

Ecole doctorale Environnements-Santé
Dossier de projet de thèse « Contrat doctoral Etablissements »
ANNEE 2025

1) Renseignements administratifs sur la direction de thèse¹ (1 page maximum) :

Directeur de thèse HDR :

Nom : GILBERT

Prénom : Daniel

Grade : *PR Ex*

HDR : 2005. Discipline : *Ecologie*

Coordonnées (adresse, courriel, téléphone) : Campus la Bouloie 25030 BESANCON,

daniel.gilbert@univ-fcomte.fr,

Unité d'appartenance (intitulé, label, n°, directeur) : Chrono-environnement UMR 6249

Emilie Gauthier

Co-directeur de thèse éventuel :

Nom : JACOTOT

Prénom : Adrien

Section CNU : 67

Grade : *Docteur*

HDR : non ; oui Date de soutenance..... Discipline :

Coordonnées (adresse, courriel, téléphone) : Campus la Bouloie 25030 BESANCON,

adrien.jacotot1@gmail.com,

Unité d'appartenance (intitulé, label, n°, directeur) : Chrono-environnement UMR 6249

Emilie Gauthier

¹ ATTENTION : selon l'article 16 de l'arrêté du 25 mai 2016, le total d'encadrants ne peut pas dépasser 2, sauf si l'un des encadrants appartient au monde socio-économique, qui peut venir en sus, ou en cas de co-tutelle; Le décompte des co-encadrements se fera au prorata du nombre d'encadrants : 1 pour 1 encadrant, ½ pour deux encadrants.

2) Descriptif du projet de thèse (devra inclure les rubriques suivantes) :

- Laboratoire : Chrono-Environnement, UMR CNRS 6249
- Site : Besançon
- Encadrants : Daniel GILBERT (HDR), Adrien JACOTOT
- daniel.gilbert@univ-fcomte.fr

Titre :

Evaluation de l'effet de la restauration hydraulique des tourbières françaises sur les flux de gaz à effet de serre

Assessment of the effect of hydraulic restoration of French peat bogs on greenhouse gas flows

Résumé en français et anglais (limité chacun à 1800 caractères)

FRANÇAIS

Les tourbières jouent un rôle essentiel dans la régulation hydrologique et le stockage du carbone. Leur drainage et leur dégradation entraînent des modifications profondes de ces fonctions, notamment un abaissement de la nappe et une augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES). La restauration hydraulique des tourbières est une solution privilégiée pour enrayer ces dynamiques, mais ses effets réels sur la réduction des émissions de GES restent encore mal connus en France. Trois verrous posent en particulier problème :

- 1/ Quelles sont les surfaces des tourbières réellement impactées par la remise en eau ?
- 2/ Quelle est l'ampleur de la réduction des flux de GES dans les tourbières restaurées
- 3/ Est-il possible d'utiliser des outils de télédétection pour faciliter l'estimation de l'effet de la restauration hydraulique des tourbières ?

L'objectif de cette recherche sera donc de :

- 1/ Déterminer l'effet de la restauration hydraulique sur le régime hydrologique des tourbières, en combinant mesures de terrain et télédétection.
- 2/ Quantifier l'impact de la remise en eau sur les flux de GES à différentes échelles spatiales et temporelles.
- 3/ Proposer des indicateurs permettant d'évaluer l'efficacité des actions de restauration en lien avec la Stratégie Nationale Bas-Carbone et les objectifs de conservation des milieux humides, notamment dans la perspective d'un modèle économique de compensation carbone.

En combinant approches de terrain, modélisation et analyses satellitaires, cette étude fournira des outils d'aide à la décision pour les gestionnaires et les politiques publiques engagées dans la préservation des tourbières.

ENGLISH

Peatlands play an essential role in hydrological regulation and carbon storage. Draining and degrading peatlands leads to profound changes in these functions, notably a lowering of the water table and an increase in greenhouse gas (GHG) emissions. Hydraulic restoration of peatlands is a favoured solution for halting these dynamics, but its real impact on reducing

greenhouse gas emissions is still poorly understood in France. In particular, there are three key issues:

- 1/ How much of the surface area of peatlands is actually impacted by re-watering?
- 2/ What is the extent of the reduction in GHG flows in restored peatlands?
- 3/ Is it possible to use remote sensing tools to help estimate the effect of hydraulic restoration of peatlands?

The aim of this research will therefore be to:

- 1/ Determine the effect of hydraulic restoration on the hydrological regime of peatlands, by combining field measurements and remote sensing.
- 2/ To quantify the impact of hydraulic restoration on GHG flows at different spatial and temporal scales.
- 3/ To propose indicators for assessing the effectiveness of restoration actions in line with the National Low-Carbon Strategy and wetland conservation objectives, particularly with a view to developing an economic model for carbon offsetting.

