

Rapport de stage M1 AETPF

Caractérisation de la dégradation des tourbes alcalines des vallées de la Somme et de l'Authie (Hauts-de-France)



Soraya Perréard—Garin

Encadrants :

Dr. **BRASSEUR Boris**, Maître de conférences - UMR 7058 – EDYSAN – Ecologie et Dynamiques des Systèmes Anthropisés – Université de Picardie Jules Verne

Dr. **BERQUER Adrien**, Chargé d'Etudes Scientifiques LIFE Anthropofens – Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France

Stage réalisé du 20 mai au 19 juillet 2024

Engagement de non plagiat

① Principes

- Le plagiat se définit comme l'action d'un individu qui présente comme sien ce qu'il a pris à autrui.
- Le plagiat de tout ou parties de documents existants constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée
- Le plagiat concerne entre autres : des phrases, une partie d'un document, des données, des tableaux, des graphiques, des images et illustrations.
- Le plagiat se situe plus particulièrement à deux niveaux : Ne pas citer la provenance du texte que l'on utilise, ce qui revient à le faire passer pour sien de manière passive ; recopier quasi intégralement un texte ou une partie de texte, sans véritable contribution personnelle, même si la source est citée.

② Consignes

- Il est rappelé que la rédaction fait partie du travail de création d'un rapport ou d'un mémoire, en conséquence lorsque l'auteur s'appuie sur un document existant, il ne doit pas recopier les parties l'intéressant mais il doit les synthétiser, les rédiger à sa façon dans son propre texte.
- Vous devez systématiquement et correctement citer les sources des textes, parties de textes, images et autres informations reprises sur d'autres documents, trouvés sur quelque support que ce soit, papier ou numérique en particulier sur internet.
- Vous êtes autorisés à reprendre d'un autre document de très courts passages in extenso, mais à la stricte condition de les faire figurer entièrement entre guillemets et bien sûr d'en citer la source.

③ **Sanction** : En cas de manquement à ces consignes, le responsable du M1 AETPF se réserve le droit d'exiger la réécriture du document. Dans ce cas, la validation de l'Unité d'Enseignement ou du diplôme de fin d'études sera suspendue.

④ Engagement :

Je soussigné Perréard—Garin Soraya

Reconnais avoir lu et m'engage à respecter les consignes de non plagiat

À Paris le 25/07/2024

Signature :



Remerciements

Avant tout, j'aimerais remercier Adrien Berquer, pour m'avoir guidé sur le terrain, appris à réaliser des sondages au carottier russe et pour tout le temps passé à m'initier et réaliser des modèles statistiques. Ce n'était pas simple, mais j'ai presque pris goût aux statistiques et à l'utilisation de R depuis.

Je remercie grandement Boris Brasseur, pour tous les conseils avisés, les explications sur un coin de table, ainsi que tous les échanges passionnants sur les tourbières et leur histoire dans les Hauts-de-France. Venant d'une formation agricole ce n'était pas mon domaine de prédilection, mais j'ai pris beaucoup de plaisir à découvrir le fascinant, et très complexe monde des tourbières.

Pour terminer, merci à Mattéo Jidal, stagiaire de L3, pour m'avoir accompagné sur le terrain et grandement aidé pour les analyses en laboratoire.

Résumé

Les tourbières sont des écosystèmes produisant de la tourbe et nécessitant un niveau d'eau coïncidant avec la surface la majeure partie de l'année. Or les activités anthropiques telles que le drainage, l'extraction de tourbe et l'utilisation des terres les ont grandement dégradées et modifiées leurs propriétés physico-chimiques. L'objectif principal de ce travail était de caractériser l'état de dégradation des tourbières alcalines des vallées crayeuses des Haut-de-France.

Pour cela, la base de données d'une précédente étude réalisée en 2023 a été utilisée et complétée. Cinq sites répartis dans la vallée de la Somme et la vallée de l'Authie ont été étudiés et au total 146 échantillons ont été prélevés sur 24 sols entre 10 et 200 cm de profondeur. Les caractéristiques physico-chimiques sur le terrain et en laboratoire ont été étudiées.

Les premiers résultats ont montré une diminution du taux de matière organique et du ratio C/N, ainsi qu'une augmentation du taux de matière minérale siliceuse et du taux de phosphore total à proximité de la surface traduisant du gradient de dégradation des tourbes au sein du profil de sol. L'étude des chroniques piézométriques ont permis d'établir un lien positif entre les niveaux d'eau moyens et les taux de matière organique. Enfin une relation de type cubique a été déterminée pour mieux décrire le lien entre les taux de matière organique et carbone organique des sols tourbeux.

Pour conclure, l'hypothèse retenue est que l'enrichissement en phosphore total, et en matière minérale siliceuse, ainsi que des valeurs basses pour le ratio C/N et le taux de matière organique à la surface, soient le résultat de l'altération des horizons histiques limoneux.

Abstract

Peatlands are ecosystems that produce peat and require a water level coinciding with the surface for most of the year. However, human activities such as drainage, peat extraction, and land use have greatly degraded them and altered their physicochemical properties. The main objective of this study was to characterize the state of degradation of alkaline peatlands in the chalk valleys of Hauts-de-France.

For this purpose, the database from a previous study conducted in 2023 was used and supplemented. Five sites distributed in the Somme Valley and the Authie Valley were studied, and a total of 146 samples were taken from 24 soils at depths ranging from 10 to 200 cm. The physicochemical characteristics in the field and laboratory were examined.

The initial results showed a decrease in organic matter content and the C/N ratio, as well as an increase in siliceous mineral matter content and total phosphorus content near the surface, indicating a gradient of peat degradation within the soil profile. The study of piezometric records established a positive correlation between average water levels and organic matter content. Finally, a cubic relationship was determined to better describe the link between organic matter content and organic carbon in peat soils.

In conclusion, the retained hypothesis is that the enrichment in total phosphorus and siliceous mineral matter, along with low values for the C/N ratio and organic matter content at the surface, are the result of the alteration of silty histic horizons.

Abréviations

AP : avant présent (référence 1950)

C : Carbone

Corg : Carbone organique

MMs : Matière minérale siliceuse

MO : Matière organique

P : Phosphore

Ptot : Phosphore total

N : Azote

Sommaire

Remerciements.....	ii
Résumé	iii
Abstract.....	iv
Abréviations	v
Table des figures.....	viii
Introduction	1
Partie 1 : Etat de l'art.....	3
1. Les tourbières et leurs Histosols	3
1.1 Formation et caractéristiques des tourbes alcalines d'Europe.....	3
1.2 Définition pédologique	4
2. Dégradation et processus.....	5
2.1 Facteurs de dégradation	5
2.2 Caractérisation de la dégradation des tourbes	5
Partie 2 : Plan expérimental.....	6
1. Matériels.....	6
1.1 Description des sites.....	6
1.2 Matériel pédologique	6
1.2.1 Caractéristiques des prélèvements	6
1.2.2 Mesures de terrain	7
1.2.3 Analyses laboratoire	7
1.2.3.1 Fibres frottées	7
1.2.3.2 Densité volumique.....	7
1.2.3.3 Matière organique	7
1.2.4 Analyses réalisées en externe	8
1.2.5 Traitement des données pédologiques	8
1.3 Matériel hydrologique.....	9
1.3.1 Relevés des données	9
1.3.2 Traitement des données hydrologiques	9
1.4 Construction de l'indice de couvert arboré	10

2. Méthodes statistiques	10
2.1 Exploration des données	10
2.2 Réalisation des modèles	10
3. Résultats	12
3.1 Chroniques piézométriques	12
3.2 Classification des sols et horizons selon le Référentiel pédologique français	12
3.3 Relation entre propriétés physico-chimiques, profondeur et hydrologie	13
3.3.1 <i>Matière organique</i>	14
3.3.2 <i>C/N</i>	18
3.3.3 <i>Matière minérale siliceuse</i>	19
3.3.4 <i>Phosphore</i>	20
3.3.4.1 <i>Indice de couvert arboré</i>	22
3.3.4.2 <i>Phosphore et matière minérale siliceuse</i>	23
3.4 Calcul du facteur de conversion du carbone organique en matière organique	25
4. Discussion	27
4.1 Propriétés des tourbes en fonction de la profondeur	27
4.2 Matière organique et niveau d'eau	28
4.3 Vers une alternative à la constante 1.724	28
5. Conclusion	30
Bibliographie	31
Annexe 1 : Échelle de décomposition des horizons histiques selon von Post	36
Annexe 2 : Indice de couvert arboré par point de sondage et site entre 1947 et 2021. 37	
Annexe 3 : Statistiques des modèles entre la profondeur (cm) et le nombre d'heures émergées.	38

Table des figures

Figure 1 : Photos d'espèces représentatives des tourbières basses alcalines. a) Laîche écailleuse, b) <i>Scorpidium cossonii</i> , c) Jonc subnobleux	4
Figure 2 : Schéma de détermination du type d'horizon histique (HF = horizon fibrique, HM = horizon mésique, HS = horizon mésique) selon le volume de racines exclues	4
Figure 3 : Localisation des sites étudiés. Nom du site et son abréviation.....	6
Figure 4 : Chroniques piézométriques de septembre 2022 à juin 2024 sur les 5 sites étudiés	12
Figure 5 : Type d'horizon en fonction de la profondeur réelle par site. Pour un soucis de compréhension les groupes de points ont été éclatés et seulement les types d'horizons majoritaires sont représentés.	13
Figure 6 : Matrice de corrélation entre les variables calculées et coefficients de corrélation par la méthode Spearman sur l'ensemble des données. Où Ptot_g100g, taux_mm_sans_calcaire, ph, densite_apparente, heures_emergees, Ntot_gkg, nProfondeur_reelle, taux_ff_200pour, CN, teneur_eau_pour et taux_mo_corr_pourc, sont respectivement le taux de phosphore total ($\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$), matériel minéral siliceux ($\text{g}\cdot \text{kg}^{-1}$), pH, densité volumique, heures émergées, azote total ($\text{g}\cdot \text{kg}^{-1}$), profondeur réelle de l'échantillon, teneur en fibres frottées à 200 μm (%), C/N, teneur en eau (%) et taux de matière organique corrigé (%).....	14
Figure 7 : Taux de matière organique (%) en fonction de la profondeur et par profil de sol/sondage. ABB, DOU, LON, MOR et ROU sont respectivement les sites de l'Abbevilleois, Douriez, Long, Morcourt et Roussent. Le numéro correspond au numéro de sondage et la ligne horizontale bleue représente le niveau moyen de la nappe au sondage.	15
Figure 8 : Taux de matière organique (%) en fonction de la profondeur (cm) de l'échantillon de sol et coloriés par site.....	16
Figure 9 : Relation par profondeur entre taux de matière organique en fonction du niveau annuel moyen de la nappe d'eau (cm par-rapport à la surface du sol).....	17
Figure 10 : Rapport C/N en fonction de la profondeur (cm) par site.....	18
Figure 11 : Matière minérale siliceuse ($\text{g}\cdot \text{kg}^{-1}$) en fonction de la profondeur (cm) par site.....	19
Figure 12 : Phosphore total ($\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$) en fonction de la profondeur (cm) par site.....	20
Figure 13 : Relation quadratique entre le phosphore total ($\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$) et la profondeur (cm) par site	20
Figure 14 : Phosphore total ($\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$) en fonction de l'indice de couvert arboré pour les profondeurs 10 et 50 cm.....	23
Figure 15 : Relation entre phosphore total/matière minérale siliceuse et la profondeur par site	25

Figure 16 : Relations entre le carbone organique et la matière organique. En noire, le carbone organique mesuré en externe et la matière organique déduite à l'aide du coefficient 1.724. En rouge, la relation cubique entre les taux de matière organique mesurés au laboratoire EDYSAN et les taux de carbone organique mesurés en service externe.26

Introduction

Les tourbières sont des zones humides disposant d'une végétation adaptée à la saturation en eau et caractérisées par une accumulation de matière organique (MO) pas ou peu décomposée, appelée tourbe. L'accumulation des tourbes est très lente et nécessite des niveaux d'eau coïncidant avec la surface du sol la majeure partie de l'année (AFES 2009). A l'échelle mondiale les tourbières couvrent 400 millions d'hectares, soit 3% de la surface terrestre mondiale (Convention sur les zones humides 2021a). Leur conservation de tourbes riches en carbone organique (Corg) font d'elles le plus grand réservoir pédologique de carbone mondial, 550 Gt de C sont stockées, ce qui représente 30% du carbone des sols mondiaux (Parish et al. 2008).

Située dans les Hauts-de-France, la vallée de la Somme est considérée comme le plus grand système tourbeux alcalin d'Europe du Nord-Ouest (Garcia, Antoine, Brasseur 2022). En 2017, 13100 hectares de tourbières et marais de la haute et moyenne vallée de la Somme ainsi que de l'Avre (affluent de la Somme) ont été labélisés comme site Ramsar, traduisant la reconnaissance à l'international de l'importance du site (Ramsar 2014). Puis en 2019, le projet LIFE ANTHROPOFENS coordonné par le Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France a été mis en place afin de préserver et réhabiliter les tourbières alcalines des Hauts-de-France et de Wallonie. En effet les interventions humaines telles que le drainage et le changement d'affectation des terres ont entraîné un abaissement des niveaux d'eau voir l'assèchement des tourbières, modifiant ainsi leurs conditions physico-chimique (Byrne et al. 2004). La tourbe soumise à l'oxydation puis à la respiration microbienne, se dégrade/minéralise, transformant les tourbières autrefois puits en sources de C. Aujourd'hui ces dernières (les tourbières drainées) représentent 0,4% de la surface du monde mais sont responsables de 5% des émissions anthropiques de CO₂ (Tanneberger et al. 2021). Pour inverser la tendance et redonner aux tourbières dégradées leur capacité de stockage, la réhumidification des tourbières drainées est une solution (Wilson et al. 2016). En se dégradant, les caractéristiques physiques et chimiques changent, les horizons superficiels s'appauvrissent en MO (Cubizolle 2019; Leifeld, Steffens, Galego-Sala 2012), la quantité de matière minérale augmente dans la MO restante (Zeitz, Veltz 2002) entraînant l'augmentation de la densité volumique (Kechavarzi, Dawson, Leeds-Harrison 2010). Les concentrations en phosphore (P) augmentent aussi dans les couches superficiels (Zak, McInnes, Gelbrecht 2016) tandis que le rapport C/N baisse (Malmer, Holm 1984).

