

L'écho des tourbières



Août 2015
- N°21

Tourbières & changements climatiques

Édité par :





Sommaire

Pages

- 3 **Préface - Les zones humides : alliées naturelles du changement climatique ?**
- 4 **Le mot du Pôle-relais tourbières**
- 6 **Que peuvent nous apprendre les tourbières sur le climat ?**
- 9 **Les tourbières et le climat, une vieille histoire ;
Le rôle du climat dans l'apparition et le développement des tourbières**
- 10 **Le changement climatique, point sur les dernières prévisions du GIEC**
- 12 **Les interactions entre tourbières et le climat : comment ça marche ?**
- 12 **L'étude des effets du réchauffement climatique sur la fonction puits de
carbone des tourbières, quels dispositifs ?**
- 13 **Mettre les tourbières sous serres pour étudier l'impact du réchauffement
climatique : le projet PEATWARM et la station de recherche de la RNR des
tourbières de Frasne-Bouverans**
- 14 **Les recherches sur l'effet du réchauffement climatique à l'Ecole Polytechnique
Fédérale de Lausanne (EPFL)**
- 14 **Reconstituer les tourbières pour mieux les étudier : l'expérience du jardin
botanique de Neuchâtel**
- 16 **La restauration fonctionnelle des tourbières : un enjeu pour la résilience
des écosystèmes tourbeux face aux changements climatiques**
- 19 **CarBioDiv : un projet de réhabilitation écologique innovant**
- 20 **Un site d'intérêt majeur malmené**
- 20 **Des opérations innovantes de génie écologique au secours de la tourbière**
- 21 **Des premiers résultats encourageants**
- 23 **Le programme Life tourbières du Jura - Réhabilitation fonctionnelle des
tourbières du massif jurassien franc-comtois**
- 23 **L'état des ressources disponibles sur le sujet au Pôle-relais tourbières**

Préface - Les zones humides : alliées naturelles du changement climatique ?



Nos bassins Rhône-Méditerranée et Corse recèlent une grande richesse de zones humides. Pourtant deux tiers d'entre elles ont disparu au XX^e siècle alors même qu'elles jouent un rôle majeur dans notre capacité d'adaptation au changement climatique. Elles servent d'éponge naturelle pour retenir les crues, elles filtrent, stockent et restituent l'eau à la rivière en période de sécheresse et améliorent sa qualité. Restaurons de toute urgence les zones humides dans les secteurs clefs et préservons celles qui ont échappé à l'artificialisation ou à l'assèchement !

Plus particulièrement, les tourbières, ces milieux intimement mêlés aux rivières et aux nappes d'eau souterraines, sont riches en matière organique (la tourbe). Elles se plaisent à la source ou aux abords calmes des cours d'eau, dans les plateaux ou en zone de montagne. Davantage encore que les forêts, les tourbières constituent des puits de carbone très efficaces pour la planète. Elles emprisonnent dans leur sol, depuis des millénaires, de grandes quantités de carbone, sous forme de végétaux partiellement décomposés qui forment la tourbe. À l'échelle planétaire, alors qu'elles n'occupent que 3% de la surface des terres émergées, les tourbières stockent environ 30% de la totalité du carbone des sols mondiaux (Eswaran & al., 1993). Cela représente 455 gigatonnes de carbone (Gt), l'équivalent des 3/4 du carbone atmosphérique. Leur capacité de stockage est énorme.

Et ce n'est pas tout : la majorité des tourbières est constituée de sphaigne, une mousse qui a la capacité record de retenir jusqu'à 25 fois son poids en eau ! Les atouts sont multiples et indispensables à la régulation du cycle de l'eau : stockage des pluies, épuration naturelle, infiltration vers les nappes souterraines, soutien d'étiage. Pourtant, 50% des tourbières des régions Rhône-Alpes et Franche-Comté ont été détruites au siècle dernier.

Or, toute perturbation du fonctionnement naturel des tourbières est néfaste pour l'environnement puisque l'on se prive des services qu'elles nous rendent et parce qu'ainsi, on libère le CO₂ dans l'air, renforçant ainsi l'effet de serre au lieu de l'atténuer. Par exemple, converties en terre labourables, les tourbières relâchent en moyenne 0,05 à 0,1 Gt de carbone par an alors qu'elles en stockent naturellement 0,1 Gt (Gorham, 1991).

On l'aura compris, plus que d'autres types de zones humides, les tourbières sont des alliés naturels pour s'adapter au changement climatique. L'ensemble de ces milieux est fragile et leur restauration est essentielle pour préserver les services naturels qu'ils nous rendent comme le soutien du débit des rivières en été ou le stockage de carbone.

L'agence de l'eau et le Pôle-relais tourbières sont partenaires pour mieux comprendre le rôle des tourbières, leur fonctionnement face au changement climatique et rendre publiques ces informations. Il faut aussi engager des travaux de restauration pour retrouver le fonctionnement naturel de ces milieux si bénéfiques au cycle de l'eau.

L'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse vise la restauration et la préservation de 10 000 ha de zones humides au terme de son 10^{ème} programme, fin 2017. Et ça marche : le virage est pris. Par exemple, l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse a multiplié par 4 depuis 2012 ses engagements financiers pour les zones humides pour atteindre 9,5 M€ en 2014. Ce sont autant de projets de collectivités ou de Conservatoires d'espaces naturels financés, le cas échéant avec l'appui des régions et des départements, qui totalisent déjà 5 000 hectares de zones humides restaurés et 12 000 hectares acquis. L'action se concentre sur les secteurs stratégiques, c'est-à-dire ceux dont les fonctions sont essentielles pour le cycle de l'eau et qui font face aux pressions les plus fortes.

Dans le Jura par exemple, l'agence a aidé le Parc naturel régional à restaurer une tourbière. Cette zone humide d'altitude s'était boisée et asséchée suite à d'importants travaux de drainage destinés à faciliter l'extraction de la tourbe au 19^{ème} siècle. Le cours de la Lemme, quasiment disparu, était devenu rectiligne et uniforme avec une hauteur d'eau inférieure à 5 cm. L'agence a financé à 50% l'acquisition et la restauration de 60 ha de zone humide pour recréer un lit vivant de 2 500 m de long grâce à un comblement des drains, l'arasement de seuils, l'arrachage des boisements et un travail du sol. La Lemme a retrouvé son fonctionnement en se mouvant au sein de 50 ha de zones humides. La restauration de cette zone humide est bénéfique également pour les eaux souterraines contenues dans des roches fissurées et donc en relation étroite avec les eaux superficielles. Les aquifères se rechargeant mieux, la qualité des eaux s'améliore.

Laurent ROY

**Directeur général
de l'Agence de l'eau
Rhône Méditerranée Corse**

Le mot du Pôle-relais tourbières...

Selon sa discipline ou ses centres d'intérêts, le mot « tourbière » évoquera des points de vue différents : faune et flore rares pour le naturaliste, boissons typiques pour l'amateur de whisky, source de matière première pour le producteur de terreaux, etc...

Le climatologue y verra certainement l'un des plus gros réservoirs de carbone stocké à long terme et des espaces influençant les climats au moins à l'échelle locale (en plus de dépendre des fluctuations des climats!). C'est par ce dernier prisme que la tourbière sera abordée tout au long de ce vingt-et-unième numéro de l'Écho des tourbières.

Après avoir fait un point sur les dernières prévisions de changement climatique et rappelé par quels mécanismes les tourbières peuvent être de formidables puits de carbone, ce numéro passera en revue divers

projets de recherches et leurs principales conclusions.

Richard LINDSAY, dans son article de synthèse sur cette problématique planétaire, nous rappelle à quel point l'enjeu est grand, et souligne également l'importance des opérations de restauration hydrologique qui permettront d'améliorer la résilience des écosystèmes tourbeux face au réchauffement annoncé.

Mais avant de nous projeter dans l'avenir, penchons-nous tout d'abord sur le passé. Outre les informations sur les climats anciens apportées par les pollens conservés dans la tourbe, quelles ont pu être les interactions entre les tourbières et le climat ? Hervé CUBIZOLLE, chercheur à l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne nous livre, dans l'article qui suit, quelques pistes de réflexion à ce sujet.

Nous vous souhaitons une excellente lecture de ce nouveau numéro.

Grégory BERNARD

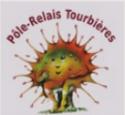
Chargé de missions scientifiques et techniques au Pôle-relais tourbières
Fédération des Conservatoires d'espaces naturels

Maison de l'environnement de Franche-Comté,
7 rue Voirin
25000 Besançon

Tél : 03.81.50.11.99

Courriel : gregory.bernard@reseau-cen.org

Site Internet : www.pole-tourbieres.org



Que peuvent nous apprendre les tourbières sur le climat ?

Températures généralement froides, manque d'oxygène, pH très acide dans les tourbières bombées, voilà trois conditions qui font de certaines tourbières d'excellents lieux de conservation ! Nos ancêtres l'avaient apparemment bien compris et on a, par exemple, retrouvé du beurre enterré dans la tourbe et conservé depuis l'Antiquité. Aujourd'hui, cette propriété de conservation intéresse les scientifiques et climatologues qui y trouvent matière pour étudier les climats anciens.

Produits en très grande quantité dans les étamines, les grains de pollen des fleurs renferment les cellules reproductrices mâles des plantes à fleur. Leur étude est la palynologie. Leur taille, leur forme, l'ornementation, les ouvertures présentes dans la couche externe de leur paroi sont très caractéristiques et peuvent permettre l'identification d'une famille, d'un genre ou même parfois d'une espèce (Photo 1).

Mesurant entre dix et une centaine

de micromètres (µm), les grains de pollen sont très légers et dispersés le plus souvent par le vent, ou par les insectes. En milieu non oxydant, comme c'est généralement le cas dans la tourbe, leur enveloppe, très résistante, peut se conserver pendant des milliers d'années.

10000 années d'histoire

Après avoir prélevé une carotte de tourbe, le but de l'analyse pollinique est d'extraire le pollen par une série de traitements physiques et chimiques afin d'éliminer tous les composants gênants (minéraux, matière organique). Une goutte du résidu obtenu est étalée entre lame et lamelle puis observée au microscope. Il faut pouvoir compter au moins 300 grains de pollen pour calculer le pourcentage de chacun des taxons conservés par rapport à la somme pollinique. Lorsqu'on dispose de plusieurs échantillons situés à différentes profondeurs dans le sédiment, on peut représenter graphiquement les variations des

pourcentages de chaque taxon en fonction de la profondeur, et faire ainsi apparaître l'évolution de la végétation au cours du temps : c'est le diagramme pollinique qu'il faut ensuite interpréter.

Les tourbières du Massif Central oriental nous renseignent ainsi sur l'histoire de la végétation depuis le début de l'Holocène.

