

**Travail de fin d'études en sciences et technologies de l'environnement :
Dynamique du carbone du sol dans un ancien méandre de la plaine alluviale de
l'Emmels (Amblève, Belgique)**

Auteur : Wagelmans, Guillaume

Promoteur(s) : 28899; Kovacs, Nicolas

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2025-2026

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/25955>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Dynamique du carbone du sol dans un ancien méandre de la plaine alluviale de l'Emmels (Amblève, Belgique)

GUILLAUME WAGELMANS

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2025-2026

CO-PROMOTEURS: Pr. JEROEN MEERSMANS & NICOLAS KOVACS

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur, du Pr Jeroen Meersmans et de Nicolas Kovacs.

Le présent document n'engage que son auteur.

© This document may only be reproduced by any means with the permission of the author, Prof. Jeroen Meersmans and Nicolas Kovacs.

This document is the sole responsibility of its author.

Dynamique du carbone du sol dans un ancien méandre de la plaine alluviale de l'Emmels (Amblève, Belgique)

GUILLAUME WAGELMANS

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2025-2026

CO-PROMOTEURS: Pr. JEROEN MEERSMANS & NICOLAS KOVACS

Contributions institutionnelles

Cette étude a été réalisée dans le cadre de mon master à Gembloux Agro-Bio Tech (Université de Liège), au sein de l'Axe 'Echanges Eau – Sol – Plante'. Le matériel technique et certains résultats complémentaires ont été fournis par la KU Leuven. Les travaux de terrain ont été effectués dans une réserve gérée par Natagora. Cette étude s'inscrit dans le projet RECARBON, qui vise à évaluer le rôle des plaines alluviales belges dans le stockage du carbone et l'impact des pratiques de gestion des terres sur la dynamique du carbone des sols.



RECARBON



Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mes promoteurs, **Pr Jeroen Meersmans** et **Nicolas Kovacs**, pour leur soutien constant tout au long de cette étude. Merci de m'avoir guidé dans ma réflexion scientifique, de m'avoir accompagné sur le terrain à plusieurs reprises, et de m'avoir transmis votre expérience et votre rigueur avec patience et bienveillance.

Je souhaite également remercier **Matthias Maindiaux** pour son aide précieuse lors des sorties de terrain, **Robin Tersago** pour son soutien avec le Licor, et **Stéphane Becquevort** pour sa gentillesse et pour avoir facilité l'accès au matériel nécessaire pour les mesures et analyses. Leur soutien a grandement contribué à la bonne réalisation des travaux sur le terrain.

Un grand merci à toute **l'équipe enseignante, aux techniciens et à tout le personnel de la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech**, qui m'ont accompagné tout au long de ces années. Grâce à vous, j'ai pu progresser et acquérir les compétences nécessaires pour devenir bioingénieur, tout en profitant de votre soutien, vos conseils et votre disponibilité au quotidien.

Enfin, je tiens à remercier **ma famille**, pour son soutien inconditionnel depuis toutes ces années. On ne leur dit jamais assez combien on les aime, mais leur présence et leurs encouragements ont été essentiels pour mener à bien ce travail.

Abstract

This study analyzes the spatial variability of soil CO₂ and CH₄ fluxes within the floodplain of the Emmels River, with a particular focus on the role of an abandoned meander as a structuring element of biogeochemical functioning. Gas fluxes were measured in different topographic zones of the floodplain, corresponding to distinct floodplain sectors characterized by contrasting soil functioning, and were interpreted based on the physical and chemical properties of the soils. The results show that CO₂ fluxes differ strongly among zones, with carbon-stock-normalized respiration (R_s) values significantly higher in intermediate floodplain areas ($\approx 44.9 \text{ mgC-CO}_2 \text{ gC}^{-1}$ over 0–10 cm), indicating more intense carbon mineralization per unit of stored carbon. In contrast, the abandoned meander is characterized by lower CO₂ fluxes but higher CH₄ emissions, related to higher soil moisture and restricted oxygen availability. The analysis of thermal sensitivity highlights marked contrasts among zones, with Q_{10} values ranging from ≈ 1.83 in the best-drained floodplain sectors to ≈ 7.29 in the abandoned meander for normalized respiration, whereas CH₄ fluxes show very low sensitivity to temperature ($Q_{10} \approx 0.21$). These results demonstrate that soil–atmosphere fluxes in the Emmels floodplain are strongly controlled by the spatial distribution of hydrological conditions and soil properties, and suggest that the role of abandoned meanders in carbon storage and transformation may be underestimated when analyses are restricted to superficial soil horizons.

Keywords: floodplain, abandoned meander, soil respiration, CO₂, CH₄, soil organic carbon, soil moisture, hydromorphic zone

Résumé

Cette étude analyse la variabilité spatiale des flux de CO₂ et de CH₄ du sol au sein de la plaine alluviale de la rivière Emmels, en mettant l'accent sur le rôle d'un ancien méandre comme élément structurant du fonctionnement biogéochimique. Les flux de gaz ont été mesurés dans différentes zones topographiques de la plaine alluviale, correspondant à des secteurs distincts de la plaine alluviale, présentant des fonctionnements du sol différents, et interprétés à partir des propriétés physiques et chimiques des sols. Les résultats montrent que les flux de CO₂ diffèrent fortement entre zones, avec des valeurs de respiration normalisée au stock de carbone (R_s) significativement plus élevées dans les zones intermédiaires de la plaine alluviale ($\approx 44,9 \text{ mgC-CO}_2 \text{ gC}^{-1}$ sur 0–10 cm), indiquant une minéralisation du carbone plus intense par unité de carbone stocké. À l'inverse, l'ancien méandre se caractérise par des flux de CO₂ plus faibles mais par des émissions de CH₄ plus élevées, en lien avec une humidité du sol plus élevée et une limitation de l'oxygénation. L'analyse de la sensibilité thermique met en évidence des contrastes marqués entre zones, avec des valeurs de Q_{10} comprises entre $\approx 1,83$ dans les secteurs les mieux drainés et $\approx 7,29$ dans l'ancien méandre pour la respiration normalisée, tandis que les flux de CH₄ présentent une très faible sensibilité à la température ($Q_{10} \approx 0,21$). Ces résultats montrent que les flux sol-atmosphère dans la plaine alluviale de l'Emmels sont fortement contrôlés par la distribution spatiale des conditions hydriques et des propriétés du sol, et suggèrent que le rôle des anciens méandres dans le stockage et la transformation du carbone pourrait être sous-estimé lorsque l'analyse se limite aux horizons superficiels du sol.

Mots-clés : plaine alluviale, ancien méandre, respiration du sol, CO₂, CH₄, carbone organique du sol, humidité du sol, zone hydromorphe

Table des matières

Remerciements.....	i
Abstract	ii
Résumé.....	iii
Liste des Figures	vi
Liste des Tableaux	vii
Acronymes.....	viii
1. Introduction	1
1.1 Changements climatiques.....	1
1.2 Stockage du carbone dans le sol.....	1
1.3 Plaine alluviale et ses services écosystémiques	3
1.4 Reméandrage	4
1.5 Objectifs de l'étude	6
2. Matériel et méthodes :	7
2.1 Zone d'étude	7
2.1.1 Terrain	7
2.1.2 Biodiversité	8
2.1.3 Climat.....	9
2.2 Plan d'échantillonnage	9
2.3 Mesures du sol et analyses laboratoire.....	12
2.3.1 Échantillonnage du sol à l'aide des tarières	12
2.3.2 Combustion sèche pour C_{org} et N_{total}	13
2.3.3 Stock de carbone.....	14
2.3.4 Pédologie	14
2.4 Mesure de gaz	16
2.4.1 Mesure des émissions de GES du sol.....	16
2.4.2 Température et humidité du sol.....	17
2.4.3 Emissions de GES du sol	18
2.5 Analyse statistique	20
2.6 Organigramme méthodologique.....	22
3. Résultats et discussion	23
3.1 Propriétés physique et chimique du sol	23
3.1.1 Humidité	23
3.1.2 Densité apparente et Carbone du sol	25
3.1.3 Stock de carbone du sol et carbone racinaire.....	28

3.1.4 Azote.....	31
3.2 Flux de gaz	35
3.2.1 Flux surfacique de CO ₂	35
3.2.2 Flux surfacique de CH ₄	36
3.2.3 Flux normalisé R _S	39
3.2.4 Analyse des flux selon la température et l'humidité	41
3.3 Avantages perçus d'un reméandrage à partir des résultats de l'étude	47
3.4 Limitations et perspectives	48
4. Contributions	49
5. Conclusion	50
Bibliographie	51
Annexe.....	56
A. Photos des espèces présentes dans la réserve de l'Emmels (sources : Wikipédia, s.d.).....	56
B. Coordonnées du transect établi par la KU Leuven (Alexander James, PhD student, KU Leuven)	56
C. Coordonnée des points de mesure de GES (anneaux PVC) du dispositif expérimental (Lambert Belge 2008)	57
D. Pédologie de la zone d'étude	58
E. Photo d'un macrofossile de racine fractionné (source : photo personnelle).....	59
F. Courbe de calibration de la zone Coll	59
G. Graphique du stock de carbone du sol sur les 20 premiers centimètres du sol en fonction de sa teneur en carbone	60
H. Flux surfacique moyen de CO ₂ par site sur l'ensemble de la période d'étude. La température et l'humidité journalières sont présentées par la moyenne ± écart-type	60
I. Flux cumulé de CO ₂ sur l'ensemble de la période d'étude. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques (intervalle de confiance à 95 %)	61
J. Flux surfacique de CH ₄ pour chaque anneau	61
K. Flux cumulé de CH ₄ sur l'ensemble de la période d'étude. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques (intervalle de confiance à 95 %)	62
L. Flux normalisé R _S cumulé sur l'ensemble de la période d'étude en prenant en compte un SOC _{Stock} de 20 cm. . Les valeurs sont exprimées en moyenne ± écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques (intervalle de confiance à 95 %)	63

Liste des Figures

Figure 1 : Piégeage du CO ₂ dans le sol et phénomènes de respiration (Even et al., 2021)	2
Figure 2: Carte de la Wallonie avec un point rouge représentant la commune d'Amblève (gauche) et zoom sur la zone d'étude encadrée en rouge et ses alentours (droite)	7
Figure 3: MNT à 0,5m de résolution avec encadré en rouge, la zone d'étude	8
Figure 4 : Transect réalisé par la KU Leuven (rouge), estimation de la localisation de l'ancien méandre (bleu) et points de mesure des flux de GES (jaune).....	10
Figure 5 : Section transversale interprétée de la plaine inondable du transect réalisé par la KU Leuven. La classification dans la légende est effectuée en fonction de la teneur en carbone : > 20 % correspond à de la tourbe, > 10 % à un sol riche en matière organique et < 10 % à des dépôts alluviaux. (Source : Alexander James, PhD student, KU Leuven, communication personnelle)	11
Figure 6 : Design d'un site expérimental	12
Figure 7 : Tarière Edelman (gauche) et tarière à gouge (droite)	13
Figure 8 : Profils de sol à la tarière Edelman	15
Figure 9 : Matériel de mesure : Téléphone servant au contrôle de la chambre (1), Analyseur portable (2), Chambre (Smart Chamber) (3), Sonde 5TM (4), Lecteur portatif ProCheck (5) et Anneau en PVC (6) source : photo personnelle.....	16
Figure 10 : Lecteur portatif ProCheck et sonde 5TM placée dans le sol (source : photo personnelle)	17
Figure 11 : Organigramme méthodologique de l'étude	22
Figure 12 : Boxplot de l'humidité volumique du sol (0-10 cm) selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %	24
Figure 13 : Densité apparente en fonction du carbone organique.....	25
Figure 14 : Boxplot de la densité apparente du sol (0-20 cm) selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %	26
Figure 15 : Boxplot du carbone organique (0-20 cm) du sol selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %	26
Figure 16 : Boxplots du stock de carbone organique du sol selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %	28
Figure 17 : Boxplot du stock de carbone racinaire du sol (0-20 cm) selon les zones topographiques. La même lettre n'indique aucune différence significative entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %	29
Figure 18 : Boxplot de l'azote totale du sol (0-20 cm) selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %	32
Figure 19 : Boxplot du rapport C/N du sol (0-20 cm) selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %	33
Figure 20 : Boxplot du flux surfacique de CO ₂ selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %	35
Figure 21 : Flux surfacique de CH ₄ par site.....	37
Figure 22 : Flux cumulé sur la période d'étude en équivalent CO ₂ pour le CO ₂ et le CH ₄	38
Figure 23 : Flux normalisé RS moyen par site sur l'ensemble de la période d'étude. La température et l'humidité journalières sont présentées par la moyenne ± écart-type	39
Figure 24 : Flux normalisé R _s cumulé pour l'ensemble de la période d'étude	40