L'étude d'Hemery (2023) a permis de décrire des horizons superficiels plutôt dégradés associés à des taux de MO plus faibles mais n'a pas permis de réaliser un lien avec la profondeur des niveaux d'eau. De plus l'hétérogénéité des valeurs obtenues et l'absence de

prélèvement à la profondeur critique de -25cm n'ont pas permis de dégager des évolutions verticales claires. Les objectifs de cette présente étude sont i) d'avancer dans la description des profils de sols tourbeux complétés de la profondeur -25cm, ii) d'étudier ces profils avec des paramètres analytiques reflétant l'altération, tels que le rapport C/N, la quantité de matière minérale siliceuse (MMs) et le phosphore total (P_{tot}), iii) tester encore l'hypothèse d'un lien entre profondeur des niveaux d'eau actuel et l'altération des MO, grâce à des chroniques piézométriques plus complètes. Par-ailleurs un nouveau modèle de conversion permettant de calculer le C_{org} à partir du taux de MO sera proposé pour les horizons tourbeux. En-effet il est utile de pouvoir déduire le C_{org} à partir du taux de MO mais la constante de conversion (1.724) classiquement utilisée semble inappropriée dans notre cas d'étude (Pribyl 2010).

Partie 1 : Etat de l'art

1. Les tourbières et leurs Histosols

1.1 Formation et caractéristiques des tourbes alcalines d'Europe

Lorsque les conditions sont favorables dans la vallée de la Somme, les tourbes peuvent croître de 0,5 à 2 mm par an (Garcia 2024). Pour cela, leur formation appelée turfigénèse, nécessite un engorgement quasi-permanent des sols limitant la présence d'oxygène et un apport de matières organiques (MO) végétales supérieur à la quantité décomposée. Ces deux conditions sont contrôlées par plusieurs facteurs : le climat qui au-travers de la température et de la pluviosité va impacter directement la décomposition de la MO, la topographie, le substrat géologique ainsi que la composition végétale (AFES 2009).

L'alimentation en eau des tourbières peut provenir des précipitations atmosphériques directes, elles sont dites ombrotrophes, ou indirectes via des eaux souterraines, appelées minérotrophes. Cette différence impacte le pH et les composants dissous de ces dernières (ex : Ca^{2+} , CO_3^{2-}). Les ombrotrophes sont fortement acides tandis que les minérotrophes sont faiblement acides à alcalines suivant le substrat géologique hébergeant les nappes souterraines (Convention sur les zones humides 2021b).

La tourbière telle qu'elle est présente dans les grandes vallées crayeuses des Hauts-de-France est représentée par des tourbières basses alcalines (fen en anglais) et qualifiée de fluviogène minérotrophe alcaline. Son alimentation en eau provient de la nappe phréatique dont l'aquifère est situé dans un substrat crayeux rendant l'eau alcaline (Garcia, Antoine, Brasseur 2022).

Plusieurs habitats sont typiques des tourbières alcalines des Hauts-de-France. Ceux-ci dépendent d'un gradient croissant de trophie et d'émergence du substrat : Végétation à mousses brunes (*Scorpidium* spp.) et petits *Carex*, Bas marais à *Hydrocotyle* et *Jonc subnoduleux* ou à *Roseau* et *Fougère des marais*, *Magnocariçaies* (*Carex elata*, *C. acutiformis*, *C. paniculata*), *Cladiaies* à *Marisques*, *Grandes roselières*, *Prairies à Molinia caerulea*, fourrés de saules, voire habitats forestiers boisés (Figure 1)(Berquer 2024).



Sources : a) Sébastien Mailler (CEN HDF), b) Jean Christophe Hauguel, (CBNBL), c) Antoine Gazaix (CEN HDF)

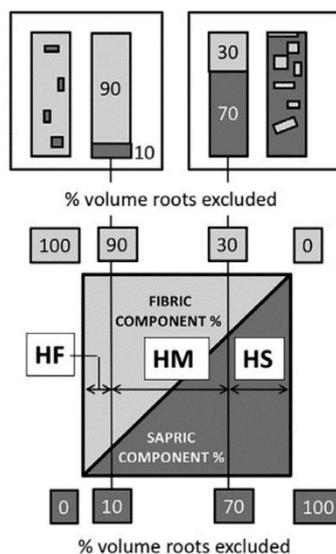
Figure 1 : Photos d'espèces représentatives des tourbières basses alcalines. a)

Laïche écailleuse, b) *Scorpidium cossonii*, c) *Jonc subnobleux*

1.2 Définition pédologique

Le solum rattaché aux tourbières est appelé Histosol. Entre 40 et 120cm de profondeur, il est composé très majoritairement d'horizons histiques notés H. Ces derniers ont des teneurs en cendres après calcination inférieures à 50%.

Il existe plusieurs types d'horizons H, les horizons sapriques (Hs), les horizons mésiques (Hm), et les horizons fibriques (Hf). La différence entre ces derniers est la proportion des différentes composantes sapriques (MO fines dégradées) et fibriques (fibres végétales) (Figure 2).



Source : D'après Zanella et al. (2018)

Figure 2 : Schéma de détermination du type d'horizon histique (HF = horizon fibrique, HM = horizon mésique, HS = horizon mésique) selon le volume de racines exclues

2. Dégradation et processus

2.1 Facteurs de dégradation

Les tourbières sont des espaces naturels souvent drainés pour extraire la tourbe, installer des infrastructures, développer la production agricole ou forestière pour la production.

L'utilisation de la tourbe dans la vallée de la Somme remonte *a minima* au XIII^{ème} siècle, où elle était utilisée comme combustible et engrais naturel (Cloquier 2006), puis s'est intensifiée lors du XIX^{ème} siècle et s'est étendu jusqu'au milieu du XX^{ème} siècle (Dubois (1908).

Or le drainage modifie les propriétés physiques et hydrauliques des tourbes (Kechavarzi, Dawson, Leeds-Harrison 2010), qui sont alors appelées « mursh » ou « moorsh », (mursz en polonais) (Łachacz et al. 2023). Il entraîne la baisse des nappes phréatiques (van Loon et al. 2009), l'entrée d'oxygène dans le système, et par conséquent l'oxydation de la tourbe, un affaissement de la surface du sol (subsidence), une libération de carbone (CO₂ et CH₄) dans l'atmosphère et une perte d'espèces de plantes typiques des tourbières (Leifeld, Müller, Fuhrer 2011; Hooijer et al. 2012; van Loon et al. 2009).

La dégradation des tourbières a parfois débuté avant l'arrivée des activités humaines, notamment par la sédimentation minérale, due aux phénomènes éoliens ou à l'érosion, ainsi qu'à l'alluvionnement c'est-à-dire le transport de sédiments par l'eau courante (Wójcicki, Szymczyk, Nita 2020). Dans la vallée de la Somme et ses affluents la tourbe est parfois remplacée par des alluvions et colluvions limoneuses récentes résultant de l'érosion des sols locaux (Garcia, Antoine, Brasseur 2022).

2.2 Caractérisation de la dégradation des tourbes

La dégradation des tourbes réside dans la minéralisation des débris végétaux pas ou peu décomposés et se traduit par une évolution des faciès et donc de leurs caractéristiques. Les taux de MO diminuent ainsi que les teneurs en fibres frottées à 200µm (FF200), passant de valeurs supérieures à 40% pour les Hf, à 10-40% pour les Hm, à inférieurs à 10% pour les Hs (AFES 2009). Parallèlement les teneurs en cendres augmentent, tout comme la densité volumique (bulk density : BD en anglais) et l'indice de von Post (vP). Celui-ci consiste à presser un échantillon de sol et de lui attribuer une note de 1 à 10, en fonction de plusieurs paramètres observés comme la présence de matières amorphes, la turbidité et la couleur de l'eau, et l'état de conservation des structures végétales (Annexe 1). Les caractéristiques des horizons histiques sont : Hf : BD inférieur à 0,1 g.cm⁻³ et vP entre 1 et 5, puis Hm : BD entre 0,1 et 0,2 g.cm⁻³ et vP entre 5 et 8, enfin Hs : BD supérieur à 0,2 g.cm⁻³ et un vP entre 8 et 10 (Kechavarzi, Dawson, Leeds-Harrison 2010; AFES 2009).

Partie 2 : Plan expérimental

1. Matériels

1.1 Description des sites

Sur la base de l'étude réalisée par Hemery (2023), 5 sites sur les 6 déjà étudiés ont été sélectionnés : Roussent (ROU) et Douriez (DOU), dans la vallée de l'Authie, ainsi que Long (LON), Morcourt (MOR) et l'Abbevillois (ABB) dans la vallée de la Somme (Figure 3).

La pluviométrie de ces deux vallées est d'environ 800 mm par an (Debuf 2018).

Ces sites ont été choisis car ils font partie du projet européen LIFE Anthropofens mené par le CEN Hauts-de-France visant à restaurer certains habitats de tourbière. De plus ils ont été soumis à des activités anthropiques qui ont dégradé la tourbe, probablement en surface, ce qui permettrait ainsi de mieux connaître les propriétés des histosols dégradés.

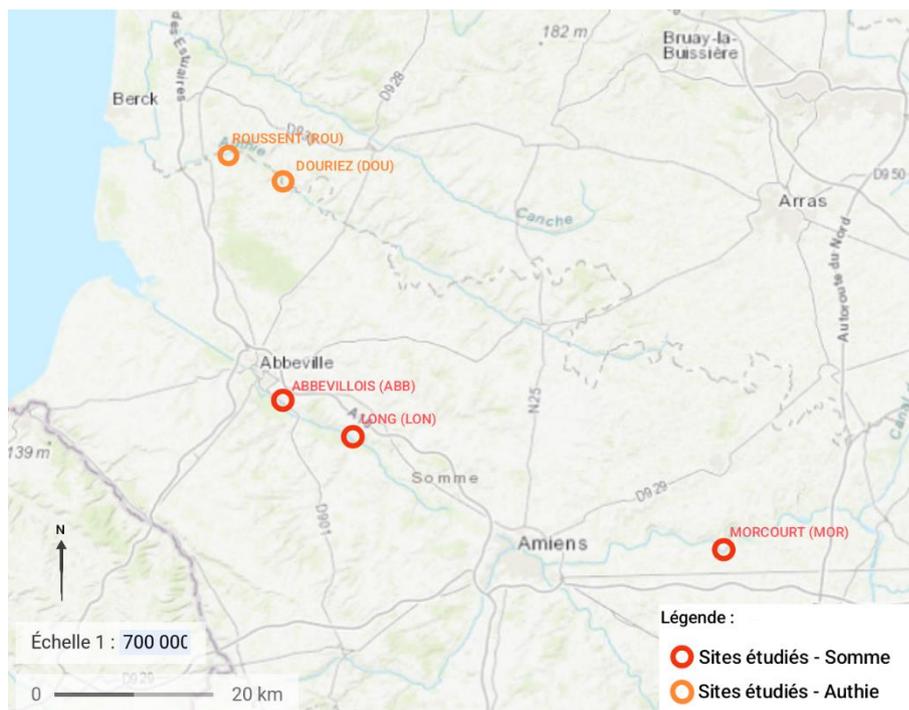


Figure 3 : Localisation des sites étudiés. Nom du site et son abréviation

1.2 Matériel pédologique

1.2.1 Caractéristiques des prélèvements

Des prélèvements ont été réalisés les 22, 23 et 24 mai 2024, pour tous les points précédemment étudiés par Hemery (2023) disposant d'analyses physiques et chimiques et

dont la profondeur (10, 25 ou 50 cm) manquait. Les points (ou sols) sont organisés le long de transects orthogonaux à l'axe des vallées et sont espacés de 100 à 200 m selon la longueur du transect. Au total 30 sondages ont été réalisés à l'aide d'un carottier russe disposant d'une cavité de prélèvement de 5cm de diamètre et 50 cm de longueur. Une tranche de 4 cm de sol a été collectée pour chaque profondeur manquante.

1.2.2 Mesures de terrain

Pour chaque point le pH a été mesuré avec un pHmètre de terrain (ExStick pH100). La présence de carbonates a été évalué à l'aide d'une goutte d'acide chlorhydrique dilué à 10 % et un test de von Post a été réalisé.

1.2.3 Analyses laboratoire

1.2.3.1 Fibres frottées

Pour déterminer le taux de fibres frottées, 10 g d'échantillon et 50 mL d'eau du robinet ont été mélangés et agités pendant 16 heures sur un plateau rotatif à une vitesse de 180 tours/minute (Gobat et al. 1991). Ensuite une décarbonatation à l'acide chlorhydrique à 30% a été effectuée en versant 2mL d'acide, cette quantité a été ajoutée jusqu'à n'obtenir plus aucune effervescence. La quantité totale de carbonates a ainsi pu être estimée. La solution a ensuite été versée sur deux tamis avec différentes tailles de mailles : 50 et 200 μm . La petite maille étant placée sous la plus grosse. A l'aide d'une pomme de douche, les échantillons ont été passés sous l'eau, quand des boulettes s'étaient formés lors de l'agitation ces dernières étaient écrasées à la main. Les refus de chaque tamis ont ensuite été séchés à l'étuve à 105°C pendant 1h, puis pesés.