Jacqueline ARGANT

Palynologue à l'Université de Lyon 1
courriel : j.argant@wanadoo.fr

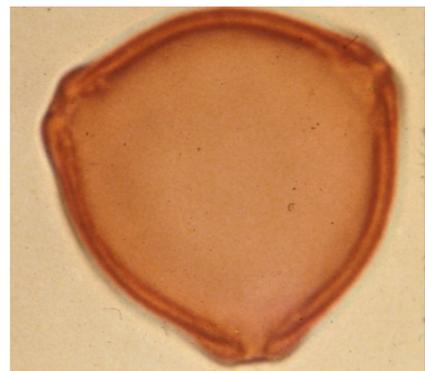
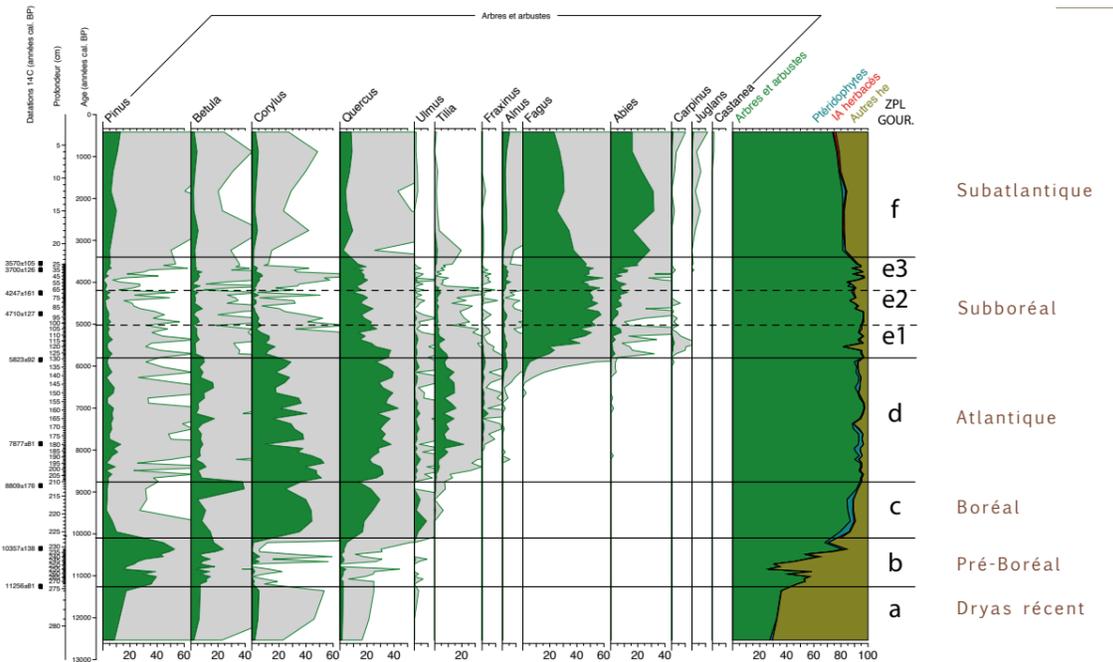


Photo 1 - Pollen de noisetier (©J. ARGANT)



TOURBIERE DE LA ROCHE-GOURGON (Roche-en-Forez, Loire) - 1370 m

Pluie de pollen (©J. ARGANT)



Description de l'analyse pollinique

f : Subatlantique : la pression de l'Homme sur le territoire se fait davantage sentir avec l'intensification des coupes pratiquées dans les chênaies et hêtraies et le développement des indices d'activités humaines à proximité de la tourbière.

e1 à e3 : Subboréal (Néolithique final à Chalcolithique) : la hêtraie se développe et atteint son maximum pendant que *Abies* (sapin) progresse lentement. Les fléchissements de leurs courbes indiquent des coupes forestières. L'augmentation des taux de Poacées et de plantain, du pollen de céréales et de rudérales traduit la progression de l'activité pastorale et des cultures.

d : Atlantique (Néolithique moyen) : tout en restant bien présent, *Corylus* (noisetier) décline progressivement au profit de groupements forestiers plus denses permettant l'essor de *Fraxinus* (frêne) et de *Tilia* (tilleul) au sein de la « chênaie mixte ». On voit également apparaître les premiers grains d'*Abies* suivi de *Fagus*

(hêtre) annonçant l'arrivée de ces essences sur le territoire régional. Les herbacées se font rares avec des taux excédant rarement 10 % de la somme pollinique totale. On note les premières céréales.

c : Boréal : une amélioration climatique rapide entraîne le recul de *Pinus* (pin) et l'ascension brutale du taux de *Corylus*.

b : Pré-Boréal : le développement remarquable d'arbres héliophiles, *Pinus* et *Betula* (bouleau) témoigne d'un brusque réchauffement climatique. Le paysage reste ouvert, les herbacées steppiques sont toujours bien présentes.

a : Dryas récent : l'ouverture du paysage est marquée par la grande diversité et la très forte représentation des herbacées (>67 %) et parmi celles-ci un taux élevé de steppiques (*Artemisia*, *Poaceae*, *Asteroideae*, *Chenopodiaceae*, *Cichorioideae*, *Plantago*, *Rumex*) évoquant l'existence d'un climat rigoureux.



Photo 2 - Chaton de noisetier. Les épis de fleurs mâles produisent les grains de pollen (©J. ARGANT)

Les tourbières et le climat, une vieille histoire - Le rôle du climat dans l'apparition et le développement des tourbières

Les relations entre apparition et développement des tourbières, d'une part, et changements climatiques, variations des teneurs en gaz carbonique et méthane d'autre part, retiennent l'attention des chercheurs depuis une bonne vingtaine d'années. Néanmoins les travaux concernent principalement les zones boréales et arctiques de l'hémisphère nord. Pourtant la relation entre l'histoire des tourbières et celle des climats est tout aussi forte sous d'autres latitudes.

En Europe occidentale, les tourbières actuelles ne purent se mettre en place et se développer qu'une fois les conditions froides et arides de la dernière période glaciaire – le Würm – remplacées par les climats globalement doux et humides qui s'installèrent au cours du Tardiglaciaire – soit entre -18000/-11500 avant aujourd'hui – puis du Postglaciaire – ou Holocène -. En effet au-delà des précipitations dont on comprend aisément qu'elles conditionnent l'hydromorphie, les conditions climatiques postglaciaires ont permis le développement d'une biomasse végétale abondante, autre condition sine qua none pour que de la tourbe puisse s'accumuler.

Une des plus vieilles tourbières de France est celle de Molhiac, située dans le Puy-de-Dôme, en Auvergne, dans le fond de la vallée de la Ligonne, un cours d'eau du haut bassin de la Loire au sud des Monts du Forez. La tourbière occupe un peu plus de 3 hectares à 1130 m d'altitude. Son épaisseur de tourbe

maximum est de l'ordre de 270 cm et la date par le radiocarbone la plus ancienne obtenue dans la couche de tourbe basale se place autour de -13200 ans.

Plus généralement, dans cette partie orientale du Massif Central, la seule région de France et l'une des rares d'Europe pour lesquelles nous connaissons l'âge des tourbières grâce au travail des géographes de l'Université de Saint-Etienne, deux générations de ces écosystèmes humides se sont mises en place au cours des 15000 dernières années. Mais seule la génération la plus ancienne qui comprend environ la moitié de 86 sites étudiés a une origine climatique, la seconde génération ayant une origine anthropique. Apparues entre -10000 ans et -6000 ans avant aujourd'hui, les tourbières de la première génération correspondent aux grandes tourbières ombrotrophes et généralement bombées que l'on observe sur les hautes terres au-dessus de 1100 m d'altitude. Elles se sont mises en place alors que les sociétés agro-pastorales n'étaient pas encore installées dans cette région de France, si bien que seule l'évolution climatique des 13000-13500 dernières années est à l'origine du basculement des bilans hydriques qui a permis le démarrage de la turfigenèse. Toutefois d'autres facteurs physiques plus locaux ont influé sur la mise en route de l'accumulation de tourbe, ce qui explique que toutes les tourbières ne soient pas apparues simultanément : ce sont les contextes hydrologiques et géomorphologiques, les gradients climatiques nord/sud et altitudinaux.

Une fois lancé, le processus d'accumulation de tourbe ne s'est plus arrêté jusqu'à nos jours sauf lorsque les hommes sont intervenus directement ou indirectement pour

abaisser la nappe, par le drainage principalement. Toutefois cette expansion des tourbières ne s'est pas faite de façon régulière. Ainsi la tourbière de Molhiac dans le sud des Monts du Forez, a évolué de la façon suivante :

- de l'Allerød à la fin du Boréal, soit de -13200 ans à -8835 ans avant aujourd'hui, la progression latérale de la tourbière a été très régulière et parfois très rapide avec des vitesses d'extension latérale qui atteignent 5,9 m²/an au cours des premiers siècles de vie de la tourbière. Aussi, vers -8835 ans, c'est presque la moitié du site actuel qui est couvert par la tourbe.

Des superficies en régression

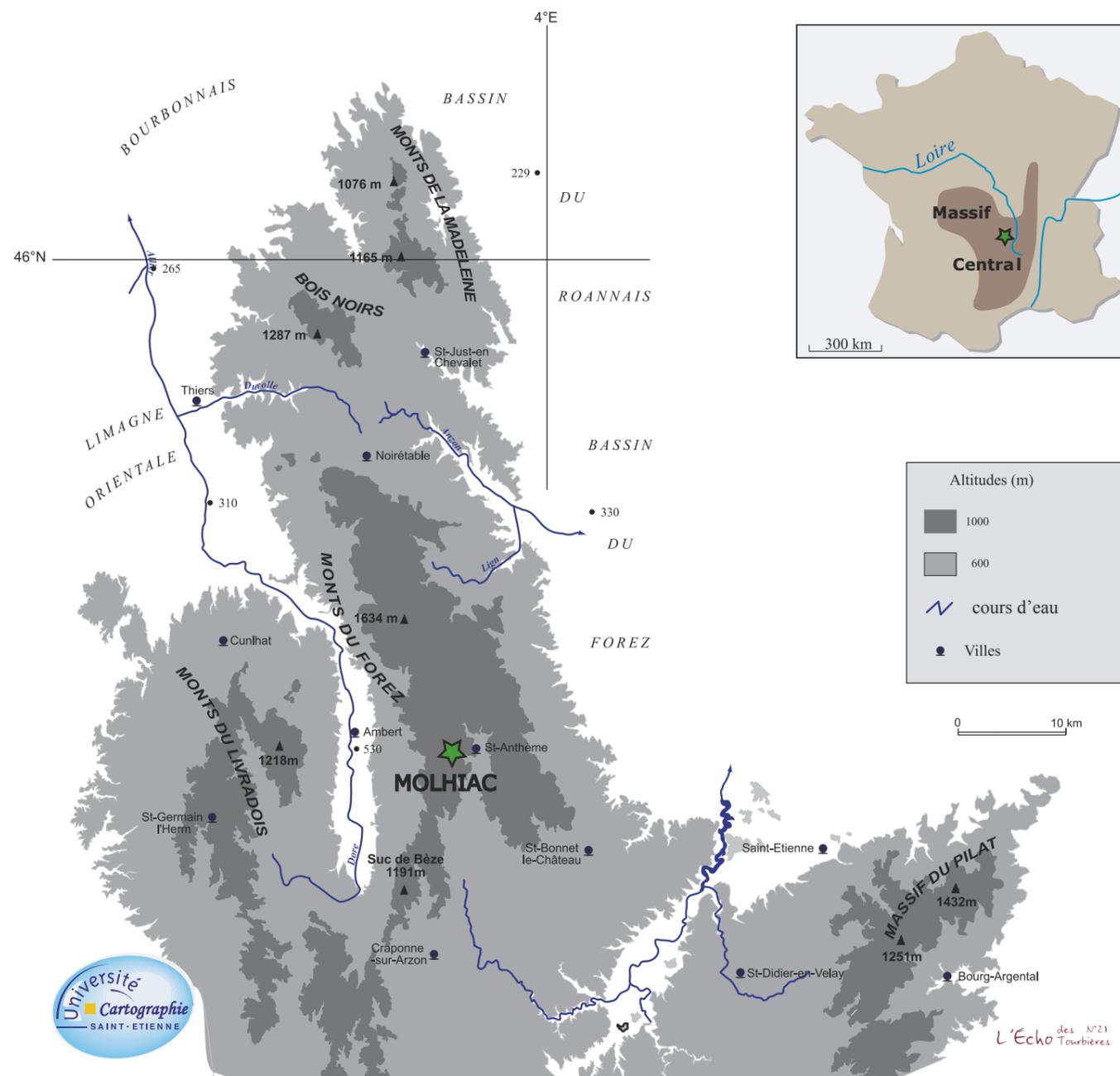
- A partir de l'Atlantique ancien et jusqu'à la fin du Subboréal – soit entre -8835 et - 2835 avant aujourd'hui - la progression de l'accumulation de tourbe est tout aussi régulière mais globalement beaucoup plus forte, particulièrement à l'Atlantique ancien entre -8835 et -6850, période la plus douce et la plus humide du Postglaciaire que l'on qualifie de Maximum Thermique Holocène. Dans l'est du Massif Central, c'est une époque au cours de laquelle dominent les forêts caducifoliées tempérées composées de chênes, tilleuls, frênes et ormes.