Figure 25 : Ajustement de la respiration du sol selon les zones topographiques, modélisation Q_{10} basée sur la température du sol	42
Figure 26 : Ajustement de l'émission de CH_4 pour la zone M, modélisation Q_{10} basée sur la température du sol	43
Figure 27 : Résidus entre R_s mesurée et la courbe d'ajustement du modèle Q_{10} en fonction de l'humidité du sol en [%] selon les zones topographiques.	44
Figure 28 : Résidus entre le flux CH_4 mesuré et la courbe d'ajustement du modèle Q_{10} en fonction de l'humidité du sol en [%] pour la zone M.....	45

Liste des Tableaux

Tableau 1: Température et précipitation mensuelles pour la station de SPA (6490)	9
Tableau 2 : Humidité volumique du sol (0-10 cm) selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques (intervalle de confiance à 95 %)	23
Tableau 3 : Densité apparente et carbone organique du sol selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques (intervalle de confiance à 95 %)...	26
Tableau 4 : Stock de carbone organique du sol et carbone racinaire selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %	28
Tableau 5 : Azote total du sol selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %	31
Tableau 6 : Rapport C/N du sol selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %	33
Tableau 7 : Flux surfacique de CO_2 du sol selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 % .	35
Tableau 8 : Flux surfacique de CH_4 du sol selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 % .	37
Tableau 9 : Flux normalisé R_s cumulé selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 % .	40
Tableau 10 : Résultats de Q_{10} et R_{10} pour le flux normalisé R_s (n=144) selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %	42
Tableau 11: Résultats de Q_{10} et R_{10} pour le flux de CH_4 (n=144) pour la zone M. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type	43
Tableau 12 : Pourcentage entre la respiration du sol R_s et la courbe d'ajustement du modèle Q_{10} en fonction de l'humidité du sol au-dessus et en-dessous de 0	44
Tableau 13 : : Pourcentage entre le flux de CH_4 et la courbe d'ajustement du modèle Q_{10} en fonction de l'humidité du sol au-dessus et en -dessous de 0	44

Acronymes

C : Carbone

CH₄ : Méthane

CO₂ : Dioxyde de carbone

EEA : European Environment Agency

FAO : Food and Agriculture Organization

GES : Gaz à effet de serre

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

MNT : Modèle numérique de terrain

N : Azote

SOC : Carbone organique du sol

SOC_{stock} : Stock de carbone organique

WMO : World Meteorological Organization

1. Introduction

1.1 Changements climatiques

Le réchauffement climatique correspond à une augmentation durable de la température moyenne de la planète provoquée par l'accumulation de gaz à effet de serre (GES) émis par les activités humaines, principalement le dioxyde de carbone (CO₂). Le Sixième Rapport de synthèse du GIEC montre que la température globale a progressé d'environ 1,1 °C entre 2011 et 2020 par rapport à l'ère préindustrielle (1850-1900), et attribue avec un niveau de confiance très élevé la majeure partie de ce réchauffement aux émissions anthropiques (IPCC, 2023). Les effets sont déjà mesurables : multiplication des vagues de chaleur, perte rapide de glace continentale et marine, élévation du niveau des océans et pressions croissantes sur les écosystèmes et les sociétés humaines (IPCC, 2023; WMO, 2024).

Les terres émergées jouent un rôle déterminant dans cette dynamique. Les écosystèmes naturels, notamment les forêts et les sols, absorbent une fraction significative du CO₂ atmosphérique, contribuant à atténuer l'intensité du réchauffement. Toutefois, la dégradation des écosystèmes, la déforestation et certaines pratiques agricoles réduisent cette capacité d'absorption et libèrent du carbone stocké, ce qui renforce le déséquilibre climatique (FAO, 2022; IPCC, 2023). La restauration écologique, la gestion durable des sols et la protection des espaces naturels figurent ainsi parmi les leviers recommandés pour stabiliser le climat à long terme (IPCC, 2023; FAO, 2022) du fait de leur rôle primordial dans le cycle du carbone.

1.2 Stockage du carbone dans le sol

Le sol constitue l'un des plus grands réservoirs de carbone terrestre et représente un élément central de la régulation du climat. On estime qu'il stocke plus de deux fois la quantité de carbone présente dans l'atmosphère et davantage que l'ensemble de la biomasse végétale (FAO, 2022; IPCC, 2023).

Ce carbone est majoritairement sous forme de matière organique dans le sol, issue de la décomposition des résidus végétaux, des racines et de l'activité microbienne. La capacité des sols à séquestrer le carbone dépend de multiples facteurs, comme la texture, le climat, la couverture végétale et les pratiques de gestion du sol. Lorsque les sols sont soumis à l'érosion, au labour intensif ou à la déforestation, une partie de ce

carbone est réémise sous forme de CO_2 , ce qui contribue directement au réchauffement (IPCC, 2023).

La dynamique du carbone dans les sols repose sur un équilibre entre les flux d'entrée et de sortie du carbone organique du sol (SOC), contrôlé par les interactions entre la végétation, les microorganismes et la matrice minérale du sol. Les principaux apports proviennent de la photosynthèse, via les résidus végétaux, la biomasse racinaire et les exsudats libérés dans la rhizosphère, tandis que les pertes sont dominées par la respiration hétérotrophe des microorganismes et la respiration autotrophe des racines et autres organismes autotrophes du sol (Figure 1) (Ontl & Schulte, 2012 ; Paustian et al., 2016 ; Even et al., 2021).

Une partie du SOC est rapidement minéralisée, mais une fraction peut être stabilisée à plus long terme grâce à des mécanismes de protection physique au sein d'agrégats, d'associations organo-minérales ou à cause de contraintes biologiques limitant l'accès des décomposeurs au substrat (Schmidt et al., 2011 ; Lehmann & Kleber, 2015 ; Chenu et al., 2019). L'intensité de ces processus est fortement modulée par les conditions environnementales, en particulier la température, l'humidité du sol, la texture et le mode de gestion, ce qui explique que les variations des stocks de carbone organique du sol ($\text{SOC}_{\text{stock}}$) s'observent généralement sur des échelles de temps pluriannuelles à décennales (Wiesmeier et al., 2019 ; Paustian et al., 2016).

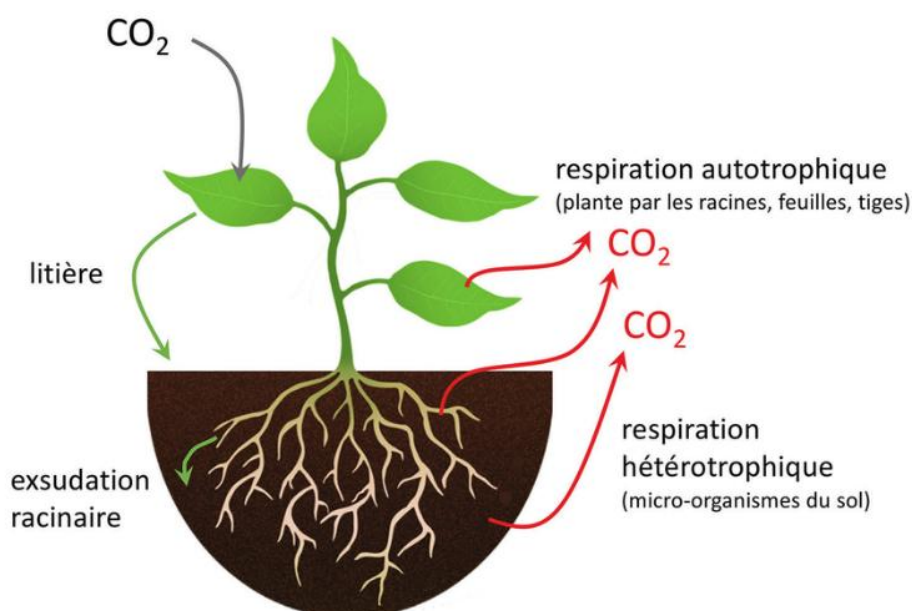


Figure 1 : Piégeage du CO_2 dans le sol et phénomènes de respiration (Even et al., 2021)

Des pratiques agroécologiques, telles que la réduction du travail du sol, l'intégration de cultures de couverture, la rétention des résidus végétaux ou l'agroforesterie, favorisent

l'accumulation de matière organique et renforcent durablement le stockage du carbone dans les horizons superficiels.

Des évaluations agricoles et environnementales récentes indiquent qu'une amélioration à grande échelle de ces pratiques permettrait de séquestrer plusieurs centaines de millions de tonnes de CO₂ par an, tout en augmentant la fertilité du sol, sa stabilité structurale et sa résilience face aux perturbations climatiques (FAO, 2022 ; Even et al., 2021). La promotion de ces approches ne constitue donc pas seulement une stratégie d'atténuation du changement climatique, mais aussi un levier essentiel pour maintenir la productivité agricole et la sécurité alimentaire dans un contexte de pression environnementale accrue.

1.3 Plaine alluviale et ses services écosystémiques

Les plaines alluviales sont des systèmes fluviaux dynamiques résultant des dépôts sédimentaires successifs des rivières. Elles associent nappes alluviales, zones humides, forêts riveraines et bras morts, dont la productivité élevée dépend de la fertilité des sols et de la variabilité hydrologique (Gurnell et al., 2016). Ces mosaïques écologiques reposent sur l'interaction entre écoulements, sédiments et végétation, assurant des conditions favorables à une grande diversité biologique.

Ces paysages fournissent des services écosystémiques essentiels. D'un point de vue hydrologique, la plaine d'inondation absorbe et redistribue les crues, ce qui limite la vitesse d'écoulement et réduit les risques d'inondation en aval. La recharge des aquifères et la filtration naturelle de l'eau résultent de l'infiltration dans les substrats alluvionnaires, processus renforcé par les communautés végétales des berges (Acreman & Holden, 2013). La restauration ou la reconnexion des plaines d'inondation améliore également la rétention des nutriments, notamment via la sédimentation et la dénitrification microbienne (Noe & Hupp, 2009).