1.2.3.2 Densité volumique

Afin de déterminer la densité volumique, une tranche d'environ 2cm de long a été découpée dans chaque échantillon puis mesurée plus précisément avec un pied à coulisse. A l'aide d'un vide pomme (diamètre = 19,8mm), un cylindre a été extrait, puis a été pesé avant et après un passage à l'étuve à 105°C.

1.2.3.3 Matière organique

Pour mesurer le taux de MO, les cylindres précédemment extraits, après leur passage à l'étuve à 105°C, ont été pesés et placés dans un four à moufle à 550°C pendant 4h, avec une montée en température d'une heure (Norme NF EN 15169). A leur sortie les échantillons ont de nouveau été pesés.

Taux de MO (%) = ((masse 105 – masse 505) / masse 105)*100 (Chambers, Beilman, Yu 2010)

1.2.4 Analyses réalisées en externe

A la suite du travail d'Hemery (2023), des analyses au laboratoire d'analyse des sols d'Arras (INRAE, accrédité COFRAC) ont été réalisées afin de déterminer le taux de calcaire, d'azote total (Ntot), de carbone total (Corg) et organique (Corg), le ratio C/N, la MO et le phosphore total (Ptot). Ces paramètres n'ont pas été récoltés sur les échantillons de l'Abbevillois ni sur ceux à 25 cm de profondeur. Le jeu de données (n=88) issus de ces analyses limitées en nombre d'échantillons s'appelle « jeu de données restreint ».

1.2.5 Traitement des données pédologiques

Les types de sols et types d'horizons ont été déterminés par Hemery (2023) selon le référentiel pédologique (AFES 2009) à partir des taux de MO et taux de FF200, et modifiés si besoin selon les nouvelles données acquises.

Certaines données de taux de MO aberrantes issus des analyses d'Hemery (2023) ont été corrigées via le Corg mesuré par le laboratoire d'analyse des sols d'Arras selon l'équation suivante issue d'un modèle statistique cubique (Tableau 10) :

$$1. \text{ MO (\%)} = 2.522 - 9.181 * 10^{-4} * \text{Corg (\%)}^3 + 0.0569 * \text{Corg (\%)}^2 + 1.244 * \text{Corg (\%)}$$

où Corg_pour = Taux de carbone organique mesuré en externe

L'ensemble du jeu de données sans les valeurs aberrantes (DOU_6_45_50, LON_1_46_50, LON_4_10_15, LON_6_150_154, LON_6_46_50) a été utilisé.

Les pertes de Ptot (g.cm⁻¹) entre les différentes profondeurs ont été calculées de la manière suivante, elles permettent de connaître la dynamique de pertes de Ptot au sein du profil :

$$2. \text{ Pertes Ptot (g/cm)} = (\text{moyenne Ptot échantillon 1} - \text{moyenne Ptot échantillon 2}) / (\text{profondeur échantillon 2} - \text{profondeur échantillon 1})$$

où 1 et 2 correspondent aux échantillons comparés

Le type d'horizon « matériaux_limniques_gyttja », rencontré sur le sol LON 8, a été supprimé du jeu de données pour les analyses statistiques liées au phosphore total. Deux points de ce type d'horizon avaient des valeurs extrêmes empêchant de respecter les conditions d'application des modèles : homoscedasticité, normalité des résidus, homogénéité de la variance, valeurs atypiques. De plus ces échantillons correspondaient à un sol de type radeau

flottant construit sur une accumulation de limons organiques et donc particulièrement différents des autres sondages.

Enfin le taux de MMs a été calculé selon :

3. MMs = quantité de matière minérale (g.kg^{-1} , mesurée en interne) – calcaire (g.kg^{-1} , mesuré en externe)

Les valeurs aberrantes de MMs ont été corrigées à partir de la quantité de matière minérale mesurée en service externe (LAS d'Arras).

1.3 Matériel hydrologique

1.3.1 Relevés des données

Pour chaque point de sondage le niveau de la nappe alluviale à partir du sol a été mesuré à l'aide d'un mètre ruban. Sur chaque site/transect un piézomètre équipé d'un capteur mesurant la pression totale de manière automatique toutes les heures est installé.

1.3.2 Traitement des données hydrologiques

Les piézomètres n'ayant pas été installés aux mêmes dates sur l'ensemble des sites, les données récoltées ont été considérées sur la période commune du 07/09/22 (00h00) au 21/05/24 (23h38). Afin d'obtenir la profondeur de la nappe alluviale, la pression atmosphérique mesurée par le baromètre du site de Tirancourt (site non étudié, situé à environ 10km en amont de Long) est retirée à chaque pression totale mesurée par le capteur des piézomètres. Il est admis que la différence de pression entre les sites et le baromètre est négligeable et que les conditions climatiques sont respectivement les mêmes entre le piézomètre et les sondages du même site.

Pour calculer le niveau de la nappe par heure et par point de sondage (en cm) un premier calcul a été effectué afin d'obtenir l'écart entre la profondeur de la nappe au piézomètre et celle du sondage :

4. Ecart entre sondage et piézomètre = (profondeur nappe sondage au temps t (m)) – (profondeur nappe piézomètre temps t (mNGf) – altitude piézomètre (m))

Ensuite l'écart entre le sondage et le piézomètre a été ajouté au niveau de la nappe pour chaque heure :

5. Niveau nappe par heure et par sondage = Ecart sondage et piézomètre (en cm) + Niveau de la nappe (cm)

Cela a ainsi permis d'ajuster les données mesurées au piézomètre à chaque point de sondage et de calculer le niveau moyen la nappe pour chaque sondage pour la période considérée.

Ensuite pour chacune des profondeurs réelles de chaque sondage, (c'est à dire la profondeur exacte à laquelle l'échantillon de sol a été prélevé), les cumuls d'heures d'immersion ont été calculées en sommant les nombres d'heures où le niveau de la nappe est supérieur à la profondeur réelle du sondage. Le nombre d'heures d'émersion en a été déduit.

1.4 Construction de l'indice de couvert arboré

D'après Rahman et al. (2021) les concentrations en P_{tot} en forêt sont plus élevées en surface. L'hypothèse est qu'en tombant à la surface du sol, les feuilles des arbres se minéralisent et libèrent des éléments nutritifs dont du phosphore, les concentrations en P_{tot} en surface seraient ainsi supérieures pour les zones ayant été les plus arborées (indice de couvert élevé). Pour chacun des sols un indice de couvert a donc été mesuré à l'aide d'une chronoséquence de cinq photos aériennes datée de 1947 à 2021 de l'outil de l'IGN « Remonter le temps ». Un point a été attribué pour de la forêt, ½ point en cas de présence d'arbres épars (environ < 30% de recouvrement dans un rayon de 50m), et 0 dans le cas d'absence d'arbres. Le score pour chaque sol correspond au cumul des notes obtenues pour les 5 photos (Annexe 2).

2. Méthodes statistiques

Les analyses statistiques ont été réalisées dans l'environnement Rstudio du logiciel R (R version 4.4.0, R Core Team (2024)). Les données ont été considérées comme dépendantes au site dans les modèles linéaires utilisés.

2.1 Exploration des données

Les variables d'intérêt ont été choisies après une première partie de recherches bibliographiques et d'exploration de données afin d'identifier les variables potentiellement corrélées. Pour cela des relations linéaires entre les résultats des analyses au laboratoire et la profondeur ou les heures émergées en fonction du site, du type d'horizon ou du type de sol ont été effectuées. Les corrélations entre variables ont été quantifiées grâce au coefficient de corrélation de Spearman.

2.2 Réalisation des modèles

Tout d'abord les cumuls d'heures d'émersion de la tourbe ont été étudiées, ceux-ci augmentent avec l'abaissement des nappes via le drainage artificiel, ce qui provoque la minéralisation de la tourbe, mais aussi une augmentation de la disponibilité d'éléments nutritifs comme l'azote et le phosphore (Szajdak et al. 2020; Ahmad et al. 2020).

L'exploration des données a permis de définir des variables à expliquer, des modèles linéaires simples entre le taux de MO, le taux de matériel minéral siliceux (MMs) (matière minérale en

g.kg^{-1} - calcaire en g.kg^{-1}), le C/N et le Ptot, en fonction de la variable explicative du nombre d'heures émergées (HE) ont été réalisés.

Cette variable explicative répond au phénomène de l'inflation des zéros biaisant ainsi les conditions d'application du modèle (citées plus haut).

Cette dernière n'a pas été retenue, et la profondeur a été utilisée comme proxy des HE puisque ces deux variables sont très corrélées (Annexe 3)

Ensuite des modèles linéaires mixtes (package lme4 version 1.1-35.4) ont été réalisés avec le site comme effet aléatoire entre la profondeur et les variables d'intérêt, MO, C/N et MMs. Pour le Ptot quatre types de modèles ont été testés : linéaire ($y=ax+b$), linéaire mixte ($y=ax+b +$ effet aléatoire), quadratique ($y=ax^2+bx+c$) et quadratique mixte ($y=ax^2+bx+c +$ effet aléatoire) afin de déterminer lequel a l'AIC (Akaike Index Criterion) la plus faible. Le modèle le plus parcimonieux est représenté graphiquement. Un modèle mixte avec la profondeur comme effet aléatoire a été testé pour étudier le lien entre les niveaux moyens de la nappe d'eau et le taux de MO.

3. Résultats

3.1 Chroniques piézométriques

Depuis septembre 2022, les chroniques piézométriques des cinq sites illustrent notamment les périodes de l'année où les niveaux d'eau sont sous la surface du sol. Dans ces conditions la tourbe est soumise à l'oxydation et donc à la dégradation microbienne. De septembre 2022 à septembre 2023, excepté quelques journées, seul le site de Roussent, a eu des niveaux d'eau supérieurs au sol. Ces derniers sont même descendus respectivement à plus d'un mètre et 84 cm de profondeur en septembre 2022 et juillet 2023 dans l'Abbevillois où la fluctuation intra-annuel est particulièrement marqué. A contrario, l'hiver 2023-2024 a été marqué par des épisodes de grandes précipitations, remontant les niveaux de nappes, notamment à Roussent où le niveau d'eau a dépassé 50 cm au-dessus du sol (Figure 4).



Figure 4 : Chroniques piézométriques de septembre 2022 à juin 2024 sur les 5 sites étudiés

3.2 Classification des sols et horizons selon le Référentiel pédologique français

Au total, 146 prélèvements ont été réalisés dans 24 sols différents. Quatre types de sols ont été déterminés : seize histosols, quatre fluvisols, trois réductisols et un epiréductisol. Parmi les sites, Douriez comprend uniquement des histosols, à Long en plus des six histosols, un réductisol a été identifié. Tandis que pour le site de Morcourt, un histosol parmi les quatre sondages a été déterminé. A Roussent il y a deux fluvisols et deux histosols. Les types d'horizons majoritaires sont histique mésique (43,8%), matériaux limniques (21,9%), histique

saprique (12,3%) et anmoor (8,2%). D'autres types d'horizon ont été identifiés : matériaux anthropiques (4,1%), rédoxique (4,1%), matériaux limniques et gyttja (2%), réductique (2%), histique fibrique (0,7%) et matériaux meuble calcaire (0,7%).

La répartition des horizons majoritaires en fonction de la profondeur montre que les horizons histiques sapriques et histiques mésiques se retrouvent sur le profil entier. Tandis que parmi les douze anmoors, dix (dont six appartenant au site de l'Abbevillois), se situent dans les 50 premiers centimètres (Figure 5).

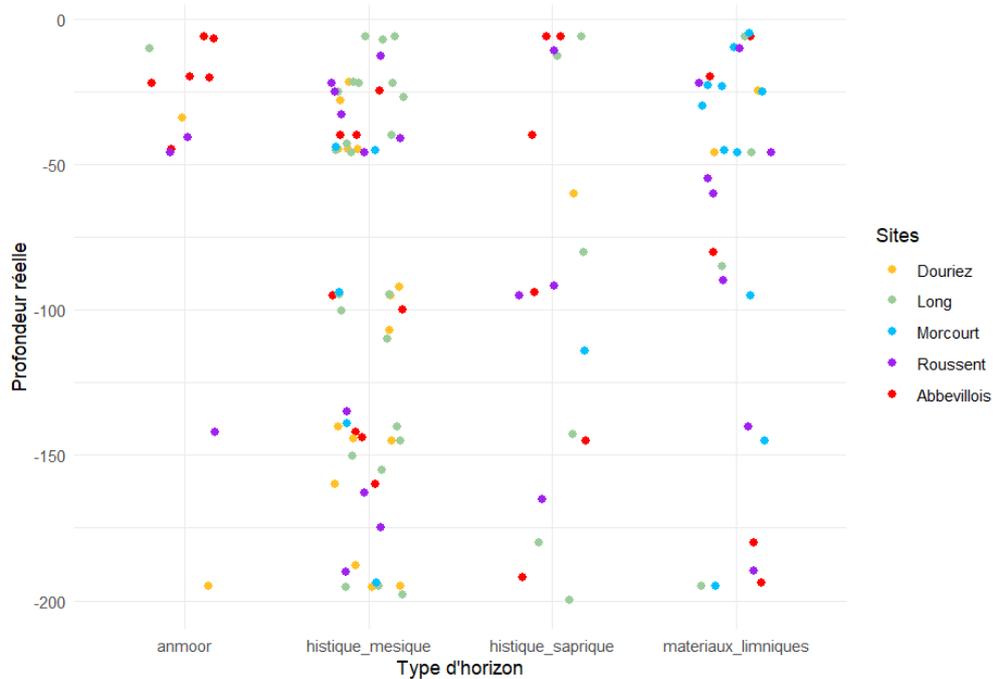


Figure 5 : Type d'horizon en fonction de la profondeur réelle par site. Pour un soucis de compréhension les groupes de points ont été éclatés et seulement les types d'horizons majoritaires sont représentés.