L'Homme agriculteur n'a pas encore imprimé sa marque sur la nature. Finalement, à la fin de l'Atlantique – soit vers -5450 avant aujourd'hui - ce sont 87,5% du site de Molhiac qui sont couverts de tourbe. Au Subboréal, la dynamique faiblit sensiblement du fait d'un climat beaucoup moins favorable, plus sec surtout. La tourbe gagne cependant encore du terrain et vers -2835 on atteint les 98,1 % de surfaces tourbeuses.

Chronozones	Date cal. BP du début	Date cal. BP de la fin
Subatlantique	2835	0
Subboréal	5450	2835
Atlantique récent	6850	5450
Atlantique ancien	8835	6850
Boréal	10085	8835
Préboréal	11490	10085
Dryas récent	12710	11490
Allerød	13600	12710
Dryas moyen	13900	13600
Bølling	15075	13900
Dryas ancien	18270	15075

Tableau 1 - chronologie du Tardiglaciaire et du Postglaciaire (ou Holocène) « Cal. BP » signifie « calibré avant 1950 »

Figure 2 - Localisation de la tourbière de Molhiac dans les Monts du Forez (alt. 1130 m),



- Depuis lors, tout au long du Subatlantique, soit au cours des 2835 dernières années, le processus d'accumulation s'est très fortement ralenti avec des vitesses qui chutent à 0,2 m²/an et ce malgré des conditions climatiques redevenues plus favorables, plus humides notamment. Les superficies envahies par la tourbe sont ainsi très modestes, moins de 2 % de la progression totale de la tourbière.

Les grands changements climatiques survenus au cours du Postglaciaire ont incontestablement été le moteur principal de l'expansion latérale de la tourbière de Molhiac au cours des 13200 dernières années. Le démarrage de la turfigenèse à Allerød est très vraisemblablement lié à l'amélioration climatique de cette période du Tardiglaciaire ; la progression extrêmement rapide au cours de l'Atlantique ancien est clairement le résultat de l'installation d'un climat très favorable et le ralentissement de la dynamique au Subboréal est au contraire la conséquence d'une évolution climatique défavorable. Mais d'autres facteurs ont joué : ainsi le blocage de l'expansion latérale au Subatlantique, alors même que le climat est favorable, ne peut s'expliquer sans le recours à l'impact des interventions des sociétés agricoles sur les zones humides. Le Subatlantique, période dans laquelle nous sommes toujours, commence en effet au milieu de l'âge du Bronze final. Les sociétés agro-pastorales sont alors bien installées dans le Massif Central oriental et leur emprise sur les milieux naturels va aller crescendo. La combinaison du drainage, de la pression pastorale et de l'utilisation du feu comme mode de gestion des pâturages a très vraisemblablement modifié le fonctionnement hydrologique de la tourbière de Molhiac dans le sens d'un basculement des bilans hydriques, cette fois de positif ou

nul à négatif. Son corollaire a été l'abaissement de la nappe et le blocage de l'accumulation de tourbe voire la minéralisation de l'horizon supérieur, ce que l'on constate à Molhiac sur les 30 premiers centimètres.

Enfin il semble évident que des facteurs géomorphologiques et hydrologiques locaux ont également joué un rôle notable dans l'histoire de la turfigenèse. Cela explique très certainement les différences observées d'un site à l'autre. Ainsi le démarrage de la tourbière à Molhiac à l'Allerød et la progression régulière et relativement rapide à la fin du Tardiglaciaire et au début du Postglaciaire, alors que les conditions climatiques demeurent très changeantes et parfois théoriquement très défavorables comme au cours du Dryas récent, période très froide et sèche, ne peut se comprendre sans tenir compte, d'une part, de l'inertie de ces écosystèmes dont la croissance est en partie le fait de facteurs autogènes et, d'autre part, de l'abondance des sources et des rus dont les eaux convergent dans la vallée tourbeuse, de l'orientation nord/sud de la vallée et de la configuration topographique.

On le voit, si la connaissance de l'histoire climatique est fondamentale pour comprendre celle des tourbières, il n'en demeure pas moins que l'évolution des contextes hydro-géomorphologiques locaux mais encore de l'emprise humaine doivent également être étudiés pour parvenir à une bonne compréhension de la dynamique turfigène plurimillénaire. Quelle sera maintenant la place du changement climatique en cours dans cette longue histoire des tourbières ? Tous les scénarii sont envisageables y compris celui d'une relance de la turfigenèse dans un contexte de déprise humaine et de restauration de nombreux sites. En effet l'augmentation des températures

et de la teneur en CO² de l'atmosphère favorisent a priori la production de biomasse. Reste l'inconnue majeure de l'évolution des précipitations, un domaine dans lequel les prévisions sont moins précises et rendues plus difficiles encore par une variabilité spatiale beaucoup plus importante que celle des températures.



Carotte de tourbe (© H. CUBIZOLLE)

Hervé CUBIZOLLE
Géographe,
Professeur des Universités

Jordan THOLLY,
Géographe
Université Jean Monnet,
EVS-ISTHME UMR 5600 CNRS,
6 rue Basse des Rives,
42023 Saint-Etienne cedex 2, France.

Courriel:
herve.cubizolle@univ-st-etienne.fr

Quelques références bibliographiques :

- CUBIZOLLE H., FASSION F., ARGANT J., LATOUR-ARGANT C., GALET P., & OBERLIN C., 2012.- Mire initiation, climatic change and agricultural expansion over the course of the Late-Holocene in the Massif Central mountain range (France): what are the causal links and what are the implications for mire conservation? *Quaternary International*, 251, 77-96.
- CUBIZOLLE H., GREGOIRE F. & SACCA C., 2013.- Quand l'Homme crée des tourbières ou comment les tourbières d'origine anthropique changent la manière de percevoir les écosystèmes tourbeux. In : Nouveaux regards sur les tourbières Cubizolle H. et Sacca C. (sous la dir. de), Géocarrefour, 88 (4), 257-271.
- CUBIZOLLE H., ARGANT J., FASSION F., LATOUR-ARGANT C., DENG-AMIOT Y. & DIETRE B., 2014.- Histoire de la végétation depuis la fin du Tardiglaciaire et l'évolution de l'emprise humaine à partir du milieu de l'Holocène dans le Massif Central oriental (France). *Quaternaire*, vol. 25 (3), 209-236.

Le changement climatique, point sur les dernières prévisions du GIEC

En 2013 et 2014, le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat) a remis son 5^{ème} rapport sur les changements climatiques et leurs évolutions futures.

Créé en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le programme pour l'Environnement des Nations Unies (PNUE), ce groupe synthétise les travaux publiés par des milliers de chercheurs analysant tendances et prévisions mondiales en matière de changement climatique. Mais que dit le 5^{ème} et dernier rapport en date ?

De plus en plus de certitude sur l'impact de l'Homme sur le réchauffement climatique.

Les experts évaluent désormais à 95% la probabilité pour que l'Homme, notamment par l'usage des énergies fossiles, soit responsable de la hausse exceptionnelle de la concentration en gaz à effet de serre (GES) qui transforment le climat (cette probabilité était estimée à environ 70% en 2001).

Afin d'envisager les impacts possibles du changement climatique, 4 scénarii sont envisagés dans le rapport (cf. graphique 1), ils correspondent à 4 évolutions différentes de nos émissions de GES. Le plus pessimiste (RPC 8.5 en rouge) correspond à la prolongation de nos émissions actuelles ; le scénario RPC 2.6 (en vert), nouveauté de ce dernier rapport, implique de fortes réductions de nos émissions de GES. Il demeure toutefois le seul scénario permettant de stabiliser le réchauffement sous le seuil de 2°C, objectif partagé par la communauté scientifique internationale et au-delà duquel les scientifiques n'excluent pas un effet d'emballement et des impacts irréversibles et imprévisibles actuellement.

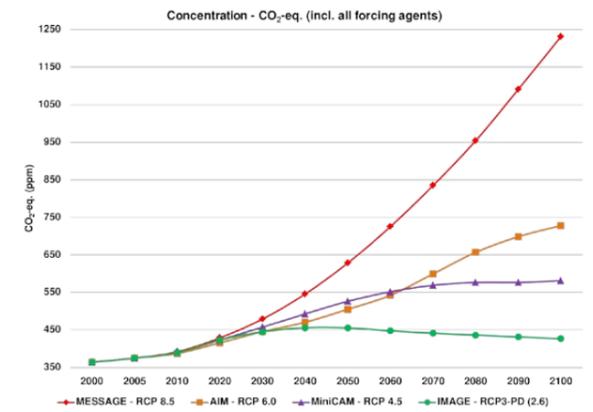
Quelles conséquences ?

✧ **Sur les températures :** Dans l'hypothèse la plus optimiste de réduction des émissions de GES, les températures augmenteraient de 1°C à 2,4°C (par rapport à 1850) d'ici la fin du XXI^{ème} siècle. Dans le pire des cas, elles s'élèveraient de 3,3°C à 5,5°C.

✧ **Sur le niveau des mers :** Entre 40cm et 80cm, c'est l'élévation du niveau de la mer prévu selon les scénarii, à la fin du XXI^{ème} siècle.

✧ **Sur la cryosphère¹ :** La fonte de la banquise est la plus marquée à la fin de l'été, en septembre. En 2100, les experts estiment selon les scénarii que 43% à 94% de la banquise fondra en septembre. De la même façon, 85% du volume des glaciers pourrait avoir disparu à cette échéance.

Peut-être encore plus préoccupante : la fonte du pergélisol et ses conséquences. 37% à 81% du pergélisol aura fondu d'ici 2100, libérant ainsi d'immenses quantités de CO₂ et de CH₄ (méthane) dans l'atmosphère. La boucle de rétroaction qui pourrait être enclenchée par cette libération massive de GES serait un processus irréversible à l'échelle humaine.



Graphique 1 - «All forcing agents CO₂ equivalent concentration» par Ilinri — Transféré de en.wikipedia à Commons. Sous licence CC0 via Wikimedia Commons - Les scénarios RCP (pour Representative Concentration Pathway) sont quatre scénarios relatifs à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre au cours du XXI^{ème} siècle, établis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) pour son cinquième rapport.

Nous le verrons tout au long de ce numéro, la problématique est similaire pour les tourbières, qui pourraient également émettre d'énormes quantités de CO₂ accumulées et stockées depuis la dernière glaciation.