By combining field approaches, modelling and satellite analyses, this study will provide decision-support tools for managers and public policies committed to preserving peatlands.

Domaine de compétence : Ecologie, Géographie (SIG), éventuellement hydrologie

Mots clés : Tourbières, Restauration hydraulique, Atténuation du changement climatique

Financement du projet : Le projet de recherche sera financé par le projet Carbonium (PEPR FAIRCARBON) à hauteur de 10 000 euros. Une partie importante des données (flux de GES) est déjà acquise dans le cadre du projet LIFE tourbières du Jura qui finance les suivis. Si nécessaire, des demandes complémentaires seront faites auprès de financeurs privés et d'ONG dans le cadre des dispositifs liés à la compensation carbone. Une partie importante des données a déjà été acquise par les partenaires du projet.

Connaissances et compétences requises : Fonctionnement des tourbières, écologie générale, écologie du carbone, systèmes d'informations géographiques, hydroécologie.

Description du projet :

Les tourbières sont des zones humides caractérisées par une accumulation progressive de matière organique partiellement décomposée. Cette accumulation résulte d'un déséquilibre entre la production et la décomposition de la matière végétale et la saturation en eau du milieu créant des conditions anaérobies qui ralentissent considérablement l'activité des micro-organismes décomposeurs (Joosten et al., 2017). On considère qu'une tourbière accumule 0,5 à 1 mm de tourbe par an (Joosten, 2016; Minasny et al., 2019), soit un dépôt pouvant atteindre plusieurs mètres au fil des millénaires. Les tourbières sont ainsi l'écosystème terrestre avec la plus forte densité de carbone par hectare, entre 1000 et 2000 kg C ha⁻¹. Dans le monde, les tourbières stockent 450 à 650 Gt C (United Nations Environment Programme, 2022), représentant 34 à 43% du carbone organique contenu dans l'ensemble des sols (Parish et al., 2008). Dans certaines régions du monde, les tourbières ont subi d'importantes dégradations. L'Europe se distingue comme le continent le plus affecté, avec 48% de ses tourbières dégradées (hors Russie européenne), principalement en raison de pratiques de drainage intensives liées à l'agriculture et la foresterie (Tanneberger, Moen, et al., 2021). En premier lieu, le drainage conduit à un abaissement du niveau de la nappe d'eau, exposant la couche supérieure de la tourbe à l'air. Or, la tourbe soumise à ces conditions aérobies subit des transformations physico-chimiques, notamment une oxydation accélérée de la matière organique. Ce phénomène s'accompagne d'une subsidence (tassement et affaissement progressif du sol tourbeux). Ces altérations diminuent la capacité de rétention d'eau de la tourbe et modifient sa conductivité hydraulique (Sinclair et al., 2020). Si les effets hydrologiques du drainage sont presque immédiats, la réponse des communautés végétales suit une temporalité plus lente. Néanmoins, à long terme, ces modifications hydrologiques provoquent des changements profonds dans la composition floristique des tourbières et on observe une transition progressive, marquée par le recul puis la disparition des espèces spécialistes adaptées aux conditions particulières des tourbières intactes (e.g. sphaignes, linaigrettes, droséras) au profit d'espèces plus généralistes et moins hygrophiles (Weltzin et al., 2000; Haapalehto et al., 2011). Enfin, les conséquences de l'abaissement du niveau de nappe induit par le drainage transforme le fonctionnement biogéochimique de la tourbière, provoquant une inversion de son bilan carbone : d'un écosystème séquestrant du carbone (puits), la tourbière se transforme en émettrice nette de gaz à effet de serre (source) (Couwenberg et al., 2011; Tiemeyer et al., 2020; Evans et al., 2021). En prenant l'exemple des tourbières allemandes, une tourbière perturbée émet entre 5,7 t CO_{2eq} ha⁻¹.an⁻¹ et 43,4 t CO_{2eq} ha⁻¹.an⁻¹ en fonction de l'usage des sols et de l'intensité de la perturbation. La question des émissions de GES issus des tourbières dégradées n'est pas anodine : à l'échelle mondiale, les tourbières perturbées émettent annuellement 1,91 Gt CO_{2eq} (Leifeld & Menichetti, 2018), soit plus que les émissions totales dues au trafic aérien.