Les plaines alluviales contribuent aussi à la régulation climatique. En effet, les sols hydromorphes, riches en matière organique et souvent saturés en eau, réduisent les taux de décomposition et favorisent la séquestration du carbone. Les zones ripariennes stockent ce carbone à la fois dans la biomasse ligneuse et dans les horizons superficiels (IPCC, 2023).

La perturbation des dynamiques géomorphologiques des plaines alluviales, notamment par drainage, recalibrage ou altération de la connectivité fluviale, peut transformer ces

milieux, qui sont initialement des puits de carbone, en sources émettrices de carbone et réduire leur fonction tampon face aux crues et à l'érosion (Quine et al., 2022).

Les plaines alluviales offrent également des services d'approvisionnement et sociaux essentiels : les sols enrichis par la sédimentation favorisent des systèmes agricoles à faible intensité, tandis que les habitats associés soutiennent la pêche, l'approvisionnement en eau et les usages culturels ou récréatifs (Arthington et al., 2018). Ils constituent également des espaces de forte valeur patrimoniale et de loisirs, contribuant au bien-être humain. Dans un contexte de changement climatique, les stratégies de gestion fondées sur la nature, restauration des lits majeurs, réduction de la canalisation et reconnectivité fluviale, sont recommandées pour maintenir ces fonctions (EEA, 2020 ; IPBES, 2018).

1.4 Reméandrage

Le reméandrage est une technique de renaturation de cours d'eau. Il désigne la restauration de la sinuosité naturelle d'un cours d'eau préalablement rectifié ou canalisé. Dans les systèmes fluviaux non modifiés, la formation des méandres résulte de l'équilibre dynamique entre écoulements, transport sédimentaire, cohésion des berges et développement de la végétation riparienne. Ces processus structurent des mosaïques d'habitats variés, favorisent la dissipation de l'énergie et assurent une connectivité fonctionnelle entre le chenal et la plaine d'inondation (Gurnell et al., 2016). Lorsqu'un cours d'eau est rectifié ou canalisé, cet équilibre est perturbé : la simplification du lit et l'accélération de l'écoulement entraînent une déconnexion de la plaine alluviale, une homogénéisation des habitats et une diminution de la diversité écologique, avec des conséquences sur les échanges hydrologiques et biogéochimiques (Maaß et al., 2021).

Le reméandrage vise à rétablir ces processus en augmentant la sinuosité du chenal, en diversifiant les largeurs, profondeurs et vitesses d'écoulement, et en renforçant les interactions eau-sol-végétation. Plusieurs études récentes montrent que la restauration de la géométrie naturelle et de la connectivité rivière-plaine, via la restauration de méandres ou la reconnexion des plaines, améliore la diversité des habitats aquatiques et benthiques, favorise la recolonisation par des communautés plus sensibles et renforce la résilience écologique du système fluvial (Claeson et al., 2025; Stoffers et al., 2022 ; Kail et al., 2015). La création d'alternances de radiers et de mouilles, typiques des chenaux sinueux, contribue notamment à une meilleure structuration physique du lit, essentielle au maintien des assemblages biologiques.

Sur le plan hydrologique, le reméandrage ralentit l'écoulement et favorise le débordement vers la plaine d'inondation lors des épisodes de crues. Cette reconnexion latérale augmente la capacité de rétention du cours d'eau, améliore la recharge des nappes alluviales et atténue les pics de crues en aval (Acreman & Holden, 2013 ; Wohl et al., 2015). En reconstituant des zones humides riveraines, il renforce également la capacité des milieux à filtrer les nutriments, via la sédimentation dans les bras morts et la dénitrification microbienne dans les sols saturés (Noe & Hupp, 2009).

Ces changements contribuent également à la régulation du carbone. Les milieux reconnectés et hydromorphes tendent à stocker davantage de matière organique, notamment grâce à des taux de minéralisation plus faibles en conditions saturées (IPCC, 2023). Les études suggèrent que la restauration de la complexité du chenal fluvial et l'extension des zones de plaine d'inondation actives peuvent augmenter le stockage de carbone dans les sols alluviaux, en favorisant l'accumulation de sédiments fins organiques dans les marges alluviales, renforçant ainsi la fonction de puits de carbone de ces écosystèmes (Quine et al., 2022). À l'inverse, la poursuite des rectifications et du drainage peut réduire la connectivité et transformer ces zones en sources nettes de carbone.

Dans un contexte de changements climatiques, le reméandrage est considéré comme une stratégie de restauration basée sur la nature efficace pour améliorer la résilience des territoires. En redonnant de l'espace aux cours d'eau et en rétablissant leur fonctionnement géomorphologique, il permet de réduire la vulnérabilité aux inondations, de soutenir la biodiversité et de restaurer les services écosystémiques associés aux plaines alluviales (EEA, 2020 ; IPBES, 2018). Les expériences montrent que ces interventions, lorsqu'elles s'appuient sur les processus naturels, offrent des bénéfices durables pour les écosystèmes et les sociétés humaines (Stoffers et al., 2021 ; Wohl et al., 2015).

1.5 Objectifs de l'étude

Les processus évoqués mettent en lumière l'importance du sol et des structures alluviales anciennes dans le stockage et la stabilisation du carbone. Le présent travail cherche à mieux caractériser la dynamique du carbone selon la position topographique et l'impact d'un ancien méandre, afin d'évaluer les bénéfices potentiels d'un reméandrage sur la séquestration du carbone et la résilience des sols. Les objectifs sont les suivants :

- Examiner comment la distribution topographique modifie les propriétés physico-chimiques des sols des prairies alluviales, en particulier les processus de respiration du sol et de dynamique du carbone.
- Mesurer les flux de CO₂ et de CH₄ dans le sol selon différentes zones topographiques en tenant compte de la position par rapport à un ancien méandre, et déterminer les principaux paramètres d'influence.
- Analyser les relations entre les stocks de carbone et les flux de respiration du sol afin d'évaluer dans quelle mesure l'empreinte d'un ancien méandre façonne la dynamique du carbone, et ainsi mieux cerner les bénéfices qu'un reméandrage pourrait apporter en termes de séquestration et de stabilité du carbone dans les écosystèmes alluviaux.

2. Matériel et méthodes :

2.1 Zone d'étude

2.1.1 Terrain

La zone d'étude ($50^{\circ}18'57.0''\text{N}$ $6^{\circ}08'26.2''\text{E}$) se situe dans la vallée du cours d'eau de l'Emmels, dans la commune d'Amblève (Figure 2), au sein de la province de Liège, en Belgique. Le site correspond à un milieu naturel faiblement aménagé dans la réserve naturelle de l'Emmels gérée par Natagora. La photographie du terrain (Figure 2) permet d'observer la structure ouverte du fond de vallée et la présence du couvert végétal le long du cours d'eau. La zone, encadrée en rouge, a été choisie en raison de la présence d'un ancien méandre, offrant un contexte hydro-géomorphologique particulièrement pertinent pour l'analyse. Le site est bordé au nord par des prairies permanentes utilisées pour le pâturage bovin.

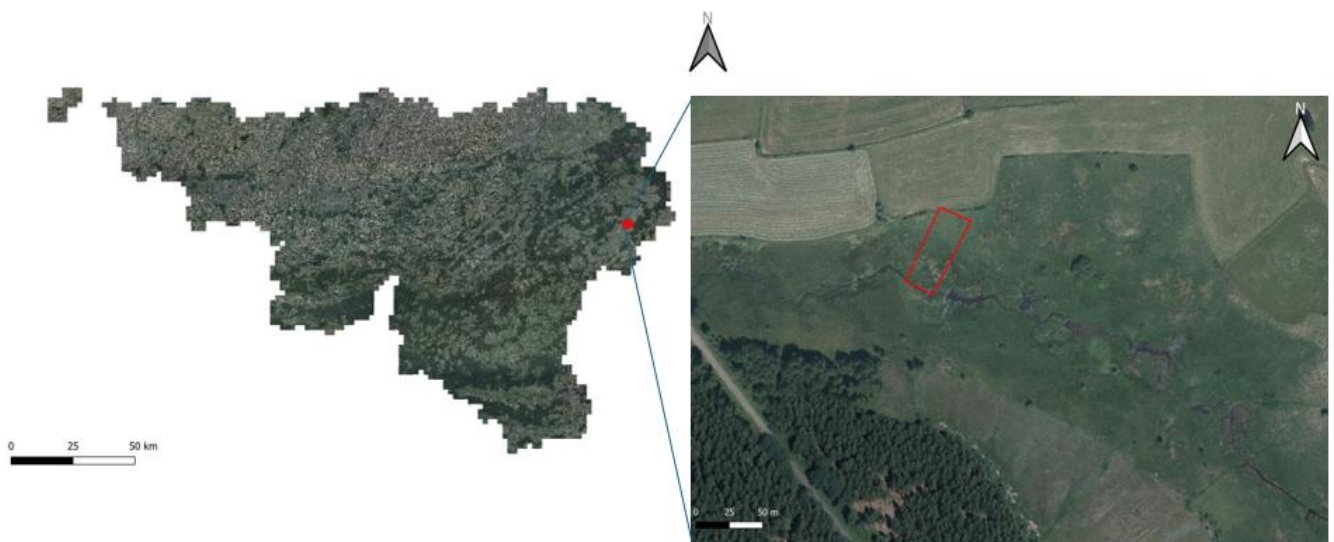


Figure 2: Carte de la Wallonie avec un point rouge représentant la commune d'Amblève (gauche) et zoom sur la zone d'étude encadrée en rouge et ses alentours (droite)

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) (Figure 3) met en évidence l'encaissement du lit de la vallée et les variations topographiques associées, confirmant la présence de zones d'accumulation préférentielle de l'eau locale liées à la dynamique hydrologique du cours d'eau.



Figure 3: MNT à 0,5m de résolution avec encadré en rouge, la zone d'étude

2.1.2 Biodiversité

Dans la zone étudiée, la végétation est typique des prairies humides de fond de vallée, dominée par des communautés à joncs et par des espèces hygrophiles. Les observations locales incluent notamment la présence de laîches telles que *Carex nigra* et *Carex echinata*, ainsi que des joncs, dont *Juncus squarrosus*, largement représenté. La flore comprend également, de manière ponctuelle, des espèces patrimoniales des milieux humides peu fertilisés, dont l'orchis tacheté (*Dactylorhiza maculata*) et la gentiane pneumonanthe (*Gentiana pneumonanthe*).

Sur le plan faunistique, ces habitats ouverts accueillent des espèces d'oiseaux associées aux prairies humides, telles que le tarier des prés (*Saxicola rubetra*) et la bécassine des marais (*Gallinago gallinago*). La présence du castor (*Castor fiber*) est également à souligner avec ses barrages qui modifient l'écosystème local et contribuent à la création d'habitats favorables à la biodiversité. Ces données sont issues du BioCheck de la réserve de l'Emmels (Natagora, 2025). Des illustrations des espèces mentionnées sont présentées en Annexe A.

2.1.3 Climat

La zone d'étude présente un climat tempéré humide, caractéristique de l'est de la Belgique, avec des températures modérées et des précipitations réparties tout au long de l'année. Les conditions climatiques de référence sont établies à partir des moyennes climatologiques (1991–2020) de la station météorologique de Spa (Institut Royal Météorologique de Belgique, s.d.), retenue pour sa proximité et son altitude comparable à celle de la zone d'étude (respectivement de 470 et 475 m). Les conditions météorologiques de l'automne 2025, ont été établies à partir des données mensuelles disponibles sur Infoclimat (Infoclimat, s.d.). Ces données sont visibles Tableau 1. La prise des mesures a été réalisée jusqu'à l'apparition des premières neiges (17 novembre 2025).