Quels impacts pour les sociétés humaines ?

Ils sont extrêmement nombreux ! Problèmes d'accès à l'eau douce, diminution des rendements des cultures, risques pour la santé, diminution de la biodiversité terrestre et marine entraineront inévitablement une augmentation des inégalités, un accroissement de la pauvreté et avec le déplacement contraint de populations, des risques en termes de sécurité et de conflits violents. Le changement climatique, ce n'est pas simplement un dérèglement des saisons et quelques vagues de chaleur, mais bien des conséquences multiples et dramatiques pour les sociétés telles que nous les connaissons actuellement.

Les changements climatiques devraient réduire les rendements agricoles mondiaux de 2% par décennie au cours du XXI^{ème} siècle alors même que la demande mondiale va augmenter pendant cette même période de 14% par décennie jusqu'en 2050...

Dans le contexte où l'objectif de limiter le réchauffement à 2°C passe par une diminution des émissions GES, tous les puits et sources de carbone prennent une grande importance dans la lutte contre le réchauffement, les tourbières y occupent une place non négligeable ! Pour en savoir plus : www.leclimatchange.fr

Grégory BERNARD

Chargé de missions scientifiques et techniques
au Pôle-relais tourbières
Fédération des Conservatoires d'espaces naturels
Courriel : gregory.bernard@reseau-cen.org

¹. du grec kryos (froid, glace), est un terme désignant collectivement les portions de la surface de la Terre où l'eau est présente à l'état solide. Elle inclut les banquises, les lacs et rivières gelés, les régions couvertes de neige, les glaciers, les inlandsis et les sols gelés, de façon temporaire ou permanente (pergélisol).

Les interactions entre tourbières et le climat : comment ça marche ?

Par quels mécanismes les tourbières stockent-elles du carbone ?

La photosynthèse

La photosynthèse est un mécanisme physiologique de base par lequel les végétaux chlorophylliens fixent le dioxyde de carbone atmosphérique pour produire leur biomasse. Le carbone du CO₂ est donc utilisé pour construire les tissus végétaux (Figure 1).

Le CO₂, voilà le gaz à effet de serre que les climatologues scrutent à la loupe, celui qui est produit en grande quantité par les activités humaines par la combustion des énergies fossiles telles que le charbon et le pétrole.

L'oxydation de la matière organique.

Après la mort des végétaux, les plantes sont décomposées par les micro-organismes dans un processus où le carbone organique va être retransformé en forme inorganique. Il s'agit de la minéralisation.

Ces mécanismes agissent dans la plupart des écosystèmes terrestres. En forêt par exemple, la litière végétale constituée, entre autres, par les feuilles tombées à l'automne va être peu à peu dégradée puis réintégrée aux sols sous forme d'éléments minéraux. C'est ainsi que la litière

de l'année n-1 ne sera quasiment plus présente l'année suivante.

Dans ce processus classique, les organismes responsables de la dégradation de la matière organique, vont émettre du CO₂ via leur respiration. Ainsi le CO₂ qui avait été temporairement stocké dans les tissus végétaux se retrouve à nouveau dans l'atmosphère, la boucle est bouclée !

Dans les tourbières, le processus de dégradation de la matière organique est incomplet. L'activité des micro-organismes décomposeurs est en effet limitée par plusieurs facteurs : températures généralement basses, anoxie, acidité du milieu dans certaines tourbières, sphaignes difficilement décomposables. Ainsi, environ 10% de la biomasse végétale morte est accumulée sous forme de tourbe (Figure 1). C'est ce fonctionnement particulier qui confère aux tourbières leur capacité de stockage à long terme du carbone organique.

La capacité d'une tourbière à accumuler du carbone sous forme de tourbe repose donc sur un fragile équilibre entre la production de biomasse et le processus de dégradation de la matière organique dont les micro-organismes sont la clé de voute.



Figure 1 - mécanisme d'accumulation du carbone dans une tourbière (© G. BERNARD)

Grégory BERNARD

Chargé de missions scientifiques et techniques au Pôle-relais tourbières, Fédération des Conservatoires d'espaces naturels.

Courriel : gregory.bernard@reseau-cen.org

Quelques chiffres sur les sols organiques et les émissions de gaz à effet de serre

Ces chiffres sont tirés de "Peatlands - guidance for climate change mitigation by conservation, rehabilitation and sustainable use". Hans Joosten, Marja-Liisa Tapio-Biström & Susanna Tol (eds.), 2012

☼ Les tourbières et les sols organiques ne couvrent que 3% de la superficie de la Terre, mais contiennent 30% du carbone total des sols.

☼ La quantité de carbone stockée par l'ensemble des tourbières est quasiment équivalente à la quantité de carbone contenue dans l'atmosphère...

☼ ...y compris les émissions provenant des feux de tourbières, les émissions de CO₂ des tourbières drainées, s'élèvent au niveau mondial à près 2 gigatonnes par an et représentent actuellement près de 25% des émissions de CO₂ du secteur de l'utilisation des terres, de leur changement d'affectation et de la foresterie.

☼ La moitié des émissions mondiales dues à la dégradation des tourbières proviennent de l'Asie du Sud-Est où les taux de déforestation et de drainage sont élevés.

☼ En Indonésie, où 95% des tourbières sont déjà dégradées, elles sont responsables de plus de 60% des émissions totales du pays.

☼ Après l'Indonésie, l'Union européenne est le deuxième plus grand émetteur mondial de gaz à effet de serre provenant des tourbières. Dans les 27 pays de l'Union européenne, la culture et le pâturage sur sols organiques sont responsables de presque 80% des émissions de CO₂ provenant de toutes les terres consacrées à l'agriculture.

Couvrant seulement 3% des terres émergées, les tourbières stockent pourtant un tiers du carbone contenu dans l'ensemble des sols de la planète. Cette quantité équivaut à environ la moitié du carbone contenu dans l'atmosphère. Le marais de Vassiougan, dans la plaine de Sibérie occidentale, en Russie, est une des plus vastes zones marécageuses du monde. Ce marais couvre 53 000 km² sur la rive gauche de l'Ob (Photos bas de page : © F. MULLER)



L'étude des effets du réchauffement climatique sur la fonction puits de carbone des tourbières, quels dispositifs ?

Mettre les tourbières sous serres pour étudier l'impact du réchauffement climatique : le projet PEATWARM et la station de recherche de la RNR des tourbières de Frasne-Bouverans

Évaluer et mieux comprendre l'impact d'un réchauffement climatique simulé in situ sur la fonction puits de carbone des tourbières en domaine tempéré.

Le programme PEATWARM se propose d'utiliser des tourbières à sphaignes comme milieu modèle et d'en analyser la vulnérabilité dans un contexte de changement climatique grâce à un dispositif expérimental simulant in situ une augmentation de la température moyenne de l'air. Son objectif est d'évaluer les effets du réchauffement sur (1) la végétation, (2) le bilan de carbone, (3) la diversité et l'activité microbiennes, (4) les interactions macro-micro-organismes (5) la dynamique des matières organiques labiles et récalcitrantes. In fine, PEATWARM vise à élaborer un modèle de fonctionnement biogéochimique Carbone et de la dynamique de stockage du Carbone et identifier des proxys de température et d'humidité utilisables dans les archives

sédimentaires pour reconstituer le paléoclimat de l'Holocène récent.

Simuler le réchauffement, analyser ses impacts sur les compartiments-clé du système et identifier des proxys de température.

Le dispositif expérimental de réchauffement in situ (tourbière de Frasne, Doubs) est constitué de 12 placettes dont 6 avec mini chambres hexagonales à toit ouvert (Open-Top Chambers « OTCs », protocole standardisé ITEX), et est appliqué pour la première fois en zone tempérée. Deux types de biotopes à régime hydrique contrasté ont été étudiés : haut-marais, et marais de transition (plus humide). Les placettes ont été équipées de capteurs de température (air et sol) et de niveau de nappe, et des dispositifs de suivi de végétation et de gaz. Quatre chambres automatiques de mesure de CO₂ ont été mises au point et déployées sur le site en 2010 et 2011. Parallèlement, des

microcosmes de tourbe + végétation ont été incubés pendant 12 mois en chambres climatiques pour y étudier l'effet d'un réchauffement de +3°C sur les interactions biotiques C-N-S. Les effets du réchauffement in situ et ex-situ sur les compartiments-clé (végétation, gaz, sphaignes, tourbe, micro-organismes) ont été analysés selon une approche interdisciplinaire associant des compétences complémentaires et novatrices (écologie végétale et microbienne, écophysologie, géochimie moléculaire et isotopique, paléoécologie, modélisation).



Photo 3 - Station de recherche CliMireSiber (© A. Buttler)



Les mini serres ouvertes (Open Top Chambers – OTC à gauche) permettent de simuler un réchauffement de quelques degrés sur la tourbière. Une placette témoin est placée à côté de chaque OTC pour suivre l'évolution des paramètres sans forçage climatique (© G. Bernard)



Production scientifique

3 thèses ont été soutenues (F. Delarue, Orléans ; V. Jassey, Besançon et A. Gicquel, Rennes) entre 2010 et 2012, auxquelles s'ajoutent environ 20 articles et 2 chapitres d'ouvrage parus ou sous presse.

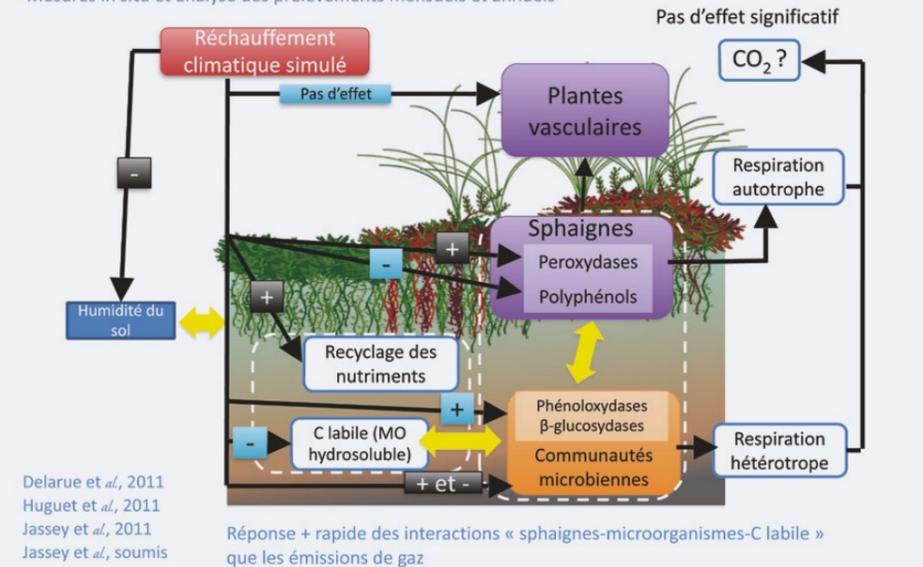
Résultats majeurs

Le projet a permis l'instrumentation du site de Frasne et la mise en place d'une base de données (dont la température) à haute fréquence temporelle. Le schéma expérimental a depuis été reproduit en Pologne (Projet CLIMPEAT) et en Sibérie (Projet CliMireSiber - Photo 3) où, en plus de la simulation d'une hausse de température de l'air, la teneur en eau du sol est manipulée (assèchement et/ou ennoiment). Le site instrumenté de Frasne fait désormais partie du Service National d'Observation Tourbières² labellisé par l'INSU SIC en octobre 2011.