3.3 Relation entre propriétés physico-chimiques, profondeur et hydrologie

La matrice de corrélation de Spearman ci-dessous permet d'identifier les variables (quantitative) corrélées (intensité croissante de la couleur) et le sens de la corrélation (positive ou négative) (Figure 6). Nous pouvons voir qu'il existe une corrélation positive forte entre le Ptot et le matériel minéral siliceux. Le taux de MO est corrélé positivement avec la teneur en eau, le C/N et le taux de FF200. Il y a une corrélation négative forte entre le taux de MO et le taux de matière minérale siliceuse, entre la densité volumique et la teneur en eau ainsi qu'avec le taux de MO, et enfin entre la profondeur et le nombre d'heures émergées.

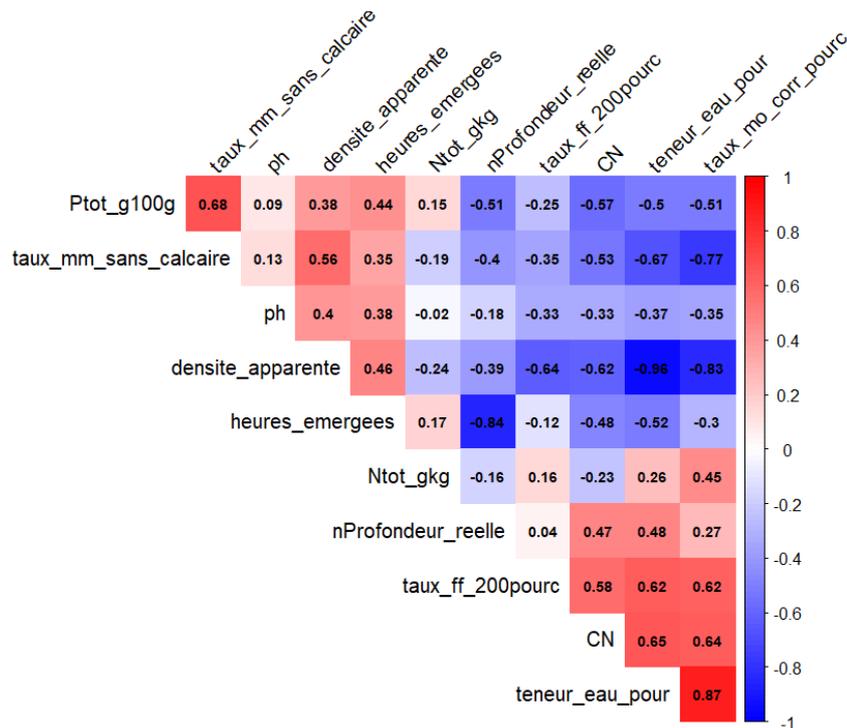


Figure 6 : Matrice de corrélation entre les variables calculées et coefficients de corrélation par la méthode Spearman sur l'ensemble des données. Où Ptot_g100g, taux_mm_sans_calcaire, ph, densite_apparente, heures_emergees, Ntot_gkg, nProfondeur_reelle, taux_ff_200pourc, CN, teneur_eau_pour et taux_mo_corr_pourc, sont respectivement le taux de phosphore total ($\text{g} \cdot 100\text{g}^{-1}$), matériel minéral siliceux ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), pH, densité volumique, heures émergées, azote total ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), profondeur réelle de l'échantillon, teneur en fibres frottées à 200 μm (%), C/N, teneur en eau (%) et taux de matière organique corrigé (%).

3.3.1 Matière organique

Les quantités de MO au sein des profils (Figure 7) sont variables verticalement mais aussi au sein des transects et entre les transects. Cette variabilité observée en fonction du niveau annuel moyen de la nappe au sein de sol ne permet pas de remarquer des patterns clairs.

Pour de nombreux sites les profondeurs 0-10 et 25 cm possèdent des taux de MO inférieurs par-rapport à la profondeur 50 cm. Quelques sols font exception (ABB9, DOU6, LON1, LON6, ROU1, ROU5) dont 4/6 ont un niveau de nappe d'eau proche de la surface. Dans l'Abbevillois les valeurs de MO sont souvent faibles en profondeur.

Cependant sur ce site des accumulations sédimentaires anciennes de matériaux limniques et de sable viennent ici perturber la lecture des profils.

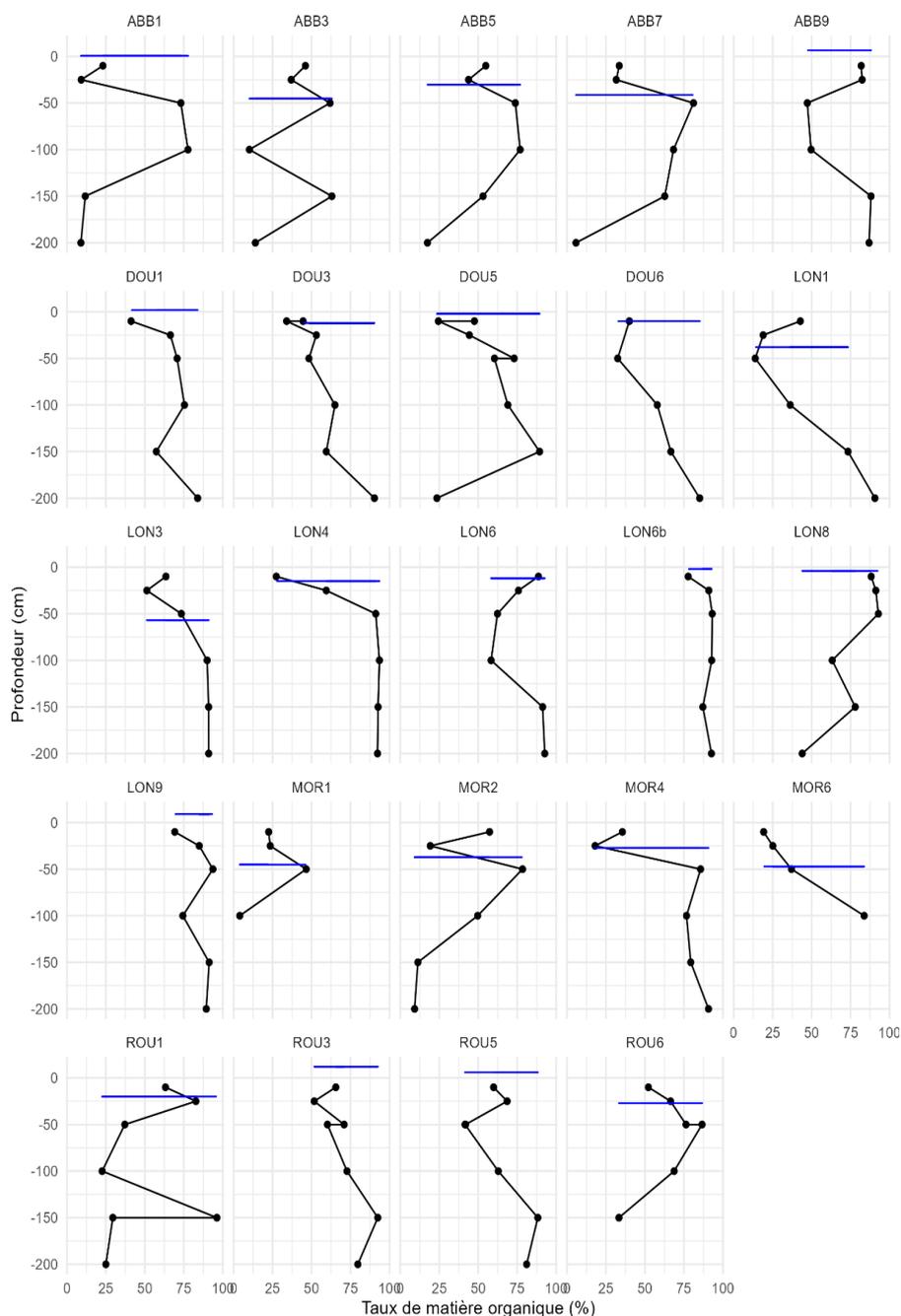


Figure 7 : Taux de matière organique (%) en fonction de la profondeur et par profil de sol/sondage. ABB, DOU, LON, MOR et ROU sont respectivement les sites de l'Abbevilleois, Douriez, Long, Morcourt et Roussent. Le numéro correspond au numéro de sondage et la ligne horizontale bleue représente le niveau moyen de la nappe au sondage.

Nous avons testé l'hypothèse d'une diminution des taux de MO à proximité de la surface. Le modèle linéaire mixte réalisé confirme (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) cette hypothèse à l'exception du site de l'Abbevillois dont la tendance est inverse (Figure 8).

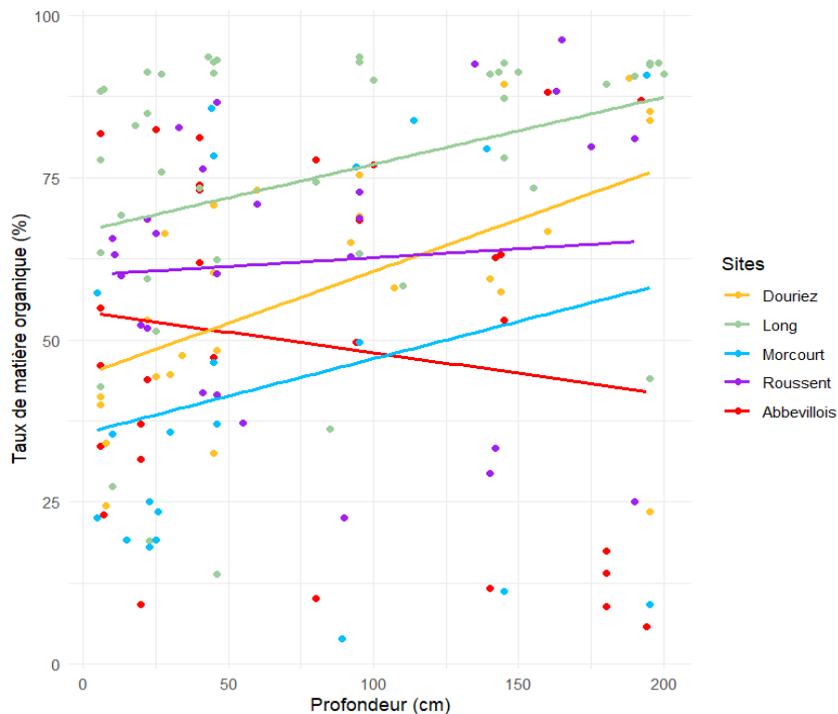


Figure 8 : Taux de matière organique (%) en fonction de la profondeur (cm) de l'échantillon de sol et coloriés par site

Tableau 1 : Statistiques du modèle linéaire mixte du taux de matière organique (%) en fonction de la profondeur réelle (cm). Sign. = Significativité : (***) : 0.001, (**) : 0.01, (*) : 0.05, ns : non significatif au seuil de 5%. Jeu de données complet, n=147, Site = 5

Modèle		Valeurs	X ²	Df	p.value Sign
Imer (matière organique ~ Profondeur (1 Site))	Ordonnée à l'origine	52.397			
	Profondeur	0.068	5.224	1	0.022 ***

La relation entre le taux de MO et le niveau moyen de la nappe au sondage en fonction des profondeurs est significativement positive (Tableau 2). Autrement dit plus les niveaux de nappes moyens sont bas, plus le taux de MO diminue (Figure 9).

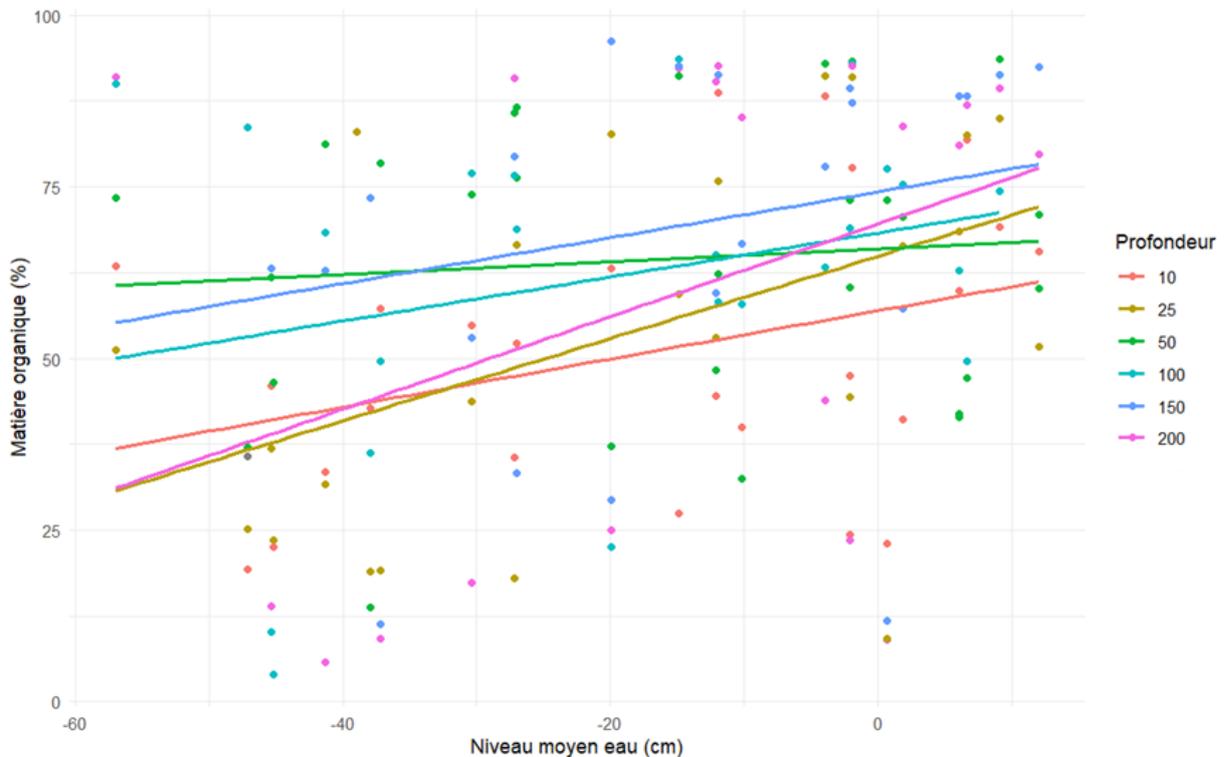


Figure 9 : Relation par profondeur entre taux de matière organique en fonction du niveau annuel moyen de la nappe d'eau (cm par-rapport à la surface du sol).