Tableau 1: Température et précipitation mensuelles pour la station de SPA (6490)

Période	Octobre	Novembre
1991-2020	9,6°C - 88mm	5,2°C - 97mm
2025	10,2°C - 45 mm	6,2°C - 65 mm

2.2 Plan d'échantillonnage

Le plan d'échantillonnage mis en œuvre dans cette étude vise à caractériser la variabilité spatiale des propriétés du sol et des flux de gaz au sein de la plaine alluviale. Les principes méthodologiques sont décrits plus en détail dans les sections 2.3 et 2.4.

Le plan d'échantillonnage a été adapté en se basant sur une première campagne d'échantillonnage réalisée par la KU Leuven (Alexander James, PhD student, KU Leuven). Les coordonnées de chaque échantillon se trouvent en Annexe B. La Figure 4 représente le plan d'échantillonnage de cette étude en rouge.

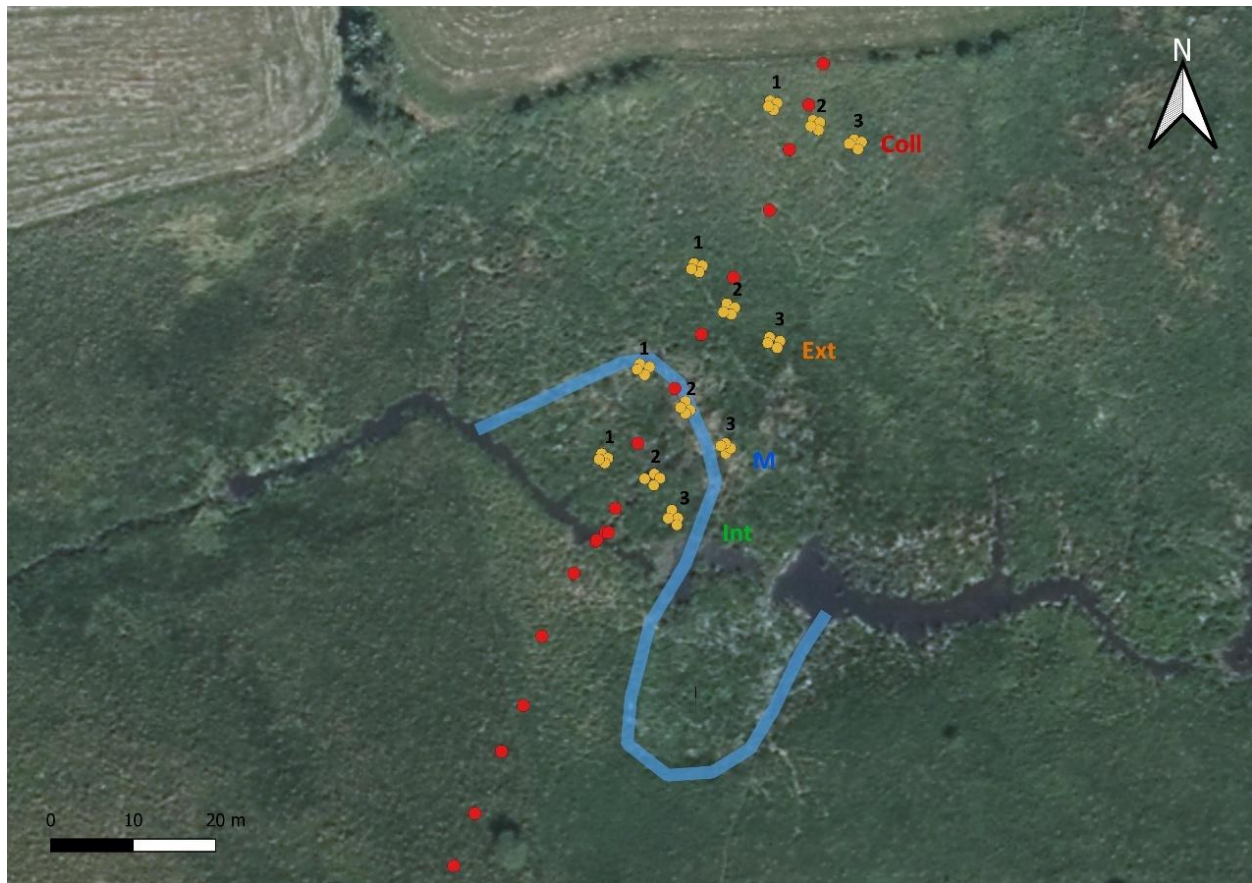


Figure 4 : Transect réalisé par la KU Leuven (rouge), estimation de la localisation de l'ancien méandre (bleu) et points de mesure des flux de GES (jaune)

Cette étude a permis de réaliser l'interprétation d'un transect (Figure 5) en déterminant 4 zones homogènes selon les différences de topographie et de géomorphologie (sur base de la rivière actuelle, de l'ancien méandre et des colluvions):

- Une zone colluviale, dans les colluvions (**Coll**)
- une zone externe, entre l'ancien méandre et les colluvions (**Ext**)
- une zone interne, entre la rivière et l'ancien méandre (**Int**)
- une zone sur l'ancien méandre (**M**)

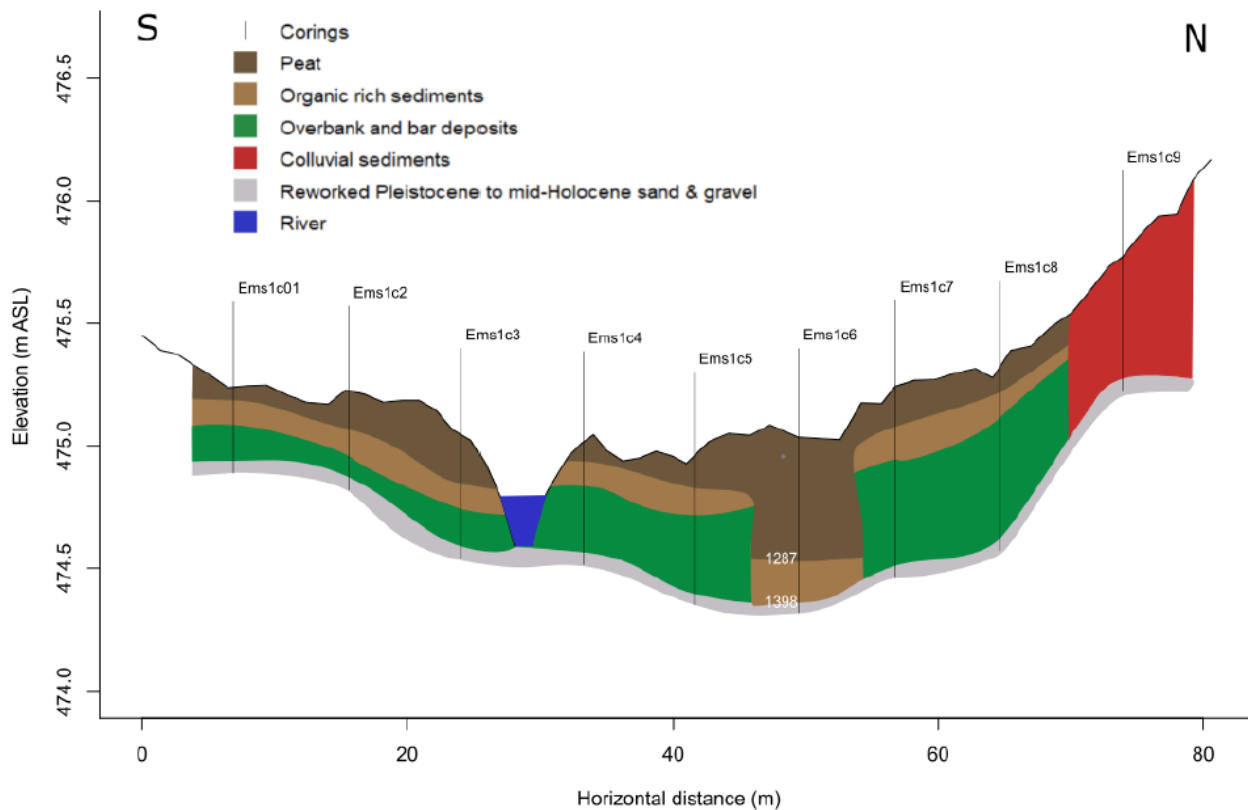


Figure 5 : Section transversale interprétée de la plaine inondable du transect réalisé par la KU Leuven. La classification dans la légende est effectuée en fonction de la teneur en carbone : > 20 % correspond à de la tourbe, > 10 % à un sol riche en matière organique et < 10 % à des dépôts alluviaux. (Source : Alexander James, PhD student, KU Leuven, communication personnelle)

Flux de gaz

Un dispositif expérimental (Figure 4) a été répliqué trois fois dans chacune des zones topographiques pour un total de 12 sites. Sur chaque site (Figure 6), quatre anneaux en PVC ont été installés afin de mesurer le flux de CO₂/CH₄ du sol (dans la surface de l'anneau PVC) et d'assurer le suivi des échanges gazeux du sol in situ. Les prélèvements et la pose des anneaux ont été adaptés à la morphologie du terrain. Au total, il y a 48 anneaux et donc 48 relevés par flux lors de chaque campagne.

Analyse du sol

En plus des mesures de gaz, cinq points de prélèvement de sol sur chacun des 12 sites ont également été déterminées afin de caractériser les propriétés physico-chimiques du sol. Une analyse visuelle de la pédologie a permis de compléter l'interprétation réalisée à la Figure 5. Les méthodes et instruments utilisés pour l'échantillonnage et les analyses sont décrits en détail dans les sections suivantes.

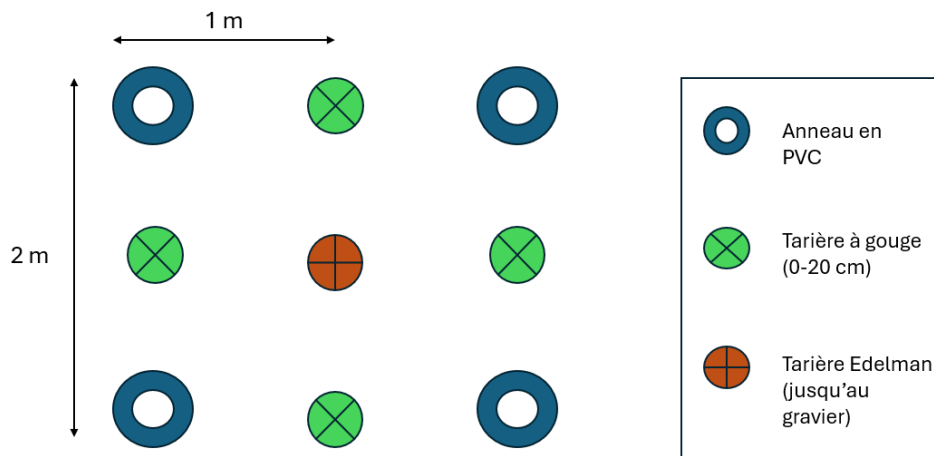


Figure 6 : Design d'un site expérimental

Pour assurer une localisation précise des points d'échantillonnage, les coordonnées GPS de chaque point de mesure des GES ont été relevées avec un DGPS permettant de relier chaque mesure de flux de CO₂ et de CH₄ à sa localisation exacte. Les positions de tous les anneaux sont indiquées dans un tableau en Annexe C.