Nous avons montré que la hausse de température moyenne induite par les OTC (+2°C) provoque des modifications significatives dans les

Impact des OTCs sur les interactions « sphaignes-microorganismes-C labile »

Mesures in situ et analyse des prélèvements mensuels et annuels



Delarue et al., 2011
Huguet et al., 2011
Jassey et al., 2011
Jassey et al., soumis

Réponse + rapide des interactions « sphaignes-microorganismes-C labile » que les émissions de gaz

Réponse des compartiments biotiques et abiotiques de la tourbière après deux années de réchauffement climatique simulé par OTC (Frasne, Doubs). Les signes + et - indiquent les effets positifs et/ou négatifs du réchauffement sur ces différents compartiments, et les flèches jaunes, les interactions réciproques entre certains compartiments. Cette synthèse est réalisée à partir de Delarue et al., 2011 ; Huguet et al., 2011 ; Jassey et al., 2011 ; 2013.

interactions « sphaignes – communautés microbiennes – C labile ». La moyenne des mesures d'ENE (Echange Net d'Ecosystème) réalisées en 2010 et 2011 (0,24 gC.m⁻².j⁻¹) montre que, pour cette période, la tourbière perd du carbone au profit de l'atmosphère. Au total, les différentes réponses au réchauffement climatique des 2 situations étudiées (haut-marais et marais de transition) indiquent que la variabilité spatiale de l'humidité est primordiale pour la compréhension de

l'impact d'un réchauffement global sur le devenir du cycle du carbone des tourbières.

Fatima LAGGOUN-DÉFARGE

Chargée de recherche au CNRS d'Orléans

Courriel : fatima.laggoun@univ-orleans.fr

<http://www.sno-tourbieres.cnrs.fr>

Les recherches sur l'effet du réchauffement climatique à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Le laboratoire ECOS (EPFL et WSL, Lausanne) focalise ses recherches sur l'organisation, le fonctionnement et la dynamique des communautés végétales, animales ou microbiennes terrestres en rapport avec les processus écosystémiques et les habitats. Nous nous intéressons en particulier aux liens fonctionnels entre les communautés biologiques aériennes (plantes) et souterraines (microorganismes) pour

la production de services écosystémiques critiques (p.ex. biodiversité, cycle des nutriments) et en tant qu'indicateurs de changement environnementaux. Notre travail scientifique permet de fournir des outils de gestion pour initier des directives pour la conservation, la restauration et la gestion des écosystèmes terrestres sensibles, qu'ils soient naturels ou semi naturels.

L'une des principales réactions des tourbières au changement climatique est l'augmentation de la présence des plantes vasculaires, en particulier des petits arbustes. Cette dynamique de la végétation se produit en réponse à une diminution de la teneur en eau dans la tourbe, ce qui favorise la croissance des plantes vasculaires au détriment des sphaignes. Comment un tel changement d'abondance des plantes va-t-il affecter la fonction des tourbières ? C'est la question principale de deux projets scientifiques appelés CLIMABOG et VEGANPEAT, tous deux financés par le Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique (SNF). L'approche novatrice de ces deux projets a été l'utilisation de tourbières situées le long d'un gradient d'altitude dans les montagnes suisses (Carte 1).

Ceci a permis de simuler une augmentation des températures de l'air, combinée à une augmentation naturelle de l'abondance des plantes vasculaires. Ainsi, cette approche de l'utilisation de l'espace en remplacement du temps permet d'anticiper les phénomènes, selon l'idée que les tourbières de basse altitude représentent la situation future des tourbières à plus haute altitude.

Au cours de notre recherche, nous nous sommes particulièrement intéressés à comprendre comment une augmentation de plantes vasculaires affecte à la fois la croissance des sphaignes et les interactions avec les microorganismes du sol. Nos résultats montrent que la croissance des plantes vasculaires est d'une part accrue par une plus grande disponibilité en oxygène du sol, due à son assèchement en lien avec l'augmentation des températures, et d'autre part, par une litière de qualité différente et plus facilement dégradable.

Ainsi, lors de sa décomposition, la litière est susceptible d'augmenter la disponibilité en azote, un nutriment important pour les plantes. Les plantes vasculaires, en particulier les petits arbustes, pourront alors obtenir un avantage concurrentiel face aux sphaignes, grâce à la symbiose mycorhizienne qui permet à ce type de plantes d'absorber l'azote plus facilement. Nos résultats ont également montré que la productivité des sphaignes est généralement réduite à basse altitude, en raison des températures élevées et/ou de la disponibilité en eau réduite, ainsi que de la couverture végétale vasculaire plus élevée, qui engendre un déficit de lumière pour les sphaignes.

Comment les sphaignes vont-elles répondre à cette compétition accrue avec les plantes vasculaires ? C'est la question majeure de notre nouveau projet de recherche SHAGNOL, lui aussi financé par le SNF. Dans ce projet, nous allons nous concentrer sur



Carte 1 - localisation et altitudes des sites du projet CLIMABOG (© EPFL)

les interactions biochimiques entre les sphaignes, les plantes vasculaires et les micro-organismes du sol. Les sphaignes sont en effet soupçonnées de libérer des composés chimiques dans leur environnement proche qui, par la suite, pourraient avoir des effets négatifs à la fois sur la croissance des plantes vasculaires et sur l'activité des micro-organismes, et donc sur le recyclage des nutriments. Ainsi, ces composés chimiques sont susceptibles de jouer un rôle important dans la compétition pour les ressources entre les sphaignes et les plantes vasculaires.

Ce type d'interaction chimique pourrait augmenter avec le réchauffement et contrebalancer l'effet du réchauffement climatique favorisant les plantes vasculaires.

Prof. Alexandre BUTTLER

Directeur du laboratoire des systèmes écologiques (ECOS) à l'EPFL.

Ph D. Vincent JASSEY
Post doctorant ECOS - EPFL.

Courriel: alexandre.buttler@epfl.ch

Reconstituer les tourbières pour mieux les étudier : l'expérience du jardin botanique de Neuchâtel Recréer une tourbière « d'altitude » en plaine

Genèse de la tourbière « Léo Lesquereux » au vallon de l'Ermitage.

Ce projet en cours de réalisation à Neuchâtel (CH) comporte la création ex nihilo d'une tourbière, avec un double objectif scientifique et pédagogique.

Edward Mitchell, Professeur à l'Université de Neuchâtel, nous explique la genèse de cette tourbière et les objectifs de ses recherches.

Les naturalistes neuchâtelois connaissent bien les tourbières du Jura, ou plutôt ce qu'il en reste. En effet, ces écosystèmes si particuliers ont été fortement malmenés par l'exploitation artisanale de tourbe pour le chauffage domestique d'abord, puis pour la production de tourbe horticole. Les surfaces ainsi exploitées ont ensuite généralement été transformées en zones de culture. Seuls subsistent quelques îlots de tourbières dans nos vallées jurassiennes résistant tant bien que mal à une sournoise dégradation due à la baisse du niveau de la nappe, consécutive au découpage anarchique de leur pourtour et à une différence de niveau de terrain souvent de plus de deux mètres. Ceci mène au paradoxe d'une tourbière

qui n'a plus grand-chose d'une zone humide... Les gestionnaires de la nature cherchent donc à contenir un maximum d'eau dans les tourbières en bouchant les drains, et remodelant la topographie lorsque ceci est possible, et en menant parfois des opérations spectaculaires comme il y a quelques années : la coupe puis l'évacuation par hélicoptère de plusieurs milliers de pins sur la tourbière du Cachot, dans le but de limiter la perte d'eau due à l'évapotranspiration par les arbres.

Non moins spectaculaire est un chantier réalisé l'automne dernier au Jardin Botanique de Neuchâtel : la création d'une petite tourbière (Figure 1 à 5).

Un gros trou a d'abord été creusé au bord du ruisseau en amont de l'étang, sur une surface totale d'environ 100 m² (Figures 1 & 2). Puis de la marne (environ 60m³) a été livrée et amenée sur le site pour déposer une couche d'environ 60cm sur l'ensemble de la surface (Figures 3 & 4). Cette marne assure l'étanchéité de la tourbière. Puis la tourbe (également environ 60 m³) a été apportée, remplissant ce trou de cet « or noir du Jura » (Figure 5). La marne et la tourbe proviennent d'une ancienne tourbière du Locle, aujourd'hui en zone industrielle, et qui était vouée à être détruite. En l'utilisant pour construire notre tourbière, nous donnons à ce matériel une nouvelle vie !

Cette tourbière a ensuite été garnie de plantes caractéristiques et emblématiques des hauts-marais comme le bouleau nain, que le jardin botanique possédait dans ses collections ou qui ont été prélevées, avec l'accord des autorités compétentes, et de manière très parcimonieuse.

Mais est-il vraiment raisonnable de vouloir créer une tourbière à si basse altitude ? Cette question est souvent la première posée lorsque Blaise Mulhauser et moi présentons ce projet.

Des hauts-marais ont pourtant existé et existent encore aussi sur le plateau suisse et plusieurs figurent sur la liste de l'inventaire des hauts-marais d'importance nationale. Si ces milieux ont pu se développer dans le passé et subsister jusqu'à nos jours alors pourquoi ne réussissons-nous pas à créer une tourbière au vallon de l'Ermitage ?



Figure 5

Cette question nous amène aux aspects scientifiques du projet. La création de cette tourbière permettra d'aborder plusieurs questions : Comment la végétation de hauts-marais recolonise-t-elle une surface de tourbe nue en plaine ? Est-il plus difficile d'y parvenir que dans les vallées jurassiennes ? Quelles seront les caractéristiques micro-climatiques de cette nouvelle tourbière par rapport à celles mesurées dans les tourbières du Jura ? Comment fonctionnera cette tourbière aux différents stades de son développement ? Arrivera-t-elle un jour à fonctionner comme puits à carbone ? Quelles communautés d'organismes du sol et en particulier de micro-organismes coloniseront cette tourbière ?

Cette liste n'est bien sûr, pas exhaustive mais elle montre à quel point ce nouvel écosystème du jardin botanique sera un objet digne d'intérêt aussi bien pour les étudiants que pour les chercheurs, sans oublier le public, bien sûr, pour qui des panneaux didactiques seront préparés ainsi que des informations complémentaires sur le site web du jardin botanique. Nous prévoyons en particulier d'y présenter les valeurs microclimatiques mesurées sur et dans la tourbière (profils de température de la surface jusqu'au fond de la tourbière, fluctuations du niveau de la nappe etc.).

Cette tourbière portera le nom de « tourbière Léo Lesquereux » en l'honneur de ce célèbre naturaliste neuchâtelois, contemporain et ami de Louis Agassiz, pour son rôle de pionnier dans l'étude des tourbières.



Figure 1



Figure 2



Figure 3



Figure 4

Prof. Edward A.D. MITCHELL

Université de Neuchâtel,
Laboratoire de biologie du sol.

Courriel:
edward.mitchell@unine.ch

La restauration fonctionnelle des tourbières : un enjeu pour la résilience des écosystèmes tourbeux face aux changements climatiques

Au cours de leur existence, les tourbières ont déjà subi des changements climatiques...

