incertitudes concernant l’épaisseur et la densité moyenne de la tourbe. Le carbone stocké dans les tourbières représente 10 à 25 % du carbone présent dans les sols et entre 30 et 60 % du stock de carbone atmosphérique.

Ce stock est un héritage datant des 10 derniers milliers d’années, l’holocène, période pendant laquelle se sont formés la majorité des tourbières. Le fonctionnement naturel de ces écosystèmes permet le stockage du C. C’est un des services écologiques que rendent les tourbières et que l’on appelle la fonction puits de carbone. Cette fonction est liée au niveau élevé de la nappe d’eau, qui 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. Elle est également liée à la production de litière récalcitrante par les bryophytes.

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 puits.

### 1.1.5 Les tourbières et les changements globaux

On définit les changements globaux comme l’ensemble des modifications environnementales plus ou moins rapide, ayant lieu à l’échelle mondiale, que leur origine soit anthropique, climatique ou autre.

#### Homme

Ces écosystèmes ont été et sont encore perturbés par différentes activités humaines, notamment l’agriculture, la sylviculture, qui représentent à elles seules 80 % des surfaces perdues à cause d’activités anthropiques (Tableau 1.2).

Tableau 1.2 – Surface de tourbe utilisée selon les usages considérés (tourbières non-tropicale). Modifié d’après Joosten 1999 in Joosten 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, ...)	5 000	1
Total	490 000	100

Suite à leur utilisation, la surface des tourbières est divisée par deux en France entre 1945 et 1998, passant de 1200 km<sup>2</sup> à 600 km<sup>2</sup> (Manneville, 1999)

#### 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

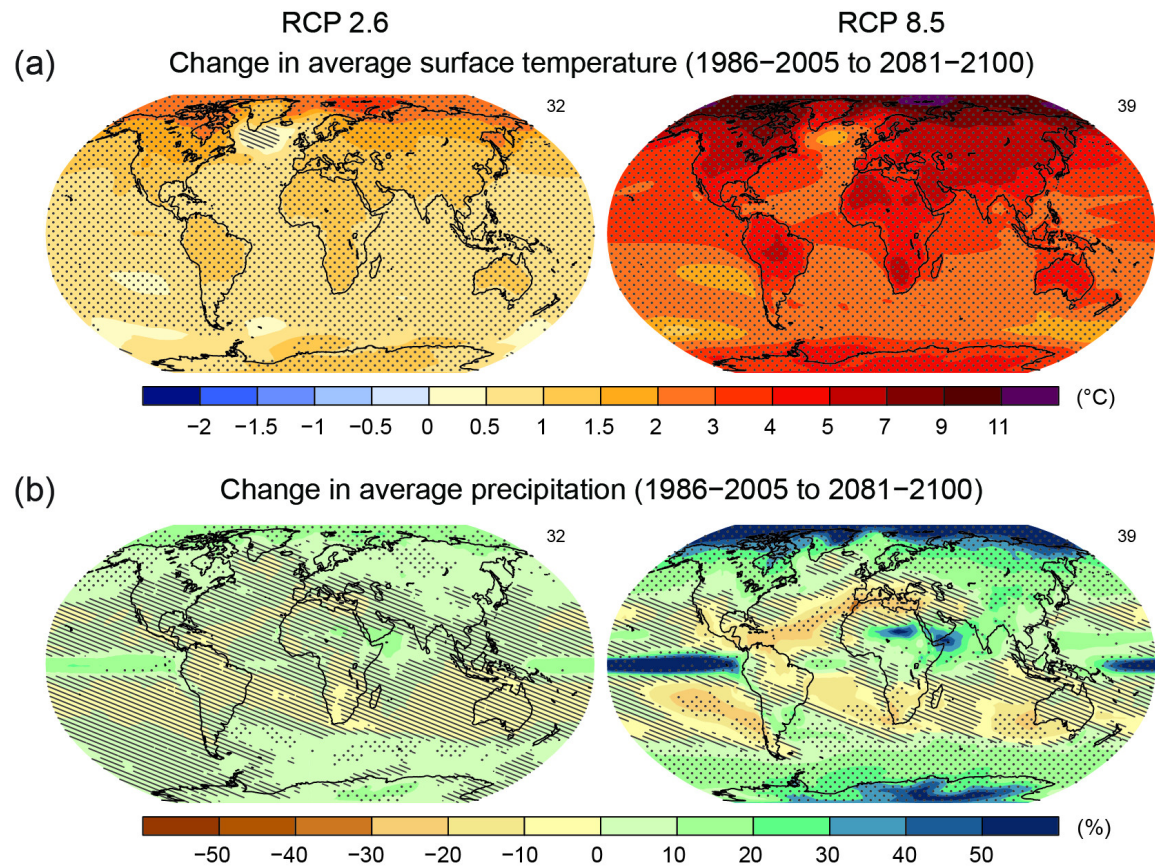


FIGURE 1.2 – TODO

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.