Dans ces conditions, des programmes ambitieux de restauration des tourbières ont été initiés depuis les années 1990 dans plusieurs régions du monde. Ces actions de restauration reposent principalement sur la technique de remise en eau de la tourbière (*rewetting*) qui consiste à rehausser le niveau de la nappe des écosystèmes drainés généralement par le comblement ou l'obstruction des fossés de drainage et la création de barrages adaptés (Darusman et al., 2023). Cette approche permet de rétablir rapidement certaines conditions environnementales abiotiques essentielles, notamment en recréant des conditions d'anoxie près de la surface du sol, condition fondamentale pour stopper la minéralisation accélérée de la tourbe. Toutefois, la restauration du système biotique -incluant le retour des communautés végétales et microbiennes caractéristiques des tourbières intactes- s'inscrit dans une temporalité beaucoup plus longue et suit des trajectoires parfois imprévisibles (Darusman et al., 2023). Les actions de restauration sont également très efficaces pour réduire les flux de GES résultant des processus de décomposition de la matière organique par les microorganismes, car le rehaussement de la nappe réduit la taille de la zone en aérobiose où la décomposition microbienne génère d'importantes quantités de CO₂. En conséquence, une tourbière réhabilitée voit ses émissions chuter à seulement 1,8 à 6,8 t CO_{2eq} ha⁻¹.an⁻¹ (Bonn et al., 2014).

Malgré ces bénéfices évidents, Cortina-Segarra et al. (2021) soulignent que la restauration des tourbières en Europe se heurte à un triple défi : financier, technique et écologique. Moxey & Moran (2014) révèle un paradoxe intéressant dans la rentabilité des projets de restauration : les interventions ciblant les tourbières les plus sévèrement dégradées offrent le meilleur rapport coût-bénéfice. Cette relation entre niveau de dégradation initiale et rentabilité des interventions suggère une priorisation stratégique des sites à restaurer pour optimiser l'utilisation des ressources financières limitées. De plus, la capacité à évaluer l'efficacité des mesures de restauration est primordiale car elle conditionne le montant des revenus générés, qu'ils proviennent de financements publics ou de compensations carbone d'entreprises privées. Cette réalité économique plaide en faveur de l'acquisition d'indicateurs fiables concernant l'efficacité réelle des actions de restauration (avantages écologiques) et les coûts de restauration. Malheureusement, ces données cruciales restent insuffisamment documentées à grande échelle et manquent souvent de la résolution spatiale et temporelle nécessaire pour guider efficacement les décisions de restauration et d'investissement.

Plus précisément, plusieurs verrous s'opposent au financement des projets de restauration :

1/ Quelles sont les surfaces des tourbières réellement impactées par la remise en eau ?

En effet, les interventions de restauration n'affectent effectivement qu'une fraction de la superficie totale d'une tourbière ciblée, alors que la surface réellement restaurée détermine directement la quantité de GES évités et, donc, les contributions financières exigibles.

2/ Quelle est l'ampleur de la réduction des flux de GES dans les tourbières restaurées ?

De nombreux travaux de recherche ont été menés en Allemagne ou au Royaume-Uni quantifiant la réduction des émissions de GES suite aux interventions de restauration. Cependant, la France présente un déficit remarquable de recherches sur ce sujet, alors que ses contextes climatiques distincts pourraient influencer différemment la dynamique des flux de carbone dans les tourbières restaurées.

3/ Est-il possible d'utiliser des outils de télédétection pour faciliter l'estimation de l'effet de la restauration hydraulique des tourbières ? La généralisation des travaux de restauration nécessite l'accès à des données collectées à grande échelle, à moindre coût et sur de longue période. L'exploitation des images satellitaires, notamment celles fournies par le programme Sentinel-2, offrirait une solution particulièrement adaptée pour répondre efficacement à ces exigences de suivi spatial et temporel.

L'objectif de cette recherche sera donc de :

1/ Déterminer l'effet de la restauration hydraulique sur le régime hydrologique des tourbières, en combinant mesures de terrain et télédétection,

2/ Quantifier l'impact de la remise en eau sur les flux de GES à différentes échelles spatiales et temporelles en s'appuyant sur des mesure *in-situ* (état de conservation du sol) et sur des proxys issus de la télédétection (indice chlorophyllien).

3/ Proposer des indicateurs permettant d'évaluer l'efficacité des actions de restauration en lien avec la Stratégie Nationale Bas-Carbone et les objectifs de conservation des milieux humides, notamment dans la perspective de validation d'un modèle économique de compensation carbone.

Ces travaux s'appuieront sur les programmes de restauration déjà effectués et en cours de réalisation notamment dans le massif du Jura (2 projets Life), mais aussi un peu partout en France avec les 150 partenaires avec lesquels nous avons réalisé l'inventaire des tourbières françaises (Thèse Lise Pinault). Ils concerneront aussi les 4 sites du SNO Tourbières auxquels il faut ajouter deux nouveaux sites instrumentés avec des tours à flux en Brière et dans le Cotentin. Une partie importante des données est donc déjà acquise. Enfin, ce projet sera réalisé en collaboration avec les chercheurs du projet CARBONIUM, financé par le PEPR FAIRCARBON. Une dizaine de sites pilotes seront identifiés en France sur lesquels un suivi hydrologique et des flux de GES sera réalisé en partenariat avec les gestionnaires locaux. Une cinquantaine d'autres sites restaurés seront utilisés pour les analyses à plus grande échelle.