2.3 Mesures du sol et analyses laboratoire

2.3.1 Échantillonnage du sol à l'aide des tarières

Les prélèvements de sol ont été réalisés à l'aide de deux types de tarières (Figure 7), en fonction des objectifs analytiques et de la profondeur d'échantillonnage.

Une tarière à gouge de sol à volume connu (21,75 cm³ pour 5 cm) a été utilisée pour l'échantillonnage des horizons superficiels. À chaque point de prélèvement de la tarière à gouge, quatre échantillons ont été collectés à différentes profondeurs (0–5 cm, 5–10 cm, 10–15 cm et 15–20 cm) pour un total de 192 échantillons. Le volume connu de la tarière a permis le calcul de la densité apparente du sol (Equation 1). Les échantillons ont ensuite été séchés à 38 °C, émottés à 2 mm. Les fractions de sol, racinaire et rocheuse (> 2 mm) ont ensuite été séparées manuellement et pesées individuellement avant d'être utilisées pour les analyses.

L'Equation 1 montre le calcul de la densité apparente du sol à partir des échantillons prélevés à l'aide de la tarière à gouge de volume connu, selon le protocole décrit en section 2.3.1. Le calcul a été réalisé sur la fraction du sol émotté, après exclusion des fractions racinaire et rocheuse.

$$\rho_s = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Où ρ_s est la densité apparente du sol en $[g\ cm^{-3}]$, m est la masse du sol en $[g]$ et V le volume de la tarière à gouge en $[cm^3]$.

Une tarière Edelman a été employée pour l'observation visuelle des horizons pédologiques, avec des prélèvements pouvant atteindre un mètre de profondeur. Cette méthode a permis d'identifier les horizons et de mieux comprendre le déplacement de la matière organique, les différentes réactions pouvant se produire en profondeur, ainsi que le déplacement de la nappe phréatique. Ces observations ont uniquement servi à contextualiser les résultats analytiques et à guider l'interprétation des caractéristiques morphologiques du terrain et sont décrites dans la section pédologie (2.3.4).



Figure 7 : Tarière Edelman (gauche) et tarière à gouge (droite)

2.3.2 Combustion sèche pour C_{org} et N_{total}

Des analyses du SOC ont été réalisées par le laboratoire d'analyses des sols agricoles de La Hulpe en utilisant la méthode de combustion sèche. Avant la combustion, les échantillons ont été testés afin de vérifier l'absence de carbonates et donc de carbone inorganique. La méthode de combustion sèche consiste à chauffer les échantillons de sol à très haute température, ce qui entraîne l'oxydation complète du carbone présent en CO_2 . Le CO_2 ainsi produit est ensuite mesuré à l'aide d'un détecteur infrarouge. Les résultats sont exprimés en grammes de carbone par kilogramme de sol (gC/kg).

La teneur en azote des échantillons (en %) a également été déterminée par cette méthode afin de calculer les rapports carbone/azote (C/N).

2.3.3 Stock de carbone

Le stock de carbone organique du sol (SOC_{stock}) a été estimé à partir de l'Equation 2 provenant de Meersmans et al. (2012)

$$SOC_{stock} = \frac{SOC}{100} * D * (1 - RF/100) * \rho_s \quad (2)$$

Où SOC_{stock} est le stock de carbone organique du sol en $[kg\ m^{-2}]$, SOC est la teneur en carbone du sol en $[\%]$, D est l'épaisseur de l'horizon en $[m]$, RF est le contenu volumétrique de la fraction rocheuse en $[\%]$ avec une densité rocheuse de $2,65\ g/cm^3$ (Skopp, 2000) et ρ_s est la densité apparente du sol en $[kg\ m^{-3}]$.

Le stock de carbone racinaire a été déterminé à partir de l'Equation 3 basée sur la biomasse racinaire, afin d'évaluer la contribution des racines au stockage du carbone du sol.

$$C_{root}\ [kg\ m^{-2}] = C_{root} * D * \rho_{root} \quad (3)$$

Où C_{root} est la teneur en carbone des racines fixée à 0,4245 (Ma et al., 2018), D représente l'épaisseur de l'horizon considéré en $[m]$ et ρ_{root} est la densité apparente de la biomasse racinaire en $[kg\ m^{-3}]$.

2.3.4 Pédologie

L'analyse pédologique repose sur l'observation visuelle de profils de sol réalisés à la tarière Edelman dans les quatre zones topographiques (Coll, Ext, Int et M) et pour chaque site (3 replicas par zone), visible en Figure 8 et en Annexe D.

Dans la zone **Coll** (colluvions), le sol en surface présente un horizon A organominéral. Il est suivi d'un horizon B voire Bt s'étendant jusqu'à environ 60 cm de profondeur, caractérisé par une accumulation d'argile. À partir d'environ 50 cm, cet horizon présente des taches d'oxydation, témoignant de fluctuations temporaires de la nappe phréatique. Au-delà de 60 cm, le sol évolue vers un horizon C, marqué par une augmentation de la charge caillouteuse, avec la présence de graviers d'origine pléistocène riches en quartzite, particulièrement abondants entre 80 et 100 cm de profondeur.

Dans la zone **Ext** (zone externe), le sol en surface présente un horizon A organominéral. Il est suivi par un horizon Bg apparaissant vers 40 cm de profondeur, caractérisé par une gleyification marquée, traduisant des conditions réductrices liées à la présence d'une nappe phréatique quasi permanente à cette profondeur. Au-delà, le sol évolue vers un horizon C, constitué de graviers d'origine pléistocène riches en quartzite, observés entre 80 et 100 cm de profondeur.

Dans la zone **M** (méandre), le sol en surface présente un horizon O, correspondant à une couche tourbeuse d'épaisseur variable (environ 20 à 40 cm). Cet horizon repose sur un horizon A très riche en matière organique, traduisant des conditions humides favorables à l'accumulation de matière organique. Au-delà, le sol évolue rapidement vers un horizon C, constitué de graviers d'origine pléistocène riches en quartzite, apparaissant dès environ 60 cm de profondeur, soit à une profondeur plus faible que dans la zone Ext.

Dans la zone **Int** (zone interne), le sol en surface présente un horizon A organominéral riche en matière organique. Cet horizon évolue progressivement en profondeur vers un horizon B faiblement différencié, marqué par une diminution graduelle de la teneur en matière organique. À partir d'environ 60 cm de profondeur, le sol évolue vers un horizon C, caractérisé par la présence de graviers d'origine pléistocène riches en quartzite.

Les zones Ext, M et Int se distinguent par une proportion plus importante de matière organique et d'humidité par rapport à la zone Coll. Ces zones présentent également la présence de macrofossiles constitués de racines, de morceaux de bois et d'autres débris végétaux (Annexe E).

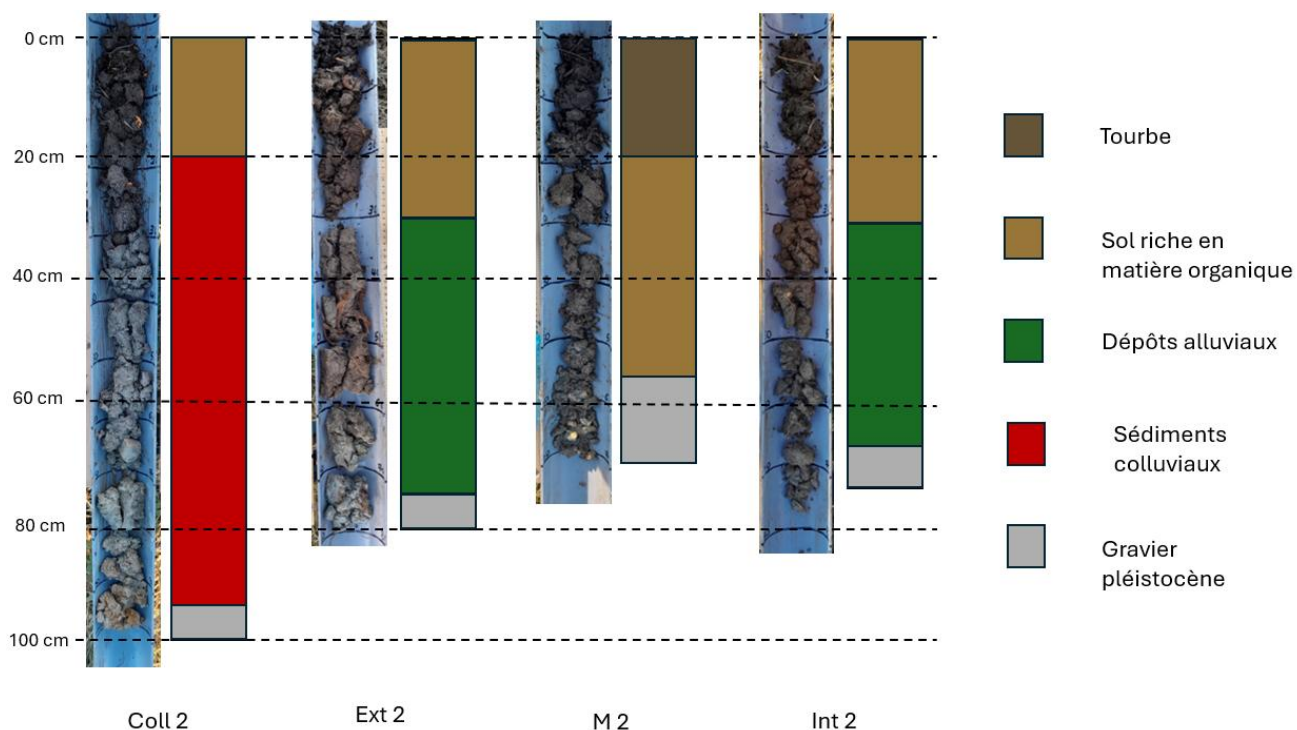


Figure 8 : Profils de sol à la tarière Edelman

2.4 Mesure de gaz

2.4.1 Mesure des émissions de GES du sol

Les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère ont été mesurés directement sur le terrain à l'aide d'un analyseur portable LI-COR 7810 (LI-COR Environmental, 2025), associé à une chambre de mesure (Smart Chamber) compatible avec des anneaux en PVC préalablement installés dans le sol (Figure 9).



Figure 9 : Matériel de mesure : Téléphone servant au contrôle de la chambre (1), Analyseur portable (2), Chambre (Smart Chamber) (3), Sonde 5TM (4), Lecteur portable ProCheck (5) et Anneau en PVC (6) source : photo personnelle

Les mesures ont été réalisées sur la période allant du 6 octobre au 17 novembre 2025, avec une fréquence de deux prises de mesure par semaine. Pour chacun des 48 anneaux présents, 12 relevés ont été pris. Les anneaux ont été installés avant le début des mesures afin de réduire les perturbations physiques du sol. Avant chaque mesure, les résidus végétaux présents à l'intérieur des anneaux ont été retirés afin de limiter l'influence de la respiration de la végétation aérienne sur les flux mesurés. En parallèle, la température et l'humidité du sol ont été mesurées à proximité des anneaux afin de documenter les conditions environnementales lors des campagnes de mesure vu que ces deux facteurs influencent les échanges de CO_2 et CH_4 avec l'atmosphère (Bezyk et al., 2023 ; Mathiba et al., 2015)

Lors de chaque mesure, la chambre était placée de manière étanche sur l'anneau afin de créer un système fermé permettant l'enregistrement de l'évolution des concentrations de CO₂ et de CH₄. La hauteur émergente du sol des anneaux a été mesurée systématiquement pour chaque anneau à chaque mesure et intégrée dans le calcul des flux. L'ordre de mesure des anneaux a été alterné entre les mesures, afin de limiter les biais liés au moment de la journée. Les mesures ont ainsi été réalisées selon différents parcours pour un total de douze campagnes de mesure.