Tableau 2 : Statistiques du modèle linéaire mixte du taux de matière organique (%) en fonction du niveau moyen de la nappe au sondage (cm) par profondeur. Sign. = Significativité : (***) : 0.001, (**) : 0.01, (*) : 0.05, ns : non significatif au seuil de 5%. Jeu de données complet, n=143, Site = 6

Modèle		Valeurs	X2	Df	p.value Sign
Imer (matière organique ~ Niveau moyen nappe sondage + (1 Profondeur))	Ordonnée à l'origine	66.494			
	Niveau moyen nappe sondage	0.384	13.858	1	1.972 * 10 ⁻⁴ (***)

3.3.2 C/N

D'après le modèle linéaire mixte réalisé (Tableau 3), la relation entre le rapport C/N et la profondeur des échantillons de sol est significativement positive. Autrement dit, le C/N diminue significativement en s'approchant de la surface du sol (Figure 10).

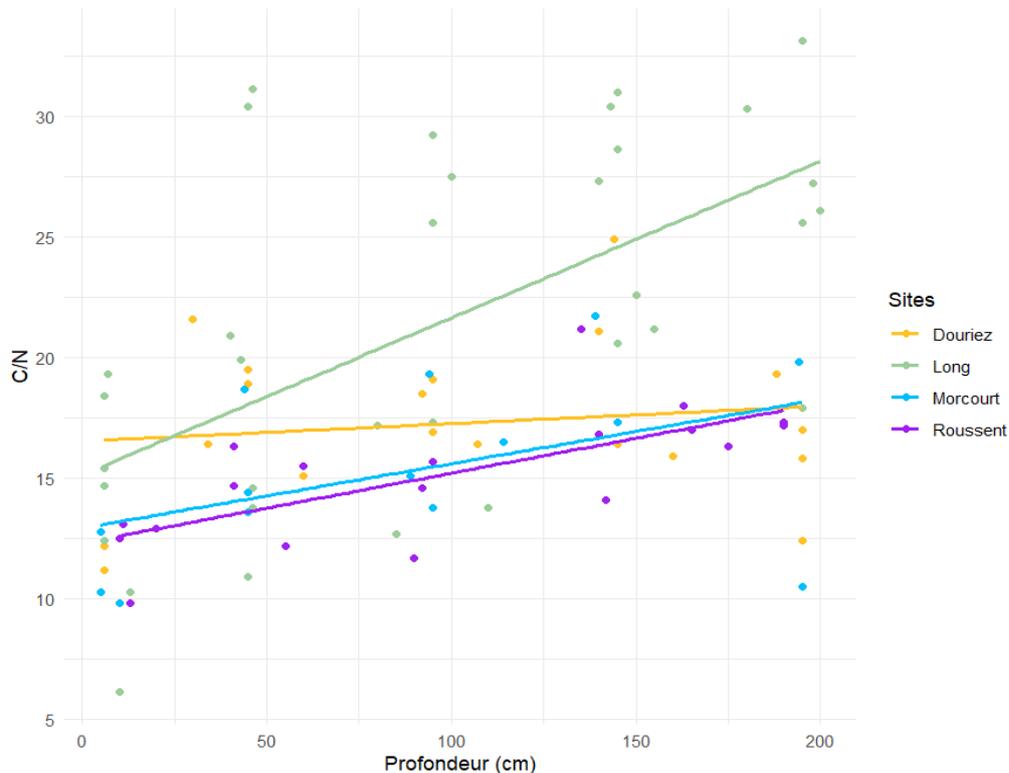


Figure 10 : Rapport C/N en fonction de la profondeur (cm) par site

Tableau 3 : Statistiques du modèle linéaire mixte du rapport C/N en fonction de la profondeur réelle (cm). Sign = Significativité : (***) : 0.001, (**) : 0.01, (*) : 0.05, ns : non significatif au seuil de 5%. Jeu de données complet, n=86, Site = 4

Modèle		Valeurs	X ²	Df	p.value Sign
lmer (C/N ~ Profondeur + (1 Site))	Ordonnée à l'origine	13.599			
	Profondeur	0.039	25.15	1	5.304 * 10 ⁻⁷ (***)

3.3.3 Matière minérale siliceuse

Nous pouvons voir que la MMs diminue significativement avec la profondeur (Tableau 4, Figure 11). Cela signifie qu'à proximité de la surface le taux de MMs augmente.

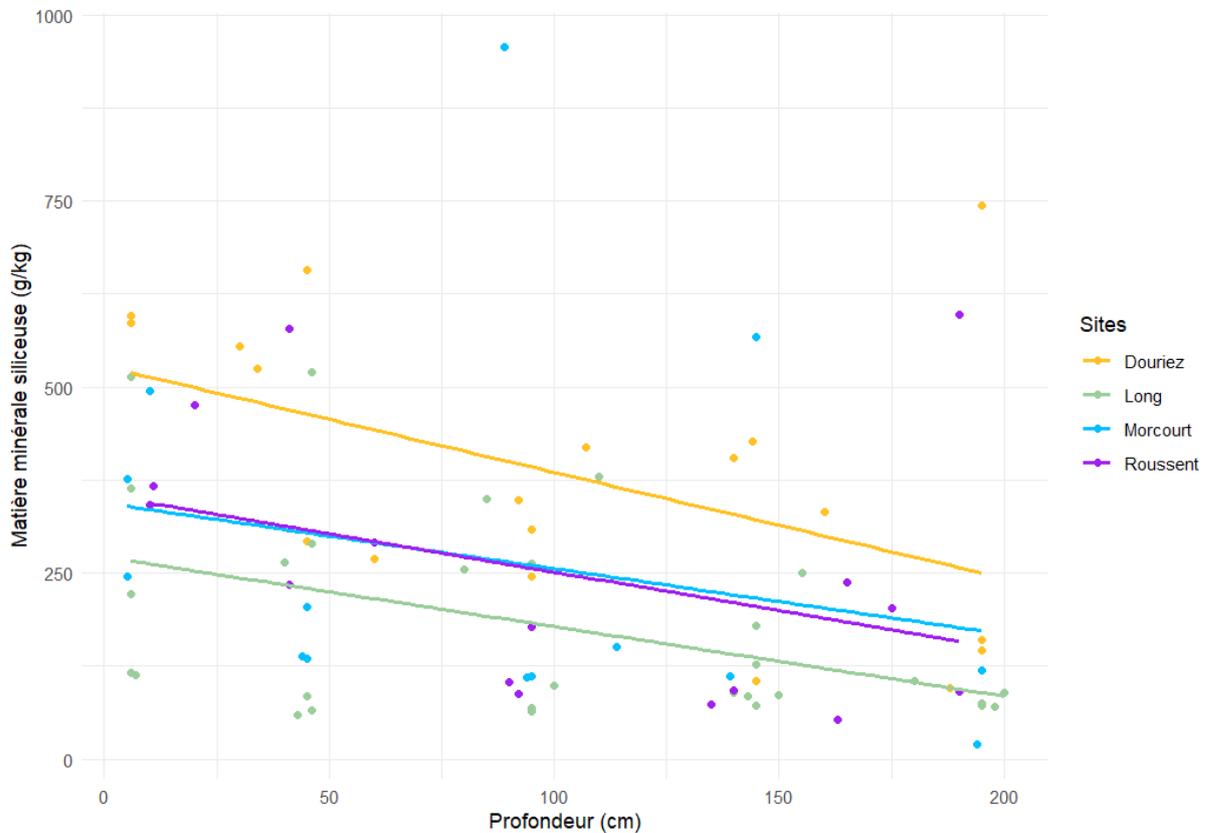


Figure 11 : Matière minérale siliceuse (g.kg^{-1}) en fonction de la profondeur (cm) par site

Tableau 4 : Statistiques du modèle linéaire mixte de la quantité de matière minérale siliceuse (g.kg^{-1}) en fonction de la profondeur réelle (cm). Sign = Significativité : (***) : 0.001, (**) : 0.01, (*) : 0.05, ns : non significatif au seuil de 5%. Jeu de données complet $n=79$, Site = 4

Modèle		Valeurs	X ²	Df	p.value Sign
lmer (MMs ~ Profondeur + (1 Site))	Ordonnée à l'origine	370.985			
	Profondeur	- 1.056	12.307	1	4.513 * 10 ⁻⁴ (***)

3.3.4 Phosphore

Les relations entre le Ptot et la profondeur sont statistiquement significatives qu'elles soient linéaires ou quadratiques (Tableau 6, Tableau 5) La relation linéaire montre une baisse constante du Ptot au sein du profil de sol (Figure 12), tandis que le modèle quadratique montre une baisse puis une stabilisation des concentrations de Ptot avec la profondeur (Figure 13).

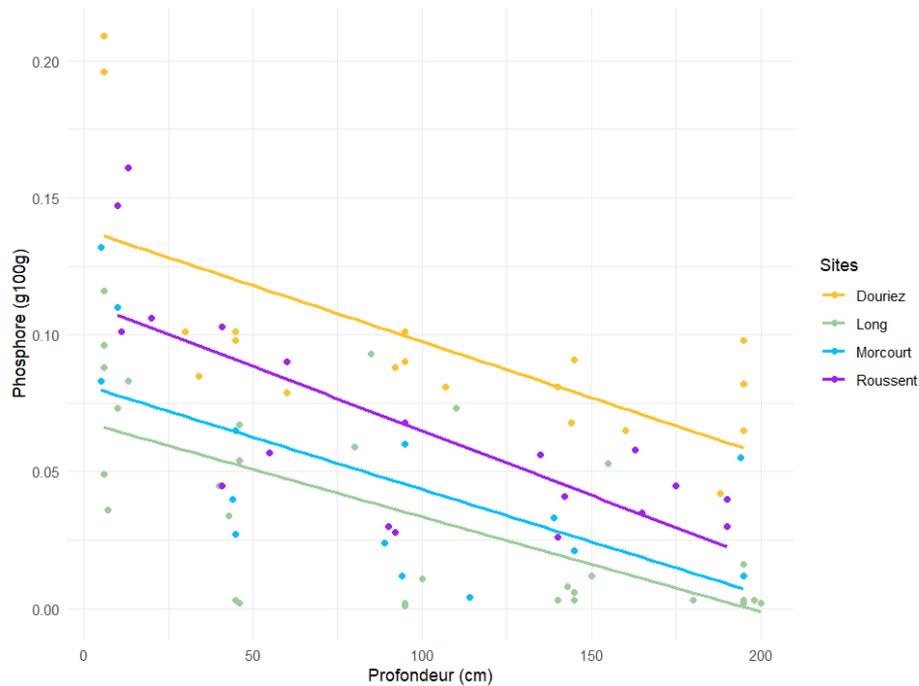


Figure 12 : Phosphore total ($g \cdot 100g^{-1}$) en fonction de la profondeur (cm) par site

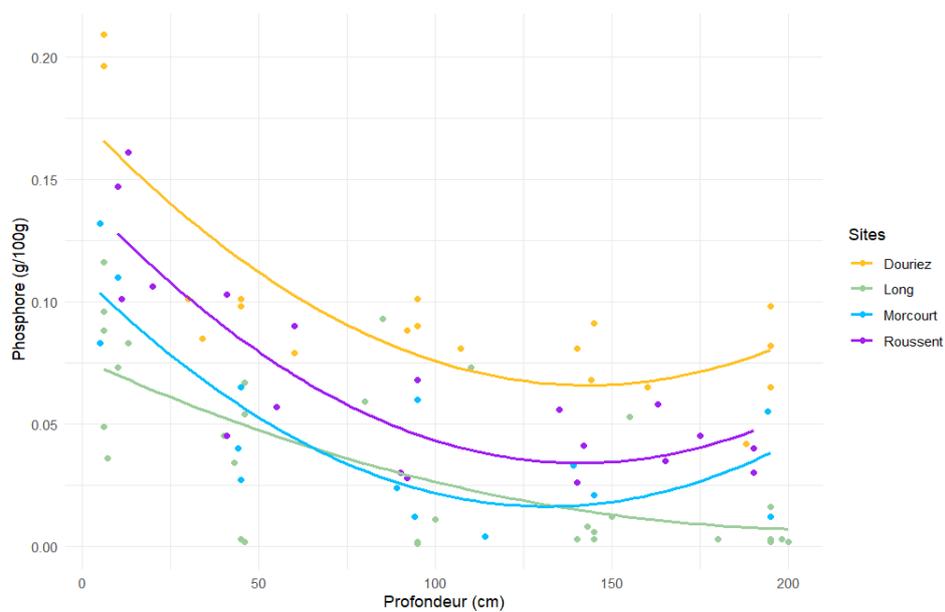


Figure 13 : Relation quadratique entre le phosphore total ($g \cdot 100g^{-1}$) et la profondeur (cm) par site

Les résultats de l'AIC montrent que le meilleur compromis entre la complexité et l'ajustement du modèle est le modèle linéaire mixte (AIC = -313.1) (Tableau 6, Tableau 5).