Fait inhabituel parmi les écosystèmes du monde, les tourbières conservent les archives de leur histoire, depuis leur installation jusqu'à nos jours. Elles les gardent sous la forme de restes de plantes (et autres éléments) que nous appelons 'tourbe'. Cette particularité fait que nous savons quand plusieurs de ces tourbières ce sont initialement formées et nous pouvons ainsi dire avec certitude qu'elles sont demeurées durant plusieurs millénaires des systèmes accumulateurs de tourbe, bien qu'un certain nombre de changements parfois plutôt violents aient touché le climat et le niveau de la mer. Dans leur état naturel, les tourbières comportent une palette d'assemblages de végétation qui sont adaptés tant à maintenir qu'à tolérer des conditions d'ennoiement, que ce soit par la structure interne des plantes, par des obstacles aux mouvements de l'eau dus à la masse collective des plantes, ou par le maintien des microclimats humides du fait de la structure de la surface de la végétation. Ces diverses stratégies de contrôle de l'eau reposent sur la présence continue d'une telle végétation, mais des changements des conditions environnementales peuvent impliquer un changement d'un type de végétation à un autre, encore que ces variations restent

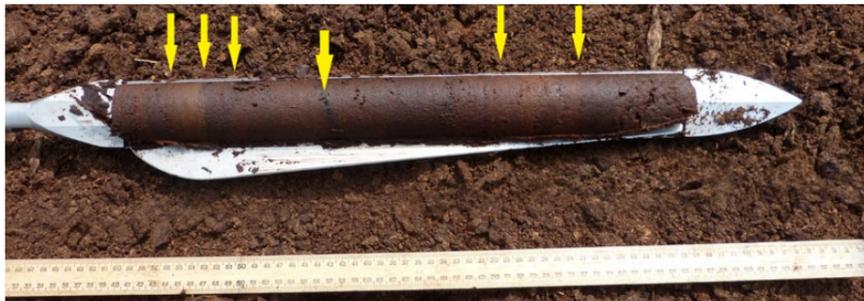


Photo 4 - Carottage dans une tourbière bombée d'Angleterre du nord, montrant plusieurs horizons qui reflètent les différentes conditions lors de l'accumulation de la tourbe. Les variations de types de tourbe sont marquées par des flèches, la flèche plus large indiquant une couche de charbon de bois provenant d'un feu de tourbe (©R.Lindsay)

généralement liées à une accumulation continue de tourbe. Des preuves de telles modifications de la végétation formatrice de tourbe, mais aussi de pauses dans l'accumulation de tourbe, peuvent être trouvées dans la plupart des dépôts tourbeux (Photo 5).

... auxquels elles se sont adaptées !

Cette relation entre les changements de conditions environnementales, notamment climatiques, et les changements associés de la végétation formant la tourbe, révèle la présence d'une rétroaction ayant permis que, une fois la tourbe accumulée, elle tend à se maintenir en tant que réservoir de carbone du sol à des échelles millénaires, protégée par la couche de végétation vivante. Cette couche, cependant, reste dans un état de flux constant car elle s'adapte aux changements des

conditions ambiantes. Toutes les rétroactions ont cependant leurs limites. Si les conditions s'altèrent au point de dépasser la capacité de compensation du système, la boucle se rompt et le système glisse vers un nouvel état qui implique ou non le maintien d'une accumulation de tourbe.

La question la plus marquante, à propos de notre souci actuel concernant les tourbières et le changement climatique, est de savoir si les changements projetés sur les prochains 50-100 ans causeront la rupture de cette boucle de rétroaction pour au moins certains types de tourbières, donnant ainsi lieu à des dégradations inévitables et à la conversion de ces systèmes en quelque chose de complètement différent.

Photo 5 - Les tourbières de pente, comme celle du Yeun Ellez [29], pourraient faire partie des types de tourbières les plus touchés par les changements climatiques futurs (© G. Bernard)

Certains modèles ont déjà suggéré que certains types de tourbières, comme les tourbières de couverture d'Angleterre du nord, et potentiellement aussi de Bretagne (Photo 5), verraient leur extension significativement réduite, même pour les scénarios de changements climatiques modérés. Ce n'est cependant qu'une modélisation, et nous reviendrons plus loin sur les limites de tels exercices.

Une résilience déjà réduite par de nombreuses atteintes et destructions

En pratique, toutefois, le fait marquant concernant les écosystèmes tourbeux et le changement climatique est que nombre des tourbières du monde n'ont plus qu'une capacité affaiblie de résilience au changement, voire ont perdu cette capacité, car les impacts humains ont endommagé ou détruit les types de végétation permettant une telle résilience. Une tourbière active [en anglais, le mot 'mire', sans équivalent en français, les désigne] est une zone humide qui porte au moins une certaine végétation normalement productrice de tourbe.

Dans bien des parties du monde, la tourbe reste communément le seul composant de tels systèmes ayant encore survécu. Alors la tourbière, qui avait une résilience innée au changement, n'est plus qu'un dépôt de tourbe, portant une végétation incapable de former de la tourbe. Dans certains cas, ne portant même plus de végétation, la tourbe nue est directement exposée à l'atmosphère. Là où la végétation formatrice de tourbe est absente, il ne pourra y avoir de résilience, quelle que soit l'ampleur des changements climatiques qui se manifesteront.

De plus, il est important de reconnaître que les effets du changement climatique sur les tourbières et leurs systèmes seront influencés non seulement par les rétroactions qui leur sont propres et par l'état de la tourbière, mais aussi par le type de système tourbeux – fondamentalement, selon que le système est minérotrophe (le niveau d'eau est maintenu par des eaux souterraines ou de surface) ou ombrotrophe (la tourbière est alimentée par des apports directs de



Photo 6 - Le Poteau de Holme Fen, dans la réserve naturelle nationale éponyme, Comté du Cambridgeshire, RU. La tourbière de Holme est une tourbière bombée relictuelle, contrairement aux apparences. Quand la tourbière minérotrophe environnante a été drainée en 1953, le propriétaire a scellé un poteau dont le sommet était au niveau de la surface de la tourbière. Depuis lors, la tourbière s'est constamment asséchée, rétrécie et affaissée. L'actuelle surface sèche de la tourbière sur laquelle se tiennent ces personnes est située quelque 4m sous le sommet du poteau (© R. Lindsay)

précipitations, que ce soit sous forme de pluie, neige, brume, brouillard ou rosée – ces trois derniers étant qualifiés de précipitations déposées ou occultes). Clairement, une tourbière qui dépend des apports réguliers de précipitations pour maintenir sa résilience trouvera des conditions de plus en plus problématiques si ces apports diminuent. De même, une tourbière dépendant d'un apport constant d'eaux de surface souffrira si des proportions croissantes d'une eau se raréfiant sont accaparées pour l'irrigation agricole.

En vérité, c'est le contexte paysager qui fournit actuellement la plus grande menace à la survie des systèmes tourbeux, laquelle croitra encore avec un climat en mutation. C'est parce que beaucoup de tourbières, particulièrement en plaines, constituent de petits fragments de systèmes naguère plus vastes.

La tourbière survit en tant que 'point chaud' de biodiversité, dans une zone humide qui ne comporte plus de végétation de tourbière active. Elle est de ce fait généralement sujette au dessèchement et à l'oxydation de la tourbe et s'affaisse. La tourbe





Photo 7 - Vue du marais de ceinture de la réserve naturelle de Teič, Lettonie, depuis un mirador anti-incendie. La zone boisée de gauche est sur sol minéral, alors que la zone ouverte avec arbres rabougris dispersés à droite est la tourbière bombée. Entre les deux, le marais de ceinture (lagg) a une profondeur d'environ un mètre et porte des radeaux flottants de sphaignes (© R.Lindsay)

Déjà, plusieurs anciennes tourbières de plaines inondables ne survivent que parce que de l'eau leur est pompée depuis les terres agricoles environnantes, mais cela ne se fait souvent que lors de risques de crues dans les zones agricoles. Cela signifie que la tourbière reçoit des apports sporadiques d'eaux enrichies en engrais mais ne bénéficie jamais des apports d'eau soudains typiques des systèmes alluviaux. Avec des sécheresses accrues entrecoupées de tempêtes sévères, bien des systèmes de tourbières minérotrophes subiront un dessèchement prolongé lorsque que l'eau servira aux besoins agricoles, puis de courtes périodes d'inondations extrêmes. Chaque inondation tendra à accroître les exigences de la profession agricole envers un drainage accru et des mesures de prévention des crues, qui aggraveront les pertes de carbone et les taux de subsidence des sols tourbeux, tout en augmentant l'isolement hydrologique des fragments de tourbières ayant subsisté comme points chauds de biodiversité.

bombées comportant toujours un type de végétation productrice de tourbe. Dans bien des pays développés cependant, les tourbières bombées ont perdu leur marais de ceinture (= lagg) du fait d'un drainage agricole ou forestier, et les zones humides environnantes sont souvent passées à un usage agricole. Ce seul fait suffit à produire un affaissement progressif de tout le dôme tourbeux. Un accroissement des périodes de temps sec encouragera aussi des taux plus importants d'oxydation de la tourbe et une subsidence des terres tourbeuses environnantes à usage agricole. Cela abaissera encore le niveau de la nappe d'eau minérale sur laquelle la nappe de la tourbière bombée est perchée.

Dans le doute, agissons!!

Plusieurs de ces problèmes, qui sont plus immédiats que tout type de changement climatique prévisible durant les quelque 50 prochaines années, pourraient être réduits voire inversés si nous adoptions une stratégie visant à établir une gestion appropriée des sols tourbeux et habitats de tourbières. En permettant simplement une remise en eau

dans les zones tourbeuses à usage agricole, le taux de subsidence et de perte de carbone pourrait être réduit. Mais une approche vraiment durable consisterait à adopter un nouveau paradigme pour l'agriculture sur ces sols, qui cherche à profiter de ce que les zones humides sont parmi les écosystèmes les plus productifs de la planète. Rétablir une forme de système tourbeux dans de telles zones, avec l'objectif de récolter de nouveaux produits des zones humides basés sur de nouvelles technologies et de nouvelles demandes de matières premières, permettrait de fortement améliorer les niveaux de résilience à la fois des tourbières relictuelles constituant des points chauds et des sols tourbeux jusqu'ici utilisés en cultures 'à sec', une utilisation de l'espace fondamentalement inappropriée à de tels sols.

S'agissant de l'impact général du changement climatique sur les tourbières, il est important de souligner que les tourbières sont déjà reconnues comme étant le type de zones humides terrestres et littorales le plus répandu du monde. Les dernières estimations (Scharlemann et al., 2014) suggèrent que le carbone stocké

seulement dans la toundra et les tropiques dépassent de près de trois fois le carbone stocké dans toute la végétation du monde, et dépasse de 50% la quantité de carbone contenue dans l'atmosphère. Il est ainsi compréhensible que le destin de ce carbone face à un climat en mutation est vital, et que la modélisation des possibles effets de tels changements est très intéressante. Un tel travail est cependant entravé par la situation de la grande majorité des tourbières dans des zones peu habitées et d'accès difficile. Malgré leur vaste extension mondiale, les tourbières ont aussi souvent été négligées à un degré extraordinaire. Elles sont souvent classées avec d'autres habitats comme des landes, prairies ou forêts. Mais parfois, elles sont totalement ignorées, étant assimilées à des espaces délaissés, rarement voire jamais visités. Aussi manque-t-on souvent de données météorologiques appropriées, détaillées et obtenues spécifiquement pour les zones riches en tourbières. De même, relativement peu d'études détaillées ont porté sur toute la gamme de types d'écosystèmes tourbeux qui est progressivement décrite à travers le monde. Les modèles prévoyant des scénarios pour l'avenir probable des écosystèmes tourbeux sont rares. Ceux qui existent ont des faiblesses marquées, dues soit aux hypothèses sur lesquelles les modèles sont basés, soit aux données pouvant être utilisées pour valider le modèle.