Chaque point a fait l'objet d'un enregistrement d'une durée totale de 120 s. Les 25 premières secondes, correspondant à la phase de mise en équilibre du système après la fermeture de la chambre, ont été exclues du calcul afin de permettre la stabilisation du flux. Les flux ont ensuite été estimés à partir de l'évolution temporelle des concentrations mesurées.

2.4.2 Température et humidité du sol

La température et l'état hydrique du sol ont été suivis comme variables environnementales associées aux mesures de flux de CO₂ et de CH₄. Les relevés ont été réalisés dans les 10 premiers centimètres du sol à proximité de l'anneau, à l'aide d'une sonde 5TM connectée à un lecteur portable ProCheck (ENVCO Global) (Figure 10).



Figure 10 : Lecteur portable ProCheck et sonde 5TM placée dans le sol (source : photo personnelle)

La teneur en eau volumique a été estimée à partir d'une calibration spécifique pour la zone Coll, établie à partir d'échantillons de sol soumis à différents niveaux d'humidité. Cette relation a permis de convertir les valeurs mesurées en teneur en eau volumique exprimée en pourcentage (Annexe F).

Pour les zones Ext, M et Int, l'utilisation d'une calibration locale n'a pas été retenue en raison des caractéristiques particulières des sols, notamment leur forte teneur en carbone organique et leur faible densité apparente. Ces propriétés peuvent altérer la relation entre permittivité diélectrique et teneur en eau, rendant la calibration expérimentale moins fiable. Une équation de calibration (Equation 4) adaptée aux sols organiques a donc été appliquée afin d'assurer une estimation plus robuste de l'humidité du sol (Bircher et al., 2016).

$$\theta = 6,9593 * 10^{-6} * \epsilon_a^3 - 9,8511 * 10^{-4} * \epsilon_a^2 + 4,5834 * 10^{-2} * \epsilon_a - 5,0595 * 10^{-2} \quad (4)$$

où θ est la teneur volumétrique en eau en $[m^3/m^3]$ et ϵ_a la permittivité diélectrique apparente.

2.4.3 Emissions de GES du sol

Les concentrations de CO_2 et de CH_4 mesurées lors des mesures de terrain ont été utilisées pour calculer les flux de gaz émis par le sol. Les données issues de l'analyseur LI-COR ont été traitées à l'aide du logiciel SoilFluxPro, qui estime les flux surfaciques à partir de l'évolution temporelle des concentrations de CO_2 enregistrées dans une chambre fermée.

Flux de respiration du sol R_s

Le R_s a été déterminé à partir de la pente de l'augmentation de la concentration en CO_2 au cours du temps, exprimée en $[ppm.s^{-1}]$. Cette pente correspond au taux d'accumulation du gaz dans la chambre après stabilisation du système. Seules les données acquises après la phase initiale de stabilisation ont été prises en compte dans le calcul, conformément au protocole décrit en section 2.4.1. Les résultats ont été obtenus à l'aide du système LI-COR en appliquant l'Equation 5 (LI-COR Environmental, 2025).

$$R_s [\mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}] = \frac{dCO_2}{dt} * \frac{V}{A} * \frac{P}{RT} * f \quad (5)$$

Où R_s est le flux de respiration surfacique du sol de CO_2 en $[\mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}]$, $\frac{dCO_2}{dt}$ est la pente de l'augmentation de la concentration en CO_2 dans la chambre tenant compte de l'humidité en $[\mu mol mol^{-1} s^{-1}]$, V est le volume total de la chambre en $[m^3]$ comprenant également le volume compris dans l'anneau en PVC émergent du sol, A est la surface du sol couverte par la chambre en $[m^2]$ qui correspond à la surface d'un anneau PVC qui est de $314,15 \text{ cm}^2$, P est la pression atmosphérique initiale dans la chambre en $[Pa]$, R est la constante universelle des gaz parfaits

(8,314 Pa.m³.K⁻¹.mol⁻¹), T est la température absolue en [K] et f est un facteur correctif basé sur la fraction molaire initiale de vapeur d'eau pour compenser la dilution du CO₂ par l'humidité dans la chambre.

Cette méthode est également utilisée pour la détermination du flux de CH₄ à l'Equation 6.

$$F_{CH_4} [\text{nmolCH}_4\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}] = \frac{dCH_4}{dt} * \frac{V}{A} * \frac{P}{RT} * f \quad (6)$$

Où F_{CH_4} est le flux surfacique de CH₄ du sol en [nmol CH₄ m⁻² s⁻¹], $\frac{dCH_4}{dt}$ est la pente de l'augmentation de la concentration en CH₄ dans la chambre tenant compte de l'humidité en [nmol mol⁻¹ s⁻¹].

Flux de CH₄ et équivalent CO₂

Les flux de CH₄ ainsi obtenus ont ensuite été intégrés sur l'ensemble de la période d'étude afin de calculer les flux cumulés. Pour permettre une comparaison directe avec les flux de CO₂, les flux cumulés de CH₄ ont été convertis en équivalent CO₂ en appliquant un facteur de conversion basé sur le potentiel de réchauffement global du méthane sur un horizon de 100 ans. Conformément aux recommandations du GIEC (IPCC, 2023), un facteur de 27 a été utilisé selon l'Equation 7:

$$F_{CH_4\text{-eqCO}_2} [\text{mg eqCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}] = F_{CH_4} [\text{nmolCH}_4\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}] * 27 * 16 * 10^{-6} \quad (7)$$

où $F_{CH_4\text{-eqCO}_2}$ représente le flux de CH₄ exprimé en équivalent CO₂, [mg eqCO₂ m⁻²s⁻¹], F_{CH_4} le flux de CH₄ en [nmolCH₄m⁻²s⁻¹], 27 le facteur de potentiel de réchauffement global, 16 la masse molaire du méthane en [g mol⁻¹] et 10⁻⁶ le facteur permettant de passer de ng en mg.

Quantité de carbone

Pour traduire les flux de CO₂ en quantité de carbone (C-CO₂), les valeurs de R_S ont été converties en [mgC-CO₂ m⁻² h⁻¹] à l'aide de l'Equation 8 :

$$R_S [\text{mgC-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}] = R_S [\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}] * 12 * 3600 * 10^{-3} \quad (8)$$

où 12 représente la masse molaire du carbone en [g mol⁻¹], le facteur 10⁻³ permet de convertir les grammes en milligrammes, et 3600 convertit les secondes en heures.

Flux normalisé R_s

Afin de comparer les flux de CO_2 entre des sols présentant des stocks de carbone différents, les flux surfaciques ont également été normalisés par le stock total de carbone du sol. Cette normalisation a été réalisée en rapportant le flux de C- CO_2 au $\text{SOC}_{\text{stock}}$ cumulé au carbone racinaire, calculés pour les horizons considérés. Le flux ainsi obtenu, exprimé en $[\text{mgC-CO}_2 \text{ gC}^{-1} \text{ h}^{-1}]$, constitue un indicateur relatif de l'intensité de la respiration du sol par unité de carbone stocké. Le flux normalisé R_s est déterminé avec l'Equation 9 :

$$R_s [\text{mgC-CO}_2 \text{ gC}^{-1} \text{ h}^{-1}] = R_s [\text{mgC-CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}] * 1 * (\text{gC}_{\text{SOCstock}} + \text{gC}_{\text{root}})^{-1} * 10^{-3} \quad (9)$$

Où $\text{SOC}_{\text{stock}}$ est le stock de carbone organique du sol moyen du site du point de mesure du flux de GES en $[\text{kg m}^{-2}]$, C_{root} est le stock de carbone racinaire moyen du site en $[\text{kg m}^{-2}]$ et 10^{-3} est un facteur permettant de passer de kg à g.

2.5 Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R. Elles visent à évaluer les différences entre les zones topographiques pour les propriétés physico-chimiques du sol ainsi que pour les flux de CO_2 et de CH_4 mesurés *in situ*.

Intervalle de confiance

Une première analyse des données a été effectuée afin d'examiner la variabilité des paramètres mesurés, de vérifier la cohérence des valeurs obtenues et d'identifier d'éventuelles valeurs aberrantes. Les comparaisons entre zones topographiques ont ensuite été réalisées à l'aide de statistiques descriptives, incluant le calcul des moyennes et des écarts-types, ainsi que par l'estimation d'intervalles de confiance à 95 % autour des moyennes.

Les intervalles de confiance ont été calculés à partir de l'erreur standard de la moyenne, en considérant une approximation par la loi normale. Pour chaque paramètre et chaque zone topographique, l'intervalle de confiance à 95 % de la moyenne ($\bar{x}$) a été estimé selon l'Equation 10 suivante :

$$IC_{95\%} = \bar{x} \pm 1,96 \times \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

où $\bar{x}$ représente la moyenne de l'échantillon, s l'écart-type et n la taille de l'échantillon. Le facteur 1,96 correspond à la valeur critique de la distribution normale centrée réduite, englobant 95 % des valeurs autour de la moyenne.

Cette méthode permet d'estimer l'intervalle dans lequel la moyenne réelle de la population est susceptible de se situer avec un niveau de confiance de 95 %. Les différences entre zones topographiques ont été considérées comme significatives lorsque les intervalles de confiance associés aux moyennes ne se chevauchaient pas. L'intervalle de confiance à 95 % indique que l'on peut avoir 95 % de certitude que la vraie moyenne de la population se situe à l'intérieur de cet intervalle, et permet ainsi d'évaluer si les différences observées entre zones topographiques sont statistiquement significatives ou non.

Analyse Q_{10} et résidus

La respiration du sol (R_s) est fortement influencée par la température et l'humidité, qui régulent l'activité microbienne et racinaire (Ngao et al., 2006; Tan et al., 2013). Pour quantifier la sensibilité thermique, le modèle Q_{10} a été appliqué (Equation 11). Ce modèle permet de comparer les flux de respiration entre zones topographiques ou conditions expérimentales (Ngao et al., 2006).

$$R_s = R_{10} * Q_{10}^{(T_s - 10)/10} \quad (11)$$

où T_s est la température du sol, R_{10} le flux de respiration à 10 °C et Q_{10} le coefficient représentant la multiplication du flux pour une augmentation de 10 °C. Dans ce cadre, R_s correspond au flux de respiration prédit par le modèle pour une température donnée, lequel est comparé aux flux de respiration mesurés expérimentalement afin d'évaluer la capacité du modèle à reproduire les observations.

Ce modèle, classique pour la respiration du sol, a été appliqué de manière exploratoire aux flux de CH_4 de la zone M afin d'estimer une sensibilité thermique apparente du flux net, qui résulte de processus antagonistes de production et d'oxydation microbienne (Tan et al., 2013).

Les paramètres R_{10} et Q_{10} ont été estimés par la méthode des moindres carrés non linéaires pour chaque zone. Les résidus, calculés comme la différence entre flux mesurés et flux prédits, ont ensuite été analysés en fonction de l'humidité du sol pour évaluer son influence sur la respiration (Tan et al., 2013). Aucune limite numérique stricte n'a été fixée pour juger des résidus. Leur acceptabilité a été évaluée en vérifiant

qu'ils restent centrés autour de zéro, sans tendance systématique, et de faible amplitude par rapport à la variabilité naturelle des flux de respiration.