Tableau 5 : Statistiques des modèles linéaires simples entre le phosphore total ($\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$) et la profondeur (cm). Sign = Significativité : (***) : 0.001, (**) : 0.01, (*) : 0.05, ns : non significatif au seuil de 5%. Jeu de données complet sans horizon « matériaux »

Modèles	AIC		Valeurs	F	Adj R ²	p.value Sign
lm (phosphore ~ Profondeur)	-304.7	Ordonnée à l'origine	$9.375 \cdot 10^{-2}$			(***)
		Profondeur	$-3.668 \cdot 10^{-4}$	33.62	0.284	$1.24 \cdot 10^{-7}$ (***)
lm (phosphore ~ Profondeur + I(Profondeur ²))	-310.9	Ordonnée à l'origine	0.113			(***)
		Profondeur	$-1.031 \cdot 10^{-3}$			$4.41 \cdot 10^{-5}$ (***)
		Profondeur ²	$3.325 \cdot 10^{-6}$			$5.12 \cdot 10^{-3}$ (**)
		lm		22.47	0.344	$1.803 \cdot 10^{-8}$

Tableau 6 : Statistiques des modèles mixtes entre le phosphore total ($\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$) et la profondeur (cm). Sign = Significativité : (***) : 0.001, (**) : 0.01, (*) : 0.05, ns : non significatif au seuil de 5%. Jeu de données complet sans horizon « matériaux limniques gyttja » n = 83, Site = 4

Modèles	AIC		Valeurs	X ²	Df	p.value Sign
lmer (phosphore ~ Profondeur + (1 Site))	-313.1	Ordonnée à l'origine	0.099			
		Profondeur	$-3.911 \cdot 10^{-4}$	66.97	1	$2.757 \cdot 10^{-16}$ (***)
lmer (phosphore ~ Profondeur + I(Profondeur ²) + (1 Site))	-304,0	Ordonnée à l'origine	0.121			
		Profondeur	$-1.143 \cdot 10^{-3}$	46.627	1	$8.586 \cdot 10^{-12}$ (***)
		Profondeur ²	$3.762 \cdot 10^{-6}$	21.548	1	$3.451 \cdot 10^{-6}$ (***)

Les résultats du test de Student montrent qu'il existe des différences significatives entre les profondeurs 10 et 50 cm, et 50 et 200 cm. Mais que celles-ci ne sont pas significatives entre les autres profondeurs. Les pertes de P_{tot} (g/cm) sont plus importantes entre les profondeurs 10 et 50 cm, qu'entre les profondeurs 50 et 200 cm (Tableau 7).

Tableau 7 : Statistiques des tests de Student des comparaisons des moyennes de phosphore total (g.100g⁻¹) des différentes profondeurs (cm), où x et y sont les moyennes respectives des profondeurs comparées entre elles.

Comparaisons des profondeurs	x	y	Pertes P _{tot} (g/cm) (eq 2.)	t.test	Df	p.value
10 – 50 cm	0.110	0.057	1.325 * 10 ⁻³	3.935	30.511	4,471 * 10 ⁻⁴
50 – 200 cm	0.057	0.033	1.6 * 10 ⁻⁴	2.078	28.943	4.671 * 10 ⁻²
50 – 100 cm	0.057	0.049	1.6 * 10 ⁻⁴	0.703	30.909	0.487
50 – 150 cm	0.057	0.039	1.8 * 10 ⁻⁴	1.712	29.932	0.0972
100 – 150 cm	0.049	0.039	2.0 * 10 ⁻⁴	0.874	30.259	0.389
100 - 200 cm	0.049	0.033	1.6 * 10 ⁻⁴	1.2863	29.997	0.2082

Le modèle le plus parcimonieux pour représenter la dynamique d'accumulation du P_{tot} au sein du profil est la relation linéaire or cela va à l'encontre des résultats issus des tests de Student (Tableau 7) qui montrent que les pertes de P_{tot} par cm de profondeur ne sont pas les mêmes entre 10 et 50 cm, qu'entre 50 et 200 cm. Avec l'ensemble des données (n= 83), le modèle quadratique est le meilleur (Tableau 5), tandis que lorsque l'effet aléatoire du Site est ajouté, c'est le modèle linéaire qui est le plus pertinent (Tableau 6Tableau 6).

Dans les modèles mixtes le nombre d'observations est réduit aux nombres d'observation par site soit 19 observations pour Douriez, 31 pour Long, 14 pour Morcourt et 19 pour Roussent, or moins il y a d'observation plus la probabilité de se tromper en affirmant qu'un modèle est bon est élevée, ceci est la force statistique. Ainsi les quantités de P_{tot} sont élevées en surface (10 cm), baissent fortement à la profondeur 50 cm, puis se stabilisent dans les horizons plus profonds (100-200 cm).

3.3.4.1 Indice de couvert arboré

Afin d'expliquer la cause des quantités de P_{tot} supérieures en surface, nous avons décidé de tester l'influence du couvert arboré grâce à un indice. Cette relation n'est pas significative

(Figure 14) par conséquent l'indice de couvert arboré ne permet pas d'expliquer les concentrations plus élevées de Ptot en surface.

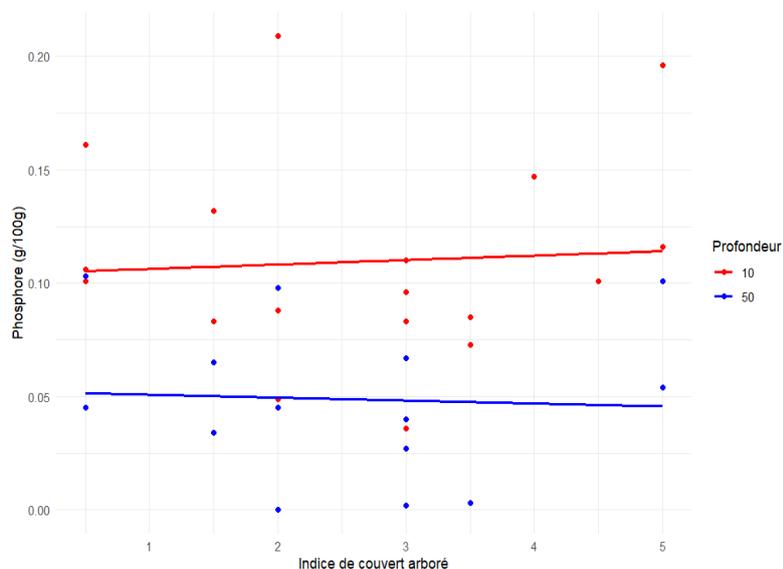


Figure 14 : Phosphore total ($\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$) en fonction de l'indice de couvert arboré pour les profondeurs 10 et 50 cm.

3.3.4.2 Phosphore et matière minérale siliceuse

Les taux de matière minérale siliceuse et de Ptot au sein du profil sont plus élevés à proximité de la surface (Tableau 4, Tableau 6) et la relation entre ces deux variables est statistiquement positive (Tableau 8).

Tableau 8 : Statistiques du modèle linéaire entre le phosphore total ($\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$) et la quantité de matière minérale siliceuse ($\text{g}\cdot \text{kg}^{-1}$). Significativité : (***) : 0.001, (**) : 0.01, (*) : 0.05, ns : non significatif au seuil de 5%. Jeu de données complet sans horizon « matériaux limniques gyttja », $n=77$.

Modèle		Valeurs	X ²	Df	p.value Sign
lmer (phosphore ~ matière minérale siliceuse + (1 Site))	Ordonnée à l'origine	$3.208 \cdot 10^{-2}$			
	Profondeur	$1.039 \cdot 10^{-4}$	25.362	1	$4.753 \cdot 10^{-7}$ (***)

L'observation du ratio entre le Ptot et la matière minérale siliceuse permet de dire qu'à quantité égale de matière minérale siliceuse il n'y a pas d'enrichissement en Ptot à proximité de la

surface des sols. Une exception significative existe pour LON où le ratio diminue avec la profondeur (Figure 15, Tableau 9).

Tableau 9 : Statistiques du modèle linéaire de la relation entre le phosphore total ($\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$) /matière minérale siliceuse en fonction de la profondeur (cm). Significativité : (***) : 0.001, (**) : 0.01, (*) : 0.05, ns : non significatif au seuil de 5%. Jeu de données complet sans horizon « matériaux limniques gyttja ».

Modèles		Valeurs	X ²	Df	Sign
Imer ((phosphore /matière minérale siliceuse) ~ profondeur + (1 Site))	Ordonnée à l'origine	$2.514 \cdot 10^{-4}$			
	Profondeur	$4.479 \cdot 10^{-7}$	0.561	1	0.453 ns
			F		
Im ((phosphore /matière minérale siliceuse) ~ profondeur, Site = MOR)	Ordonnée à l'origine	$5.102 \cdot 10^{-5}$			
	Profondeur	$3.995 \cdot 10^{-6}$	1.983	1	0.185 ns
Im ((phosphore /matière minérale siliceuse) ~ profondeur, Site = LON)	Ordonnée à l'origine	$3.089 \cdot 10^{-4}$			
	Profondeur	$-1.385 \cdot 10^{-6}$	11.01	1	0.003 (**)

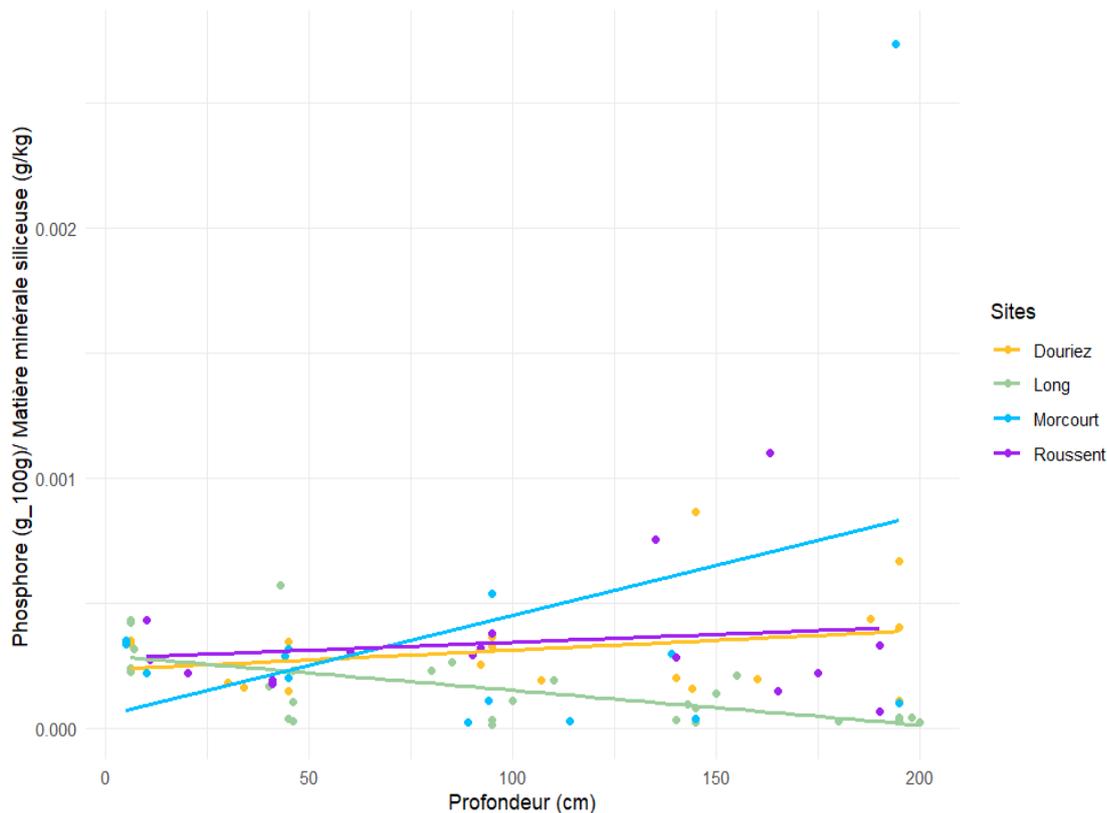


Figure 15 : Relation entre phosphore total/matière minérale siliceuse et la profondeur par site

3.4 Calcul du facteur de conversion du carbone organique en matière organique

Le modèle cubique a été utilisé pour représenter la relation entre la OM et le Corg car c'est celle dont l'AIC est le plus bas (Tableau 10). Jusqu'à 15% de MO ce coefficient semble plutôt adapté, mais pour des valeurs supérieures une relation linéaire n'est plus adaptée. La relation cubique (Figure 16) et la dispersion des valeurs (en couleur) montrent que pour des valeurs de Corg élevées ce coefficient sous-estime la proportion de MO. Par conséquent nous avons calculé un modèle polynomial de degré 3 permettant de mieux décrire cette relation :

$$(MO (\%)) = 2.522 - 9.181 \cdot 10^{-4} \cdot Corg (\%)^3 + 0.0569 \cdot Corg (\%)^2 + 1.244 \cdot Corg (\%)$$