Etant donnée l'incertitude associée tant aux prévisions climatiques elles-mêmes qu'aux modèles écosystémiques visant à prédire l'impact possible de tels changements sur les systèmes tourbeux, il est difficile de déterminer à l'heure actuelle l'utilité de telles approches pour la gestion durable de nos systèmes tourbeux. En mettant en balance l'incertitude grevant les possibles scénarios futurs d'effets sur le climat et l'évidence indéniable que les tourbières subissent déjà des dégradations substantielles du fait des usages actuels du territoire, il est très net qu'il faut réaliser dès maintenant des améliorations fortes de l'état de nos systèmes tourbeux, avec la conséquence heureuse qu'en restaurant la résilience de ces systèmes, nous les rendrons aptes à faire face aux défis que leur imposeront les changements climatiques, quels qu'ils soient.

Richard LINDSAY

Responsable de l'unité de recherche sur les tourbières de Sustainability Research Institute, University of East London, Royaume-Uni.
Courriel: r.lindsay@uel.ac.uk

Traduit de l'anglais par **Francis MULLER**

Bibliographie générale :

- Scharlemann, J.P.W., Tanner, E.V.J., Heiderer, R. and Kapos, V. (2014) *Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool*. *Carbon Management*, 5(1), 81-91, DOI : 10.4155/cmt.13.77
 - Rydin, H. and Jeglum, J.K. (2013) *The Biology of Peatlands* (2nd Edition). New York : Oxford University Press.
 - Charman, D.J. (2002). *Peatlands and Environmental Change*. Chichester : John Wiley & Sons.
 - Manneville, O., Vergne, V. & Villepoux, O. (2006) *Le monde des tourbières et des marais*. Delachaux et Niestlé.
 - Lindsay, R.A. (2010) *Peatbogs and Carbon: a critical synthesis*. London : University of East London.
- Disponible par chapitres sur : <http://www.uel.ac.uk/erg/PeatandCarbonReport.htm>

CarBioDiv : un projet de réhabilitation écologique innovant

« Restauration hydrologique de la tourbière de La Guette : effets sur l'évolution de la biodiversité et le stockage du carbone »

L'importance des tourbières en tant que puits de carbone (1/3 du stock de carbone des sols mondiaux), filtre des eaux de surface et réserve de biodiversité n'est plus à démontrer.

Plusieurs projets de réhabilitation voient ainsi le jour afin de restaurer les fonctions de ces écosystèmes si spécifiques. Le projet CARBIODIV s'inscrit parmi ceux-ci, et fait intervenir des opérations innovantes de génie écologique afin de tenter de rétablir les conditions éco-hydrologiques les plus favorables au fonctionnement d'une tourbière de Sologne.



(© F. Laggoun-Defarge)

Un site d'intérêt majeur malmené

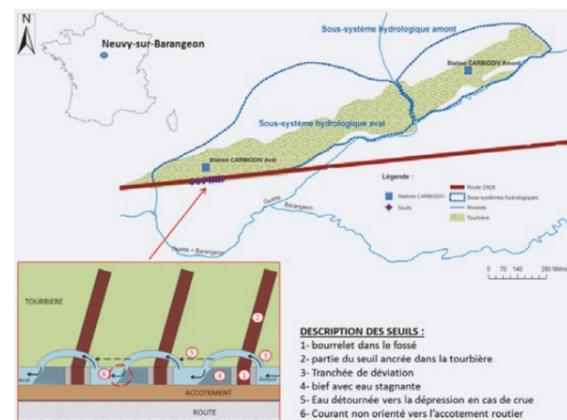
L'ancienne emprise du site de la tourbière de La Guette (Neuvy-sur-Barangeon, (18)), est actuellement traversée dans son ancienne partie aval par une route départementale. La présence de cette structure routière imperméable ainsi que ses aménagements annexes (canalisation d'adduction en eau potable et son fossé d'assainissement pluvial) provoquent depuis des décennies un drainage accru des eaux superficielles et souterraines de la tourbière vers le fossé. Ce dysfonctionnement hydrologique a été favorable à l'invasion de la végétation vasculaire 'banale' (molinie, bouleau) au détriment des espèces inféodées à ces milieux telles que les sphaignes. Ces végétaux perturbent la pérennité de cet écosystème notamment par l'action de leurs racines. À terme, cet envahissement pourrait modifier le fonctionnement de la tourbière et mettre en danger sa fonction de puits de carbone.

Des opérations innovantes de génie écologique au secours de la tourbière

Les objectifs du projet CARBIODIV sont de restaurer le fonctionnement hydrologique de la partie aval de la tourbière et d'appréhender les conséquences de la ré-humectation sur l'évolution de la biodiversité (végétation et faune) et des émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4). Le projet de génie écologique a été conçu par des bureaux d'études spécialisés en conformité avec la norme NF X 10-900 « Méthodologie de conduite de projet appliqué à la préservation et au développement des habitats naturels de zones humides et cours d'eau ». Ce projet consiste en l'installation de huit seuils en épis partant de l'axe du fossé longeant la route vers la tourbière. Les seuils sont constitués d'un mélange de sable et d'argile gonflante (bentonite) enveloppés dans du géotextile. Ces dispositifs devraient permettre de rétablir le fonctionnement hydrologique 'naturel' de la tourbière et notamment de :

- ✧ colmater les drains souterrains aux abords de la canalisation d'alimentation en eau potable ;
 - ✧ rehausser le niveau d'eau par paliers successifs pour limiter l'effet du rabattement de la nappe d'eau engendré par la route, notamment en période d'étiage.
- Les travaux ont été réalisés en début février 2014 par la société Environnement 41, spécialisée dans les interventions en milieux naturels aquatiques. Des études antérieures ont montré que la tourbière de la Guette est divisée en deux sous-systèmes hydrologiques a priori indépendants. Deux stations expérimentales ont donc été installées dans les sous-systèmes aval et amont respectivement dans et en dehors de la zone d'influence des travaux. Dans ces stations, un suivi mensuel au cours de la saison de végétation est actuellement opéré sur les différents compartiments de la tourbière : hydrologie et hydro-géochimie, biodiversité (végétation et macro-invertébrés, et émissions de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4)). Une expérimentation a spécifiquement été mise en place pour tester l'effet des travaux hydrologiques sur l'évolution de la végétation. Des parcelles de 2x2 m ont été étreppées (avec exportation des premiers 5-10 cm de tourbe). La surface est soit laissée nue pour suivre et caractériser une éventuelle recolonisation spontanée, soitensemencée avec des sphaignes. Pour chacun de ces deux traitements ainsi qu'une placette témoin, 4 réplicats ont été mis en place. Ce protocole a été réalisé à l'aval et à l'amont de la tourbière supposés être respectivement affecté et non affecté par les travaux. La température et la teneur en eau du sol sont suivies dans un réplicat de chaque traitement en continu (capteurs permanents et station d'acquisition).

Figure 1 - Schéma de fonctionnement des seuils



La tourbière de la Guette en quelques chiffres :

- ✧ une des plus vastes tourbières de Sologne en domaine public (23 ha) ;
- ✧ intégrée au périmètre ZNIEFF de type I n°240030831 « tourbière de la Guette » ;
- ✧ intégrée au site Natura 2000 « Sologne » ;
- ✧ labellisée Espace Naturel Sensible par le Conseil général du Cher en 2012 ;
- ✧ appartient depuis 2011, au Service National d'Observation TOURBIÈRES, réseau national de sites (Bretagne, Doubs, Ariège), labellisé par l'INSU/CNRS (Institut National des Sciences de l'Univers/Centre National de la Recherche Scientifique) ;
- ✧ 104 taxons botaniques inventoriés dans le site dont 62 sont strictement inféodés aux milieux humides ;
- ✧ 11 espèces patrimoniales y ont été rencontrées dont 8 font l'objet d'une protection régionale (*Rhynchospora fusca*, *Rhynchospora alba*, *Eriophorum angustifolium*, *Eriophorum vaginatum*, *Gentiana pneumonanthe*, *Salix repens*, *Schoenus nigricans*, *Trichophorum cespitosum*) et 3 d'une protection nationale (*Drosera intermedia*, *Drosera rotundifolia*, *Ranunculus lingua*) ;
- ✧ site instrumenté et suivi assuré depuis 2008 par l'Université d'Orléans/CNRS : sondes automatiques de mesure du niveau de la nappe d'eau, capteurs de température du sol, station météorologique...



Photo 8 - Organisation d'un seuil

- 1 - Bourrelet (extension de la tranchée) coffré par des plaques en béton et végétalisé en surface.
- 2 - Bief entre deux seuils.
- 3 - Chenal de dérivation.
- 4 - Tranchée comblée d'un mélange (sable + bentonite) enveloppé dans du géotextile.

LE PROJET CarBioDiv EN BREF

COORDINATEUR :
ISTO (Institut des Sciences de la Terre d'Orléans)

FINANCEURS :
la région Centre (APR-2012), le FEDER, le CG-18, le CNRS et l'Université d'Orléans

LABELLISE PAR :
le pôle de compétitivité Ecotechnologies DREAM Eau & Milieux

OBJECTIFS :
1) restaurer le fonctionnement hydrologique de la partie aval de la tourbière et,
2) appréhender les conséquences fonctionnelles de la ré-humectation sur l'évolution de la biodiversité

(végétation et faune) et des émissions de gaz à effet de serre.

PARTENAIRES :
✧ Laboratoires de recherche CNRS, Université d'Orléans : ISTO, LPC2E (Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace), CETRAHE (Cellule R&D d'Expertise et de TRANSfert en TRAçages Appliqués à Hydrogéologie et à l'Environnement) ;

PARTENAIRES ASSOCIES :
✧ des bureaux d'étude : SCOP Sagne, KAIROS compensation (Péchaudier, 81) et LIN'eco (Reconvilier, Suisse) ;
✧ des associations de naturalistes : SNE (Sologne Nature Environnement) et

CERCOPE (Coordination Entomologique de la région Centre pour l'Organisation de Projets d'Etudes) ;
✧ une entreprise de génie écologique : Environnement 41 (Blois).

Comité de pilotage de la tourbière
✧ ISTO
✧ Conseil général du Cher ;
✧ Conservatoire d'Espaces Naturels de la région Centre ;
✧ Communauté de Communes Villages & Forêts ;
✧ Mairie de Neuvy-sur-Barangeon ;
✧ Natura 2000 ;
✧ ONF.

Des premiers résultats encourageants

En ce qui concerne l'impact des travaux de restauration hydrologique, les chroniques piézométriques enregistrées après 2014 montrent une période de basses eaux bien moins prononcée que les années précédentes (cf. graphique 1).

Il est également possible de remarquer une nette différence entre les dynamiques d'assèchement au niveau des stations de mesures placées dans les sous-systèmes amont et aval. En effet, les battements de la nappe sont plus importants au niveau du sous-système amont (14 cm) que du sous-système aval (6,2 cm) (cf. graphique 2). Ces premières observations devront être confirmées par un suivi à plus long terme, prenant en compte plusieurs cycles hydrologiques et des conditions météorologiques différentes.

Quant au bilan carbone dissous, les premières mesures montrent que l'eau de la tourbière, au niveau de la station aval, présente des concentrations moins importantes en carbone organique dissous (COD) qu'au niveau de la station amont (cf. graphique 3), où les fluctuations

plus importantes du niveau de la nappe favoriseraient une remobilisation plus importante du carbone stocké.