2.6 Organigramme méthodologique

La Figure 11 présente l'organigramme méthodologique de l'étude, synthétisant les différentes étapes du dispositif expérimental, depuis le plan d'échantillonnage et les mesures de flux de gaz jusqu'aux analyses des propriétés physico-chimiques des sols et des stocks de carbone.

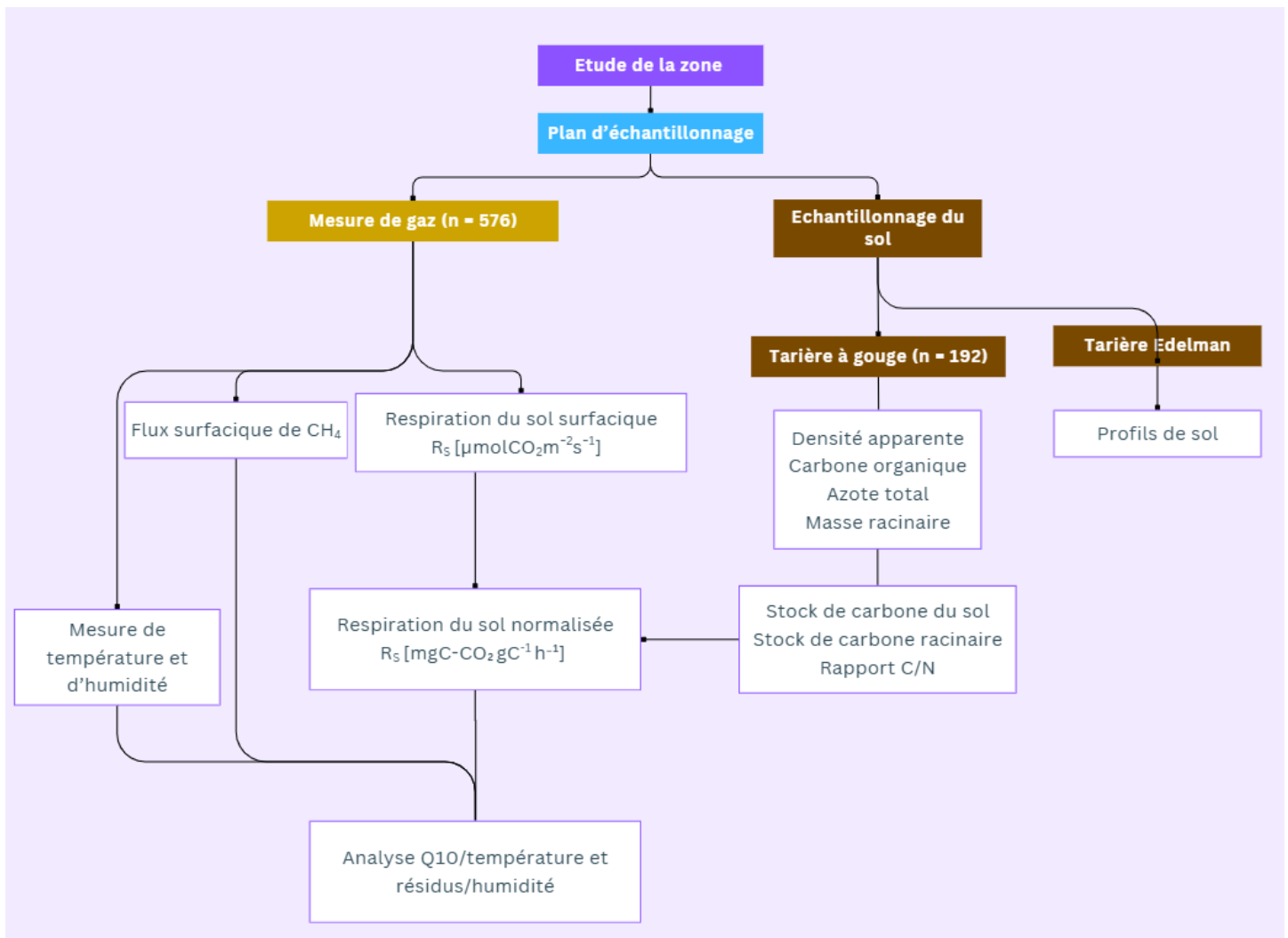


Figure 11 : Organigramme méthodologique de l'étude

3. Résultats et discussion

Les propriétés physiques et chimiques du sol jouent un rôle central dans le fonctionnement biogéochimique des sols alluviaux. En contrôlant la disponibilité en eau, l'aération et la répartition de la matière organique et des nutriments, elles influencent directement l'activité microbienne, la dynamique racinaire et les flux de GES (Bezyk et al., 2023 ; Moyano et al., 2013). Dans les plaines alluviales, ces propriétés sont fortement structurées par la topographie et la dynamique hydrologique, générant une hétérogénéité spatiale marquée (Acreman & Holden, 2013 ; Saint-Laurent et al., 2016 ; Wohl et al., 2015). Les analyses conjointes de l'humidité, de la densité apparente, du carbone et de l'azote du sol permettent ainsi d'interpréter les contrastes observés entre zones topographiques et leurs implications pour le cycle du carbone (Meersmans et al., 2012 ; Wiesmeier et al., 2019 ; Paustian et al., 2016).

3.1 Propriétés physique et chimique du sol

3.1.1 Humidité

Résultats

L'humidité volumique du sol présentait des variations marquées selon la position topographique au sein de la plaine alluviale. Les distributions des valeurs mesurées pour chaque zone sont illustrées par la Figure 12, tandis que les statistiques descriptives correspondantes sont synthétisées dans le Tableau 2. Les différences observées entre zones topographiques ont mis en évidence un gradient hydrique clair, depuis les zones les plus élevées jusqu'aux zones les plus basses de la plaine alluviale. L'humidité du sol correspondait ici à l'humidité volumique mesurée dans les 10 premiers centimètres du sol, à l'aide d'une sonde 5TM.

Tableau 2 : Humidité volumique du sol (0-10 cm) selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques (intervalle de confiance à 95 %)

	Coll	Ext	Int	M
Humidité [%]	33,3 $\pm$ 5,2 c	61,4 $\pm$ 6,6 b	61,9 $\pm$ 5,5 b	65,9 $\pm$ 2,8 a

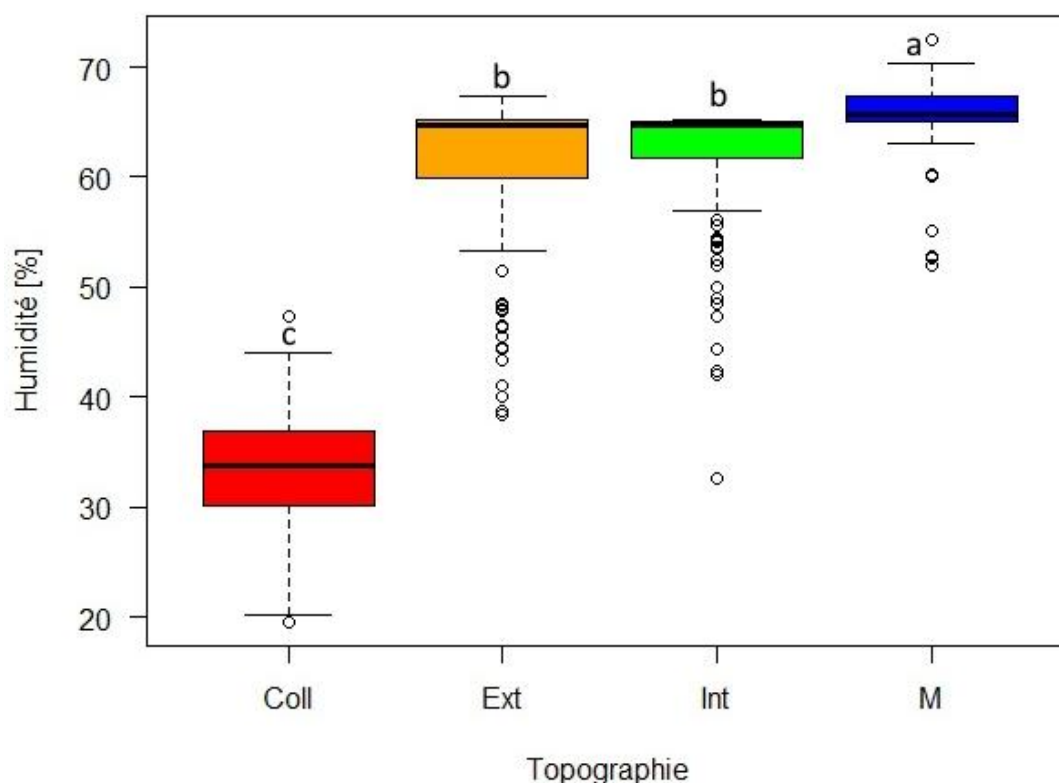


Figure 12 : Boxplot de l'humidité volumique du sol (0-10 cm) selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

Discussion

La variabilité spatiale marquée de l'humidité du sol observée dans cette étude met clairement en évidence le rôle structurant de la topographie dans le fonctionnement des sols alluviaux. Les zones basses, en particulier la zone M, présentent des teneurs en eau nettement plus élevées dans les 10 premiers centimètres du sol, traduisant une influence directe de la proximité de la nappe phréatique. Ces conditions hydriques favorisent l'installation de milieux faiblement oxygénés, susceptibles de limiter la respiration aérobie du sol tout en stimulant les processus anaérobies, notamment la méthanogenèse. À l'inverse, les zones plus élevées et mieux drainées, comme la zone Coll, se caractérisent par des humidités significativement plus faibles, compatibles avec une activité microbienne aérobie plus efficace et des flux de CO₂ dominants. Cette structuration hydrique concorde avec les modèles conceptuels décrits dans la littérature, selon lesquels la respiration du sol est maximale à des niveaux intermédiaires d'humidité, tandis que les sols saturés basculent vers des fonctionnements dominés par des processus anaérobies (Davidson et al., 2006 ; Moyano et al., 2013). Les résultats obtenus confirment ainsi que l'humidité du sol constitue un levier central pour expliquer la variabilité spatiale des flux de CO₂ et de CH₄ dans les plaines alluviales (Vidon et al., 2010 ; Bezyk et al., 2023).

3.1.2 Densité apparente et Carbone du sol

Résultats

La densité apparente et la teneur en carbone organique du sol présentaient des différences significatives selon la position dans la plaine alluviale. La densité apparente a été calculée à partir de la masse sèche des échantillons de sol, tandis que la teneur en carbone a été évaluée par combustion sèche (voir section 2.3.2). Cette analyse a confirmé l'absence de carbonates et donc de carbone inorganique dans tous les échantillons. Toutes les valeurs de carbone rapportées dans les résultats suivants correspondaient donc au SOC.

La relation entre la densité apparente et le carbone organique du sol est illustrée à la Figure 13, tandis que leurs distributions par zone topographique sont présentées respectivement aux Figures 14 et 15. Les lettres associées aux moyennes et aux distributions signalent des différences significatives entre zones, établies à partir d'intervalles de confiance à 95 %, et les valeurs moyennes par zone sont synthétisées dans le Tableau 3.

