

Table des matières

Table des matières	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	v
Avant-propos	vii
Remerciements	ix
Introduction	1
1 Synthèse Bibliographique	7
1.1 Qu'est ce qu'une tourbière ?	8
1.1.1 Définitions	8
1.1.2 Caractéristiques spécifiques	9
1.2 Les tourbières et les changements globaux	10
1.2.1 Climat	10
1.2.2 Homme	10
1.3 Les tourbières et le cycle du carbone	12
1.3.1 Le cycle global	12
1.3.2 Les flux entre l'atmosphère et les tourbières	12
1.3.3 Les facteurs majeurs contrôlant les flux	14
1.3.4 Bilans de carbone	17
2 Sites d'études et méthodologies employées	15
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

3	Effets de la températures sur les variations journalière des flux de CO2	19
3.1	Introduction	20
3.2	Présentation de l'expérimentation	21
3.3	synchronisation et profiles (article)	22
4	Effets de l'hydrologie sur les flux de CO2 et CH4	23
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
5	Effets de la végétation sur les flux	27
5.1	Introduction	28
5.2	Mise en place d'un protocole	28
5.3	Impact des mesures de CO2 sur la végétation	28
6	Caractérisation de la variabilité spatio-temporelle des flux sur la tourbière de La Guette (Bilan de C)	29
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
7	Apport à la modélisation globale	33
7.1	Introduction	34
7.2	Le modèle de Walter	34
	Conclusions et perspectives	35
	Références bibliographiques	38
	Index	39

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

Les tourbières s'étendent sur plus de 4 000 000 km² (Lappalainen).

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. Se sont des espèces dites ingénieuses, capable de modifier l'environnement dans lequel elles vivent afin de l'adapter à leur besoin. Les sphaignes sont ainsi capable d'abaisser le pH, de capter des nutriments et de le 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 récalcitrante¹.

Puits de carbone

1.2 Tourbières et changements globaux

1.2.1 Climat

1.2.2 Homme

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

Ces écosystèmes 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. Les sphaignes ont quelques particularités qu'il convient de mentionner. Ce sont des espèces ingénieuses, capables de modifier le milieu dans lequel elles vivent afin de l'adapter à leur besoin. Plus spécifiquement elles sont capables d'acidifier leur milieu, de capter les nutriments provenant de l'eau de pluie et de les séquestrer afin de défavoriser d'autres végétaux.

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

Les tourbières ont également des propriétés spécifiques. **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.

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

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, et changer cette fonction puit

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 Les tourbières et le cycle du carbone

1.3.1 Le cycle global

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 (CO_2) et de méthane (CH_4). Comparé au CO_2 , le 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 CO_2 et enfin le 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 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 CO_2 par les végétaux chlorophylliens. **dans le but de ?**.

Détails ?

Si la photosynthèse est un processus majeur d'assimilation du CO_2 , il existe d'autres voies métaboliques permettant la capture du CO_2 de l'atmosphère. Ainsi les micro-organismes chemolithotrophes (**expliquer**) sont capables d'assimiler le CO_2 en utilisant l'énergie issue de l'oxydation de composés inorganiques.

Les voies métaboliques permettant l'assimilation du 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 sortants

Dans les tourbières le CO₂ 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 CO₂ est l'oxydation du CH₄ lors de sa migration des zones anoxiques aux zones oxiques de la colonne de tourbe. Enfin dans les zones anaérobie, le CO₂ peut être produit par fermentation (respiration anaérobie). La production de CO₂ 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⁻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 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 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 cité figure la température, le niveau de la nappe et la végétation. Plus rarement, l'épaisseur du substrat est également invoqué.

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 chimique la température influe sur les vitesses de réactions. Plus la température augmente plus la vitesse de réaction augmente. La température à 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 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.

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

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 "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 CO₂ 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 CO₂, 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 CO₂ lors de son passage dans cette zone oxique. 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.

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 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 CO₂ 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 ?) ?

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 (CO_2 et 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

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

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 CO₂ measurements†. *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 CO₂ 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
Descriptif et comparaison des méthodes permettant de mesurer les flux de gaz .	17
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 natu- rel ? à mettre en regard avec la représentativité d'une tourbière comme La Guette. Est-elle représentative ? La majorité des tourbières sont pertur- bées... Sont-elles envahies par des végétaux vasculaires ?	20
Expliquer ici ou ailleurs que les flux de CH ₄ ne représente a priori que 5 % du bilan de C sur une tourbière	30