Une intervention sur l'hydrologie de la tourbière permettrait donc bien de réduire l'exportation du carbone emprisonné dans la tourbière vers les compartiments environnementaux voisins (eaux de surface, atmosphère). Par ailleurs, les mesures de flux de gaz à effet de serre (CO_2 et CH_4) ne montrent, pour le moment, pas de différence significative entre les deux sous-systèmes. Ces résultats sont sûrement la conséquence de la forte pluviométrie mesurée en 2014, couplée au caractère récent des aménagements.

La poursuite du suivi permettra donc de clarifier l'effet des travaux de restauration sur les échanges gazeux entre la tourbe et l'atmosphère, en particulier lors des épisodes de sécheresse, période critique au cours de laquelle la tourbière est susceptible de devenir une source d'émission de CO_2 .

Le programme Life tourbières du Jura : réhabilitation fonctionnelle des tourbières du massif jurassien franc-comtois

Le programme Life « tourbières du Jura » vise à réhabiliter le fonctionnement d'un grand nombre de tourbières du massif jurassien franc-comtois.

D'une durée de six ans, il mobilise d'importants moyens afin de conduire l'un des plus ambitieux projets de restauration de tourbières en Europe. D'importants travaux vont être conduits dans cette perspective, dont notamment la neutralisation de fossés de drainage (16 km), la réhabilitation de cours d'eau (12 km), la régénération de zones d'extraction (7 ha) ou l'abattage de plantations de résineux (51 ha). L'objectif premier de ce programme est donc de restaurer la fonctionnalité des écosystèmes tourbeux en agissant principalement, de façon directe ou indirecte, sur le fonctionnement hydrologique.

2,6 millions de tonnes, c'est environ la quantité de GES émise en 2010 par la ville de Copenhague

(www.unep.org/pdf/OP_Feb/FR/OP-2010-02-fr-ARTICLE9.pdf)
<http://www.life-tourbieres-jura.fr>



Photo 9 - Pose de palissades pour la réhabilitation hydrologique de la tourbière « Sur les Seignes » à Frambouhans [25], un des premiers chantiers du programme (© G. BERNARD)

Grégory BERNARD

Chargé de missions scientifiques et techniques au Pôle-relais tourbières, Fédération des Conservatoires d'espaces naturels.
Courriel: gregory.bernard@reseau-cen.org

L'état des ressources disponibles sur le sujet au Pôle-relais tourbières

Ludivine COINCENOT,
Documentaliste au Pôle-relais tourbières

Le centre de documentation du Pôle-relais tourbières rassemble plus de 120 notices de documents ayant comme mots clés « changement climatique » et se rapportant aux tourbières. Cette thématique est abordée majoritairement dans des articles, des livres, des rapports et des contributions (présentations d'actes de colloques), soulignant l'importance des publications scientifiques, en langue anglaise principalement.

Un dossier thématique regroupant toutes les notices liées au changements climatiques et pollutions est accessible depuis la base de données documentaire du Pôle-relais tourbières (<http://pole-tourbieres.org:8080/dyn/portal/index.seam?page=home&fonds=2> / colonne de droite "dossiers thématiques")

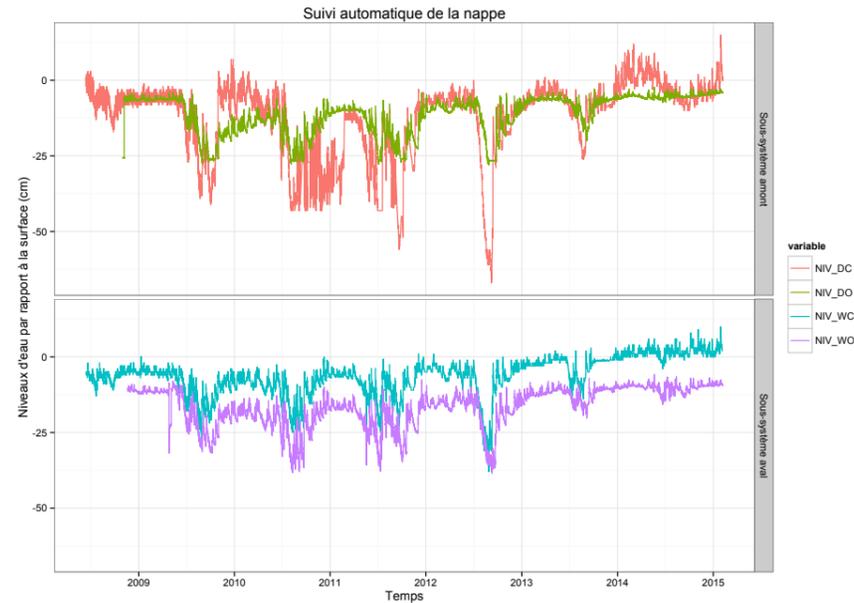
Une bibliographie « Les tourbières, puits et sources de carbone » est en cours de réalisation, et sera disponible sur la page « Changement climatique et pollutions » de notre site internet <http://www.pole-tourbieres.org/> (rubrique 'thématiques')

Quels liens avec le climat ?

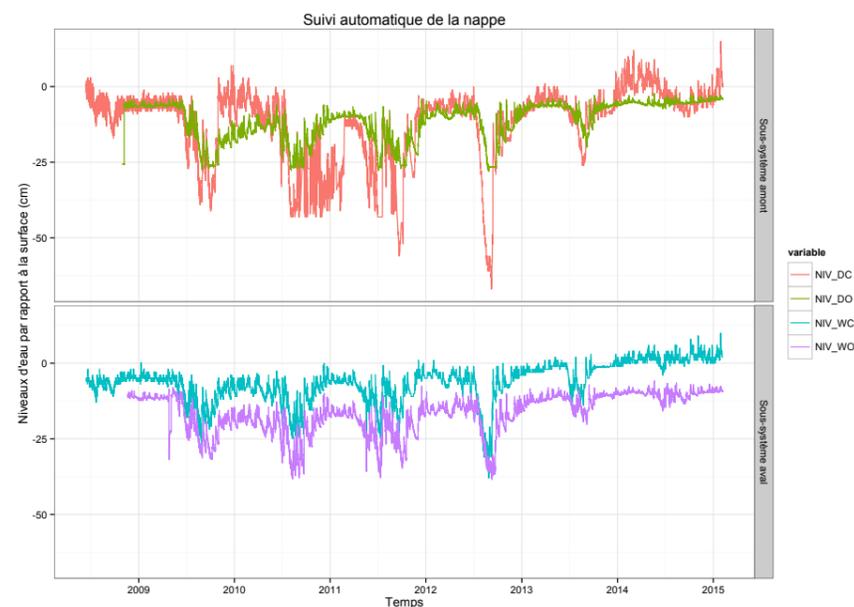
Outre l'impact sur la ressource en eau, la qualité des habitats naturels et la biodiversité associée, ces travaux devraient également avoir un effet sur le bilan carbone des sites. En effet, la remontée des niveaux de nappe devrait relancer l'activité turfigène de ces tourbières, c'est-à-dire relancer le processus de formation de la tourbe qui est à l'origine du stockage du carbone. De plus, la résilience (=résistance) de ces tourbières s'en voit aussi améliorée, permettant ainsi de mieux résister aux effets du réchauffement annoncé. Les projections de changement climatique établies pour l'Europe de l'Ouest prévoient une augmentation des températures, couplée à une réduction de la pluviométrie en période estivale. En France, les émissions sont estimées à 2,7 Mt de CO₂ en 2008 pour 1120 km² de tourbières dégradées, avec des émissions potentielles de 450 Mt dans le futur (Joosten, 2009).

Quelle contribution des tourbières de Franche-Comté dans ces émissions ?

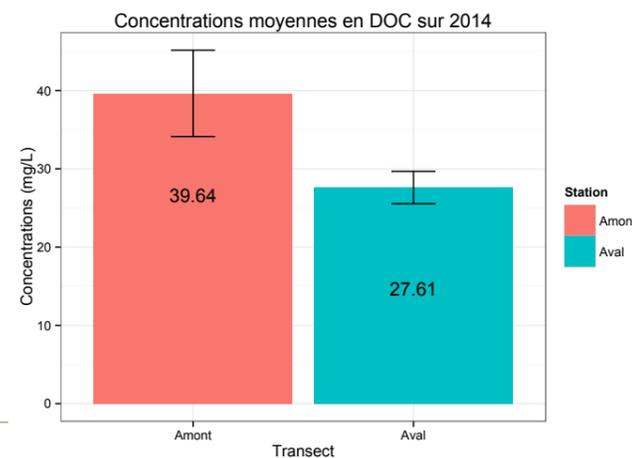
En 2014, la question de la quantité de carbone stockée dans les tourbières franc-comtoise a été soulevée dans le cadre d'un stage réalisé au Pôle-relais tourbières. Il s'agissait tout d'abord de réunir les données disponibles, notamment surfaces et profondeurs des tourbières franc-comtoises. Sur cette base, une première évaluation (relativement large) estime le stock de carbone des tourbières franc-comtoises à environ 2 600 000 tonnes. Outre cette première évaluation, les réflexions menées à l'occasion de ce stage ont également permis de déterminer les données manquantes et celles à préciser, pour améliorer cette estimation.



Graphique 1 - Évolution du niveau de la nappe dans la tourbière (DC et DO : sous-système amont ; WC et WO : sous-système aval)



Graphique 2 - Battements de la nappe au niveau des stations CARBIODIV en 2014 (en bleu : station aval ; en rouge : station amont)



Graphique 3 - Concentrations moyennes en Carbone Organique Dissous (COD) mesurées au niveau des stations expérimentales CARBIODIV en 2014

Fatima LAGGOUN-DEFARGE et Franck LE-MOING,
ISTO CNRS Orléans

Contact :
Fatima LAGGOUN-DEFARGE
(Chercheur CNRS, coordinatrice du projet)
02 38 49 46 63

Courriel :
fatima.laggoun@univ-orleans.fr

**Pôle-relais tourbières,
Fédération des Conservatoires d'espaces naturels,
Maison de l'environnement de Franche-Comté.**

7 rue Voirin

25000 BESANÇON

Tél 03 81 81 78 64

Courriel : contact@pole-tourbieres.org

Site : www.pole-tourbieres.org

« L'écho des tourbières » est une publication de la Fédération des Conservatoires d'espaces naturels, dans le cadre de l'animation du Pôle-relais tourbières.

Directeur de la publication : Pascal Vautier

Coordination : Grégory Bernard

Comité de lecture : Pascal Vautier, Bruno Mounier, Alain Salvi, André-Jean Francez, Francis Muller, Ludivine Coincenot, Stéphanie Blais, Grégory Bernard.

Photo de couverture : Station de recherche Peatwarm - RNR des Tourbières de Frasné-Bouverans [25] (© LIFE13NAT/FR/762) et marais de Vassiougan, dans la plaine de Sibérie occidentale, en Russie (© F. MULLER)

Conception graphique - Mise en page : Thibaut Gay - www.bleudemars.com - Besançon

Impression : Onlineprinters GMBH - DE814978904

Tirage : 2 000 exemplaires sur papier PEFC et FSC



**FOREST
STEWARDSHIP
COUNCIL**



climatiquement neutre

powered by ClimatePartner®

Impression | ID: 10170-1507-3088

CO₂ compensé : 436 kg

Ce numéro de l'Écho des tourbières a été réalisé grâce au soutien financier de :



ISSN : 1286-031X