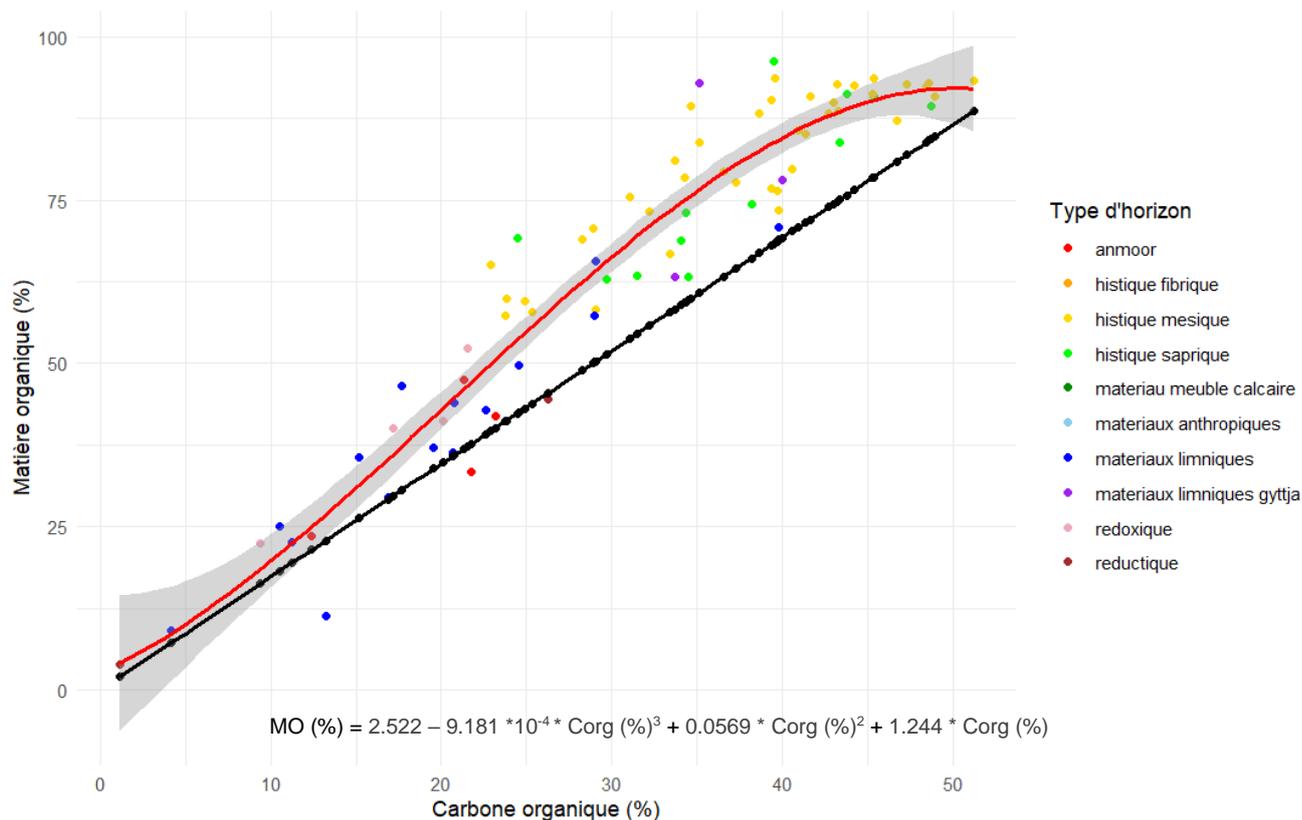


Figure 16 : Relations entre le carbone organique et la matière organique. En noire, le carbone organique mesuré en externe et la matière organique déduite à l'aide du coefficient 1.724. En rouge, la relation cubique entre les taux de matière organique mesurés au laboratoire EDYSAN et les taux de carbone organique mesurés en service externe.

Tableau 10 : Statistiques des modèles linéaires utilisés pour la détermination d'une équation de correction du taux de matière organique. Jeu de données sans valeurs aberrantes de MO
n = 142

	Equation	Adjusted R ²	AIC
lm (formula = matière organique ~ Carbone organique)	Matière organique = 5.061 + 1.934 * Carbone organique	0.895	565.448
lm (formula = matière organique ~ Carbone organique + I(Carbone organique ²))	Matière organique = - 7.875 - 0.018 * Carbone organique ² + 3.003 * Carbone organique	0.908	556.057
lm (formula = matière organique ~ Carbone organique + I(Carbone organique ²) + I(Carbone organique ³))	Matière organique = 2.522 - 9.181 * 10 ⁻⁴ * Carbone organique ³ + 0.0569 * Carbone organique ² + 1.244 * Carbone organique	0.913	551.844

4. Discussion

4.1 Propriétés des tourbes en fonction de la profondeur

Les mesures de MO et de FF200 ont permis de qualifier les horizons. Les Hm sont majoritaires avec des teneurs en MO supérieures à 50 % et un taux de FF200 compris entre 10 et 40 % (AFES 2009). Il s'agit de l'état de décomposition après l'Hf qui possède des taux de FF200 supérieurs à 40 %, or ce type d'horizon n'a été relevé qu'une seule fois parmi les 146 échantillons. Généralement les taux de décomposition sont supérieurs dans les tourbières minérotrophes par rapport à ceux des tourbières ombrotrophes (Verhoeven, Maltby, Schmitz 1990). Tout comme la quantité de C minéralisé qui y est trois fois supérieure (Malmer 1986). Cela peut expliquer pourquoi le type d'horizon Hf est quasiment inexistant. De nombreux anmoor étaient présents et principalement en surface, cet horizon est caractérisé par des taux de MO élevés mais inférieurs à 50 %. Cela traduit probablement une perte de MO et la dégradation des tourbes à proximité de la surface. En effet les résultats concernant la MO ont montré des taux significativement inférieurs aux profondeurs 0-10 et 25 cm. D'après Zak, McInnes, Gelbrecht (2016) c'est dans la couche supérieure des tourbières minérotrophes que les pertes de MO sont les plus importantes en raison de la dessiccation, de l'aération et d'une éventuelle utilisation agricole.

Les résultats ont aussi montré des rapports C/N plus faibles en surface. La baisse de ratio illustre la décomposition progressive des débris végétaux initiaux composant la tourbe (Malmer, Holm 1984). Les tourbes légèrement décomposées possèdent des C/N élevés (>30), tandis que les tourbes dégradées (<30) à très dégradées (<20) perdent du C plutôt que de l'N via la minéralisation de la MO, ainsi le C/N va progressivement diminuer (Krüger et al. 2015).

Parallèlement nous avons pu voir des taux de MMs plus élevés en surface, témoignant d'un enrichissement relatif des tourbes en limons qui d'après Garcia (2024), sont issus de l'érosion de sols et loess des versants (défrichement et agriculture). En effet selon Garcia (2024), les tourbes récentes (subatlantiques, <2700 cal. BP) à Morcourt contiennent une forte composante limoneuse et calcaire. Les plus jeunes de ces tourbes ont 700 ans et sont couvertes d'un limon organique au-dessus du niveau moyen annuel de la nappe (40 cm). Ainsi les taux de MMs élevés en surface sont probablement l'effet de la concentration en alluvions (issus des colluvions limoneuses) aux dépens de la MO minéralisée.

Nous avons montré que les quantités de P_{tot} étaient supérieures en surface. Cela a déjà été observé par Otabbong, Fristedt, Otabbong (2009) qui suggèrent que l'accumulation de P_{tot} dans les couches superficielles (0-20cm et 20-40 cm) est liée au piégeage de P dans les

sédiments. Mais aussi que des concentrations de P élevées sont attendues dans les couches supérieures des tourbières très décomposées (Zak, McInnes, Gelbrecht 2016).

La quantité de P_{tot} élevée en surface est corrélée à la quantité élevée de MMs en surface. En effet le P est de par sa nature retenu aux minéraux via un mécanisme de sorption (Brady, Weil 2017).

Le ratio P_{tot}/MMs en fonction de la profondeur montre une relation nulle, avec une p.value non significative. Cela signifie que le P_{tot} retrouvé à toutes les profondeurs est dépendant des quantités de MMs. Par-conséquent à quantités égales de MMs, les quantités de P_{tot} ne changent pas. Ainsi l'hypothèse que nous avançons est que ces apports de P ne sont pas récents, si c'était le cas, à quantité égale de MMs il y aurait plus de P_{tot} en surface. En effet les apports récents d'engrais phosphatés minéraux sous forme d'ions orthophosphates H₂PO₄, HPO₄²⁻, PO₄³⁻, directement assimilables par les plantes, ont débuté pendant la première moitié du XIX^{ème} siècle et se sont largement accentués lors de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle (Frossard et al. 2004). Nous privilégions donc l'hypothèse de la minéralisation de la MO intercalée entre les couches de limons, laissant à la surface une large couche de MMs.

4.2 Matière organique et niveau d'eau

Contrairement à ce qu'avait observé Hemery (2023), la relation entre niveau moyen de la nappe et taux de MO est significative. Cela confirme que les données issues des chroniques piézométriques n'étaient pas assez complètes l'année précédente mais va aussi dans le sens de la littérature (Höper 2002; Łachacz et al. 2023). Des niveaux d'eau élevés sont un facteur essentiel afin de maintenir des taux de MO dans les tourbières. En effet l'activité des organismes du sol et la minéralisation microbienne sont contrôlées par la présence d'oxygène (Zhong, Jiang, Middleton 2020). Une semaine seulement d'oxygénation des tourbes profondes jamais exposées à l'air auparavant, provoque une perte de C considérable, qui n'augmente que très peu pour des périodes d'oxydation plus longues (Brouns, Verhoeven, Hefting 2014).

4.3 Vers une alternative à la constante 1.724

Le C_{org} est couramment déduit du taux de MO, le plus souvent en divisant par le coefficient 1.724. L'usage de ce coefficient calculé à partir des sols cultivés, suppose que les MO des sols étudiés contiennent également 58% de C_{org} (Pribyl 2010).

Kechavarzi, Dawson, Leeds-Harrison (2010), ont montré que le rapport entre la MO et le C_{org} était égal à 1.797 pour des tourbes minérotrophes. Or nous avons montré que le modèle qui illustre le mieux la relation entre la MO et le C_{org} est de type cubique.

Jusqu'à 15 % de MO la relation linéaire est adaptée, mais pour des sols tourbeux aux quantités de MO supérieures à 50% c'est la relation cubique qui représente le mieux la dispersion des

données. En effet la relation linéaire calculée à l'aide du coefficient 1.724 surestime la quantité de Corg présente lorsque les quantités de MO augmentent. Pribyl (2010) a montré que dans la plupart des études réalisées lors des 120 dernières années, le facteur 1.724 était trop faible et qu'il surestime la quantité de C par rapport à la MO.

5. Conclusion

Cette étude a permis de compléter la description des profils de sols des tourbières alcalines minérotrophes des Hauts-de-France, en étudiant la profondeur -25cm. Cela a permis de capturer les processus d'altération en cours de nos tourbes alcalines drainées. Ainsi sur un gradient d'altération croissante, les taux de MO et les C/N diminuent, tandis que les taux de MMs et Ptot augmentent à proximité de la surface. Ceci traduit une dégradation des tourbes des vallées de la Somme et de l'Authie dans les premiers horizons du sol. Depuis l'étude précédente réalisée en 2023, l'ajout d'une année supplémentaire aux données piézométriques a permis d'établir un lien entre les niveaux moyens d'eau actuel et le taux de MO. En effet la tendance générale montre que plus les niveaux sont bas, plus les taux de MO sont bas aussi. Enfin cette étude a permis de montrer que le facteur de conversion (1.724) utilisé afin de déterminer le Corg à partir du taux de MO n'est pas adapté. Une relation de type cubique est plus appropriée pour décrire le lien entre la MO et le C de nos sols tourbeux.

Bibliographie

AFES, 2009. Référentiel pédologique 2008. . 2009. Vol. 3e ed, pp. 435.

AHMAD, Sate, LIU, Haojie, GÜNTHER, Anke, COUWENBERG, John et LENNARTZ, Bernd, 2020. Long-term rewetting of degraded peatlands restores hydrological buffer function. *Science of The Total Environment*. 20 décembre 2020. Vol. 749, pp. 141571. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.141571.

BERQUER, Adrien, 2024. *Communication personnelle*. 2024.

BRADY, Nyle C et WEIL, Ray R, 2017. *The nature and properties of soil*. 15 eme edition.

BROUNS, Karlijn, VERHOEVEN, Jos T. A. et HEFTING, Mariet M., 2014. Short period of oxygenation releases latch on peat decomposition. *Science of The Total Environment*. 15 mai 2014. Vol. 481, pp. 61-68. DOI 10.1016/j.scitotenv.2014.02.030.

BYRNE, Kenneth A, CHOJNICKI, Bogdan, CHRISTENSEN, Torben R, DROSLER, Matthias, FROLKING, Steve, LINDROTH, Anders, MAILHAMMER, Julia, MALMER, Nils, SELIN, Pirkko, TURUNEN, Jukka, VALENTINI, Riccardo et ZETTERBERG, Lars, 2004. EU Peatlands: Current Carbon Stocks and Trace Gas Fluxes. . 2004.

CHAMBERS, Frank, BEILMAN, David et YU, Zhuochen, 2010. Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics. *Mires and Peat*. 1 janvier 2010. Vol. 7, pp. 1-10.

CLOQUIER, Christophe, 2006. Cloquier - L'extraction et l'exploitation de la tourbe (Quadrilobe, 2006). . 1 janvier 2006.

CONVENTION SUR LES ZONES HUMIDES, 2021a. *Restaurer les tourbières drainées : une étape nécessaire à la réalisation des objectifs climatiques mondiaux. Note d'orientation 5* [en ligne]. Gland, Suisse : Le secrétariat de la Convention sur les zones humides. [Consulté le 6 juin 2024]. Disponible à l'adresse : https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/rpb5_restoring_drained_peatlands_f.pdf

CONVENTION SUR LES ZONES HUMIDES, 2021b. 11 : *Réhumidification et restauration des tourbières : lignes directrices mondiales* [en ligne]. Rapport technique Ramsar. Gland, Suisse :

Le secrétariat de la Convention sur les zones humides. [Consulté le 4 juin 2024]. Disponible à l'adresse :

https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/rtr11_peatland_rewetting_restoration_f.pdf

CUBIZOLLE, Hervé, 2019. *Les tourbières et la tourbe. Géographie, hydro-écologie, usages et gestion conservatoire*. Tec & Doc. Collection Environnement.

DEBUF, Olivier, 2018. *Carte des précipitations annuelles*. 2018.

DUBOIS, P, 1908. Les tourbières de la Somme. Notre Picardie, juin 1908. . juin 1908. pp. 94-98.

FROSSARD, E, JULIEN, P, NEYROUD, J-A et SINAJ, S, 2004. *Le phosphore dans les sols. État de la situation en Suisse. Cahier de l'environnement no 368. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne. 180 p. 2004.*

GARCIA, Chloé, 2024. *Les tourbières de la vallée de la Somme : trajectoires entre contrôle climatique et influence anthropique depuis le Tardiglaciaire*. Université de Picardie Jules Verne.