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

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

#### Les flux gazeux 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 ne 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 gazeux sortants

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 gC 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 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 gC m<sup>-2</sup>. 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.

### 1.2.2 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.

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 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 seuls les processus de respiration anaérobie peuvent avoir lieu. Par contre 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'aerenchyme 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'était 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 ingénieures. 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?) ?

D'autres facteurs à évoquer ?

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

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 (Q10) 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**

Si la diversité des réactions est moindre pour la photosynthèse, sa réponse aux variables environnementales à l'échelle de l'écosystème n'en est pas moins difficile à prédire. Comme pour la respiration, l'augmentation de la température augmente la vitesse de réaction (Cai2010). **(Réf needed)** L'effet d'une variation du niveau de la nappe est cependant moins évidente. La baisse du niveau de la nappe peut à la fois induire une augmentation de la PBB, notamment quand elle favorise la végétation vasculaire (Ballantyne2014). Mais elle peut également la diminuer, lorsqu'elle induit un stress hydrique important (Strack & Zuback 2013, Peichl 2014, Alm1999, Griffis2000, Weltzin2000)

### **Facteurs contrôlant l'ENE**

Une baisse du niveau de la nappe induit souvent une baisse de l'ENE. Cependant certain attribue cette baisse à une augmentation de la Respiration (, Aurela2013, Ballantyne2014, Alm1999, Ise2008, Oechel1993) quand d'autres l'attribue à une di-



minution de la photosynthèse Sonnentag2010, Peicl2014 Enfin certain voient un effet à la fois de l'augmentation de la respiration et de la diminution de la photosynthèse (StrackZuback2013)

À noter un article intéressant (Lund2012) dans lequel, dans un même site une baisse du niveau de la nappe 2 année différente entrainera une baisse de l'ENE dans les 2 cas, mais dans l'un des cas cette baisse est contrôlée par une augmentation de la respiration et dans l'autre cas cette baisse est contrôlée par une diminution de la photosynthèse.

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

### **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.

### **1.2.3 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.

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

- ENE : Échange Net de l'Écosystème
- PPB : Production Primaire Brute
- Re : Respiration de l'Écosystème
- $F_{COP}$  : Flux de Carbone Organique Dissous
- $F_{COP}$  : Flux de Carbone Organique Particulaire
- $F_{CH_4}$  : Flux de Méthane
- $F_{CID}$  : Flux de Carbone Inorganique Dissous
- $F_{COV}$  : Flux de Composés Organique Volatils
- $F_{CO}$  : Flux de 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†. *Anal. Chem.*, 82(19) :7865–7870.
- Joosten, H. and Clarke, D. (2002). *Wise use of mires and peatlands*. International mire conservation group.
- Lappalainen, E. (1996). *Global peat resources*, volume 4. International Peat Society Jyskä.
- Manneville, O. (1999). *Le monde des tourbières et des marais : France, Suisse, Belgique et Luxembourg*. Delachaux & Niestle.
- 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.
- Society, I. P. (2008). *Peatlands and climate change*. IPS, International Peat Society.

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

## A

atterrissement ..... 10

## C

carbone

    stock ..... 11

changements globaux ..... 2, 12

## E

échange net de l'écosystème

    contrôle ..... 19

## P

paludification ..... 10

photosynthèse ..... 14

production primaire brute

    contrôle ..... 18

## R

respiration ..... 15

    de l'écosystème ..... 15

        contrôle ..... 18

    du sol ..... 15

## S

services écologiques ..... 3

## T

tourbières ..... 8

    distribution ..... 9

    formation ..... 10

    surface ..... 9

    utilisation ..... 12

tourbification ..... 8

## Z

zone humide ..... 8