GARCIA, Chloé, ANTOINE, Pierre et BRASSEUR, Boris, 2022. Les séquences tourbeuses des fonds de vallées du bassin de la Somme (France) : historique des recherches, diversité des concepts et perspectives. . 2022. DOI <https://doi.org/10.4000/quaternaire.16574>.

GOBAT, J.-M, BUTTLER, Alexandre, MATTHEY, Y. et GROSVERNIER, Philippe, 1991. Un triangle granulométrique pour les tourbes: analyse semi-automatique et représentation graphique. . 1 janvier 1991. Vol. 29.

HEMERY, Elodie, 2023. *Caractérisation de la dégradation des tourbes alcalines des vallées de l'Authie et de la Somme*.

HOOIJER, A., PAGE, S., JAUHAINEN, J., LEE, W. A., LU, X. X., IDRIS, A. et ANSHARI, G., 2012. Subsidence and carbon loss in drained tropical peatlands. *Biogeosciences*. 20 mars 2012. Vol. 9, n° 3, pp. 1053-1071. DOI [10.5194/bg-9-1053-2012](https://doi.org/10.5194/bg-9-1053-2012).

HÖPER, Heinrich, 2002. Carbon and nitrogen mineralisation rates of fens in Germany used for agriculture. A review. In : BROLL, Gabriele, MERBACH, Wolfgang et PFEIFFER, Eva-Maria (éd.), *Wetlands in Central Europe: Soil Organisms, Soil Ecological Processes and Trace Gas Emissions* [en ligne]. Berlin, Heidelberg : Springer. pp. 149-164.

[Consulté le 25 juillet 2024]. ISBN 978-3-662-05054-5. Disponible à l'adresse : https://doi.org/10.1007/978-3-662-05054-5_8

KECHAVARZI, C., DAWSON, Q. et LEEDS-HARRISON, P. B., 2010. Physical properties of low-lying agricultural peat soils in England. *Geoderma*. 15 janvier 2010. Vol. 154, n° 3, pp. 196-202. DOI 10.1016/j.geoderma.2009.08.018.

KRÜGER, Jan Paul, LEIFELD, Jens, GLATZEL, Stephan, SZIDAT, Sönke et ALEWELL, Christine, 2015. Biogeochemical indicators of peatland degradation – a case study of a temperate bog in northern Germany. *Biogeosciences*. 19 mai 2015. Vol. 12, pp. 2861-2871. DOI 10.5194/bg-12-2861-2015.

ŁACHACZ, Andrzej, KALISZ, Barbara, SOWIŃSKI, Paweł, SMRECZAK, Bożena et NIEDŹWIECKI, Jacek, 2023. Transformation of Organic Soils Due to Artificial Drainage and Agricultural Use in Poland. *Agriculture*. mars 2023. Vol. 13, n° 3, pp. 634. DOI 10.3390/agriculture13030634.

LEIFELD, J., MÜLLER, M. et FUHRER, J., 2011. Peatland subsidence and carbon loss from drained temperate fens. *Soil Use and Management*. 2011. Vol. 27, n° 2, pp. 170-176. DOI 10.1111/j.1475-2743.2011.00327.x.

LEIFELD, Jens, STEFFENS, Markus et GALEGO-SALA, Angela, 2012. Sensitivity of peatland carbon loss to organic matter quality. *Geophysical Research Letters* [en ligne]. 2012. Vol. 39, n° 14. [Consulté le 13 juillet 2024]. DOI 10.1029/2012GL051856. Disponible à l'adresse : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2012GL051856>

MALMER, Nils, 1986. Vegetational gradients in relation to environmental conditions in northwestern European mires. . 1986. pp. 375-383.

MALMER, Nils et HOLM, Elis, 1984. Variation in the C/N-Quotient of Peat in Relation to Decomposition Rate and Age Determination with 210 Pb. *Oikos*. 1984. Vol. 43, n° 2, pp. 171-182. DOI 10.2307/3544766.

OTABBONG, Erasmus, FRISTEDT, Ann et OTABBONG, Iryna R., 2009. Phosphorus status, disposition and seasonal dynamics in the Swedish Kristianstad Riparian Histosol Wetlands. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B— Soil & Plant Science*. 1 mars 2009. Vol. 59, n° 2, pp. 179-188. DOI 10.1080/09064710802434371.

PARISH, F, SIRIN, A, CHARMAN, D, JOOSTEN, H, MINAYEVA, T, SILVIUS, M et STRINGER, L, 2008. *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Wageningen. : Global Environment Centre, Kuala Lumpur & Wetlands International.

PRIBYL, Douglas W., 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma*. 15 mai 2010. Vol. 156, n° 3, pp. 75-83. DOI 10.1016/j.geoderma.2010.02.003.

RAHMAN, Arifur, DIDENKO, Nataliia, SUNDERMEIER, Allan, KHANDAKAR, . et ISLAM, Rafiq, 2021. Agricultural Management Systems Impact on Soil Phosphorous Partition and Stratification. *Water, Air, & Soil Pollution*. 24 juin 2021. Vol. 232. DOI 10.1007/s11270-021-05196-y.

RAMSAR, 2014. La Convention sur les zones humides : introduction. . 2014.

SZAJDAK, Lech W., JEZIERSKI, Adam, WEGNER, Kazimiera, MEYSNER, Teresa et SZCZEPAŃSKI, Marek, 2020. Influence of Drainage on Peat Organic Matter: Implications for Development, Stability, and Transformation. *Molecules*. 2 juin 2020. Vol. 25, n° 11, pp. 2587. DOI 10.3390/molecules25112587.

TANNEBERGER, Franziska, ABEL, Susanne, COUWENBERG, John, DAHMS, Tobias, GAUDIG, Greta, GÜNTHER, Anke, KREYLING, Jürgen, PETERS, Jan, PONGRATZ, Julia et JOOSTEN, Hans, 2021. Towards net zero CO₂ in 2050: An emission reduction pathway for organic soils in Germany. *Mires and Peat*. 26 janvier 2021. Vol. 27, n° 05, pp. 1-17. DOI 10.19189/MaP.2020.SNPG.StA.1951.

VAN LOON, A.H., SCHOT, Paul, BIERKENS, M.F.P., GRIFFIOEN, J. et WASSEN, Martin, 2009. Local and regional impact of anthropogenic drainage on fen contiguity. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 12 octobre 2009. Vol. 6. DOI 10.5194/hessd-6-4379-2009.

VERHOEVEN, J. T. A., MALTBY, E. et SCHMITZ, M. B., 1990. Nitrogen and Phosphorus Mineralization in Fens and Bogs. *Journal of Ecology*. 1990. Vol. 78, n° 3, pp. 713-726. DOI 10.2307/2260894.

WILSON, David, BLAIN, Dominique, COUWENBERG, J., EVANS, C.D., MURDIYARSO, Daniel, PAGE, Susan, RENOU-WILSON, Florence, RIELEY, Jack, SIRIN, A., STRACK, Maria et TUITTILA, Eeva-Stiina, 2016. Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat*. 1 avril 2016. Vol. 17. DOI 10.19189/MaP.2016.OMB.222.

WÓJCICKI, Krzysztof J., SZYMCZYK, Artur et NITA, Małgorzata, 2020. Influence of late Holocene alluviation on the degradation of peat-forming wetlands as exemplified by the lower reach of the Osobłoga River valley, southern Poland. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 1 janvier 2020. Vol. 537, pp. 109461. DOI 10.1016/j.palaeo.2019.109461.

ZAK, Domink, MCLNNES, Robert et GELBRECHT, Jörg, 2016. Managing Phosphorus Release from Restored Minerotrophic Peatlands. In : *The wetland Book*. C.M. Finlayson et al. (eds.).

ZANELLA, Augusto, WAAL, Rein, DELFT, Bas, PONGE, Jean-François, JABIOL, Bernard, NOBILI, Maria, FERRONATO, Chiara, GOBAT, Jean-Michel et VACCA, Andrea, 2018. Humusica 2, article 9: Histic humus systems and forms – Specific terms, diagnostic horizons and overview. *Applied Soil Ecology*. 1 janvier 2018. Vol. 122, pp. 148-153. DOI 10.1016/j.apsoil.2017.05.026.

ZEITZ, Jutta et VELTY, Silke, 2002. Soil properties of drained and rewetted fen soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2002. Vol. 165, n° 5, pp. 618-626. DOI 10.1002/1522-2624(200210)165:5<618::AID-JPLN618>3.0.CO;2-W.

ZHONG, Yehui, JIANG, Ming et MIDDLETON, Beth A., 2020. Effects of water level alteration on carbon cycling in peatlands. *Ecosystem Health and Sustainability*. 16 décembre 2020. Vol. 6, n° 1, pp. 1806113. DOI 10.1080/20964129.2020.1806113.

Annexe 1 : Échelle de décomposition des horizons histiques selon von Post

Degré de l'échelle	Décomposition	Structures végétales avant le test	Présence de matières amorphes	Ce qui passe entre les doigts par pression dans la main	Nature du résidu restant dans la paume de la main
1	Nulle	Parfaitement identifiables	Nulle	Eau limpide	Végétaux non décomposés
2	Insignifiante	Facilement identifiables	Nulle	Eau de couleur jaune à brune	Végétaux très peu décomposés
3	Très faible	Identifiables	Très faible	Eau de couleur brune à noire	Végétaux peu décomposés – masse fibreuse faiblement humide
4	Faible	Difficilement identifiables	Faible	Eau turbide	Le résidu (humide) est de consistance légèrement granuleuse
5	Moyenne	Reconnaissables, mais non identifiables	Moyenne	Eau turbide, avec un peu de matière solide	Résidu pâteux détrempe, structures végétales encore visibles à l'œil nu
6	Moyenne à forte	Non reconnaissables	Élevée	Eau boueuse : moins du 1/3 de la matière solide passe entre les doigts	Résidu granuleux et mou, avec quelques structures végétales visibles
7	Forte	Indistinctes	Très élevée	Eau boueuse : environ la moitié de la matière solide passe entre les doigts	Résidu détrempe, avec quelques structures végétales visibles
8	Très forte	Très indistinctes	Très élevée	Boue : les 2/3 de la matière solide passent entre les doigts	Résidu mou et détrempe, avec parfois des résidus ligneux non décomposés
9	Presque totale	Pratiquement non discernables	Très élevée	Presque tout le mélange homogène eau-matière solide passe entre les doigts	La structure des végétaux inclus dans le résidu en faible quantité est rarement reconnaissable
10	Totale	Non discernables	Très élevée	Toute la masse homogène passe entre les doigts	Pas de résidu

Annexe 2 : Indice de couvert arboré par point de sondage et site entre 1947 et 2021.

Sites	CODE_ECH	Années	Point												
DOU	DOU1	1947	1	LON	LON1	1966	1	ROU	ROU1	1947	0	MOR	MOR1	1947	0
DOU		1964	1	LON		1974	1	ROU		1965	0	MOR		1965	0
DOU		1981	1	LON		1982	1	ROU		1981	0	MOR		1982	1
DOU		2000	1	LON		2002	1	ROU		2000	0	MOR		2002	1
DOU		2021	1	LON		2021	1	ROU		2021	0,5	MOR		2021	1
Total			5	Total			5	Total			0,5	Total			3
DOU	DOU3	1947	1	LON	LON3	1966	0	ROU	ROU3	1947	0,5	MOR	MOR2	1947	0
DOU		1964	1	LON		1974	0,5	ROU		1965	0,5	MOR		1965	0
DOU		1981	1	LON		1982	1	ROU		1981	1	MOR		1982	0,5
DOU		2000	1	LON		2002	0,5	ROU		2000	1	MOR		2002	1
DOU		2021	0,5	LON		2021	0	ROU		2021	1	MOR		2021	0
Total			4,5	Total			2	Total			4	Total			1,5
DOU	DOU5	1947	0	LON	LON4	1966	0	ROU	ROU5	1947	0	MOR	MOR4	1947	0,5
DOU		1964	1	LON		1974	0,5	ROU		1965	0	MOR		1965	0,5
DOU		1981	1	LON		1982	1	ROU		1981	0	MOR		1982	0
DOU		2000	1	LON		2002	1	ROU		2000	0	MOR		2002	1
DOU		2021	0,5	LON		2021	1	ROU		2021	0,5	MOR		2021	1
Total			3,5	Total			3,5	Total			0,5	Total			3
DOU	DOU6	1947	0	LON	LON6	1966	0	ROU	ROU6	1947	0	MOR	MOR6	1947	0
DOU		1964	0	LON		1974	1	ROU		1965	0	MOR		1965	0
DOU		1981	0,5	LON		1982	1	ROU		1981	0	MOR		1982	1
DOU		2000	0,5	LON		2002	1	ROU		2000	0	MOR		2002	1
DOU		2021	1	LON		2021	0	ROU		2021	0,5	MOR		2021	1
Total			2	Total			3	Total			0,5	Total			3
				LON	LON8	1966	0								
				LON		1974	0								
				LON		1982	0								
				LON		2002	1								
				LON		2021	1								
				Total			2								
				LON	LON9	1966	0								
				LON		1974	0								
				LON		1982	0,5								
				LON		2002	0,5								
				LON		2021	0,5								
				Total			1,5								

Annexe 3 : Statistiques des modèles entre la profondeur (cm) et le nombre d'heures émergées.

Sign = Significativité : (***) : 0.001, (**) : 0.01, (*) : 0.05, ns : non significatif au seuil de 5%.

Jeu de données complet

Modèles		Valeurs	F	Adj R ²	p.value Sign
Im (Profondeur ~ heures émergées)	Ordonnée à l'origine	$1.034 * 10^2$			(***)
	Profondeur	$- 7.669 * 10^{-3}$	76.57	0.346	$5.61 * 10^{-15}$ (***)