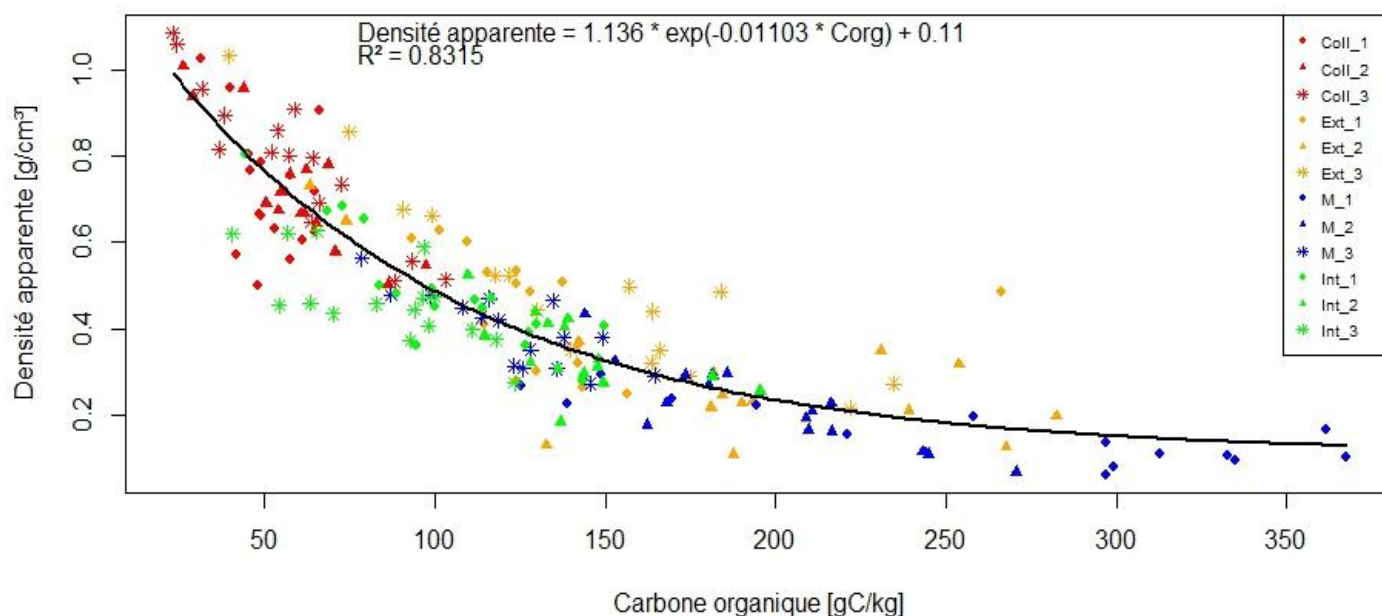


Figure 13 : Densité apparente en fonction du carbone organique

Tableau 3 : Densité apparente et carbone organique du sol selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques (intervalle de confiance à 95 %)

	Coll	Ext	Int	M
Densité apparente [g/cm ³]	0,74 $\pm$ 0,16 a	0,41 $\pm$ 0,20 b	0,44 $\pm$ 0,13 b	0,26 $\pm$ 0,13 c
Carbone organique [gC/kg]	56,0 $\pm$ 18,1 d	155,0 $\pm$ 56,1 b	109,2 $\pm$ 34,1 c	192,4 $\pm$ 75,7 a

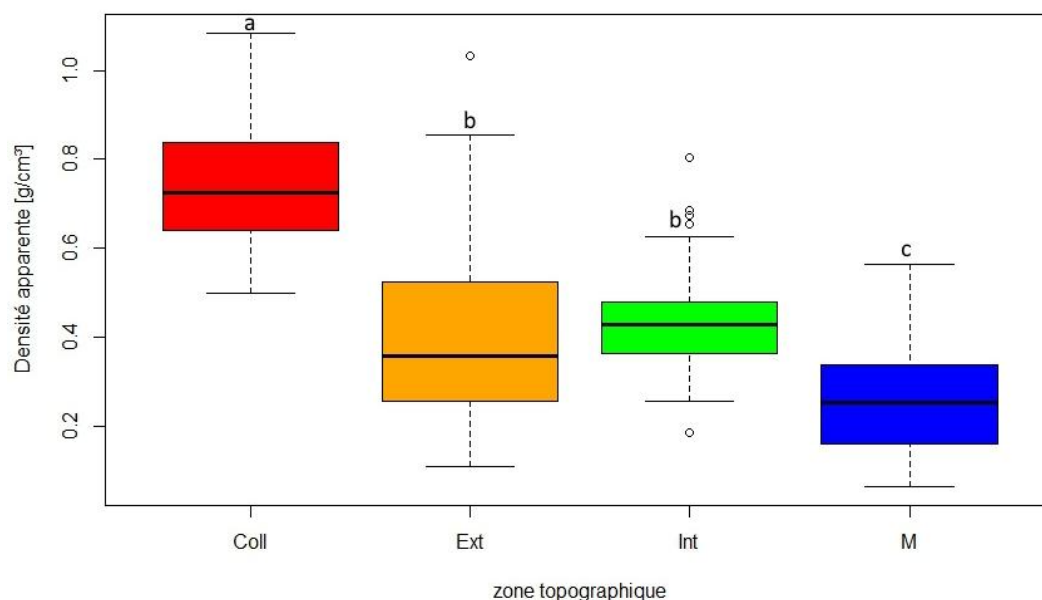


Figure 14 : Boxplot de la densité apparente du sol (0-20 cm) selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

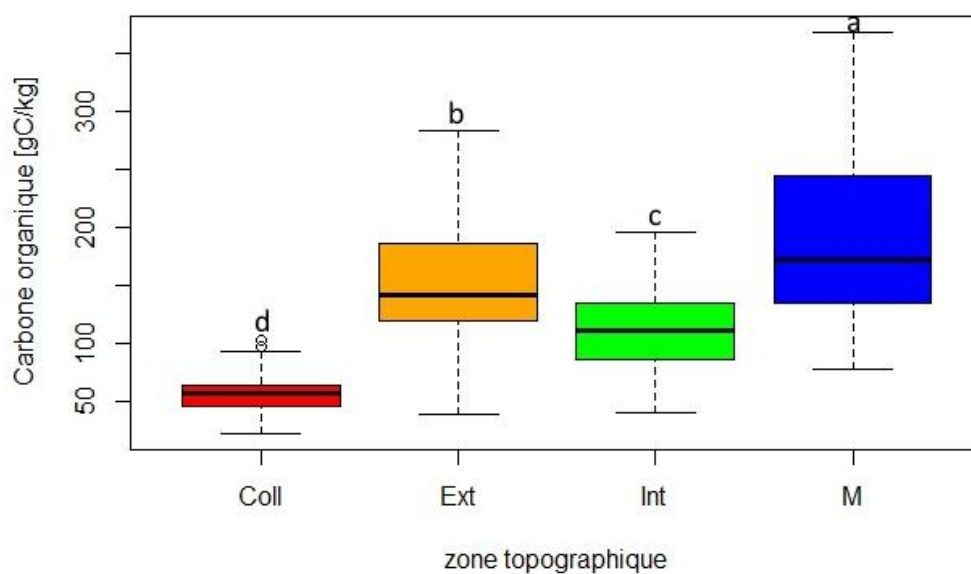


Figure 15 : Boxplot du carbone organique (0-20 cm) du sol selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

La densité apparente du sol variait significativement selon les zones topographiques, avec les valeurs les plus élevées dans les secteurs collinaires et les plus faibles dans les zones centrales de la plaine. À l'inverse, la teneur en carbone organique suivait un gradient opposé, augmentant de manière significative depuis les zones élevées (Coll) vers les zones moyennes et basses (Int) de la plaine.

Discussion

La distribution de la densité apparente et du carbone organique du sol met en évidence un gradient topographique marqué au sein de la plaine alluviale, étroitement lié aux conditions hydriques locales. La densité apparente diminue fortement des zones colluviales vers les zones basses, passant de valeurs élevées en zone Coll ($\approx 0,74 \text{ g cm}^{-3}$) à des valeurs nettement plus faibles en zone M ($\approx 0,26 \text{ g cm}^{-3}$). À l'inverse, la teneur en carbone organique augmente selon le même gradient, avec un maximum observé en zone M ($\approx 192 \text{ gC kg}^{-1}$), tandis que la zone Coll présente les teneurs les plus faibles ($\approx 56 \text{ gC kg}^{-1}$).

Cette relation inverse entre densité apparente et carbone organique est largement décrite dans la littérature et s'explique par l'effet structurant de la matière organique sur la porosité, l'aggrégation et la stabilité du sol (Hossain et al. 2015 ; Wiesmeier et al., 2019). Dans les zones basses, les conditions hydriques élevées et la saturation fréquente limitent l'oxygénation des horizons superficiels et ralentissent la minéralisation microbienne, favorisant ainsi l'accumulation de carbone organique et le développement de sols très peu denses (Schmidt et al., 2011). À l'inverse, les zones mieux drainées, comme la zone Coll, présentent une structure plus compacte et une activité microbienne aérobie plus efficace, conduisant à une décomposition plus rapide de la matière organique et à des stocks de carbone plus faibles.

Ces contrastes soulignent le rôle central de la topographie et du régime hydrique dans le contrôle conjoint des propriétés physiques du sol et des concentrations de carbone à l'échelle fine de la plaine alluviale (Saint-Laurent et al., 2016; Scott & Wohl, 2018). La zone associée à l'ancien méandre apparaît ainsi comme un compartiment clé pour le stockage du carbone organique, mais également comme un milieu particulièrement sensible aux modifications hydrologiques susceptibles de déplacer l'équilibre entre accumulation et minéralisation.

3.1.3 Stock de carbone du sol et carbone racinaire

Résultats

Les variations de densité apparente et de teneur en carbone organique du sol observées entre les zones topographiques (section 3.1.2) se traduisaient par des différences marquées dans les stocks de carbone du sol. Ceux-ci et les stocks de carbone racinaire estimés pour chaque zone topographique sont présentés dans le Tableau 4, tandis que leurs distributions sont illustrées aux Figures 16 et 17.

Tableau 4 : Stock de carbone organique du sol et carbone racinaire selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

	Coll	Ext	Int	M
SOC_{stock} [kgC/m²]				
0-5 cm	2,14 $\pm$ 0,47 a	2,32 $\pm$ 0,85 a	2,36 $\pm$ 0,50 a	1,84 $\pm$ 0,46 b
5-10 cm	2,09 $\pm$ 0,45 b	2,62 $\pm$ 0,76 a	2,27 $\pm$ 0,33 a,b	2,06 $\pm$ 0,38 b
10-15 cm	1,99 $\pm$ 0,26 b	3,08 $\pm$ 0,69 a	2,11 $\pm$ 0,36 b	2,19 $\pm$ 0,64 b
15-20 cm	1,71 $\pm$ 0,49 c	2,99 $\pm$ 1,10 a	2,13 $\pm$ 0,60 b	2,26 $\pm$ 0,58 b
0-20 cm	7,93 $\pm$ 1,13 c	11,02 $\pm$ 2,47 a	8,87 $\pm$ 1,25 b	8,36 $\pm$ 1,53 b,c
C_{root} [kgC/m²] 0-20 cm	0,18 $\pm$ 0,27 a	0,22 $\pm$ 0,17 a	0,21 $\pm$ 0,41 a	0,20 $\pm$ 0,17 a
C_{root} + SOC_{stock} [kgC/m²] 0-20	8,11 $\pm$ 1,16 c	11,24 $\pm$ 2,48 a	9,08 $\pm$ 1,32 b	8,56 $\pm$ 1,54 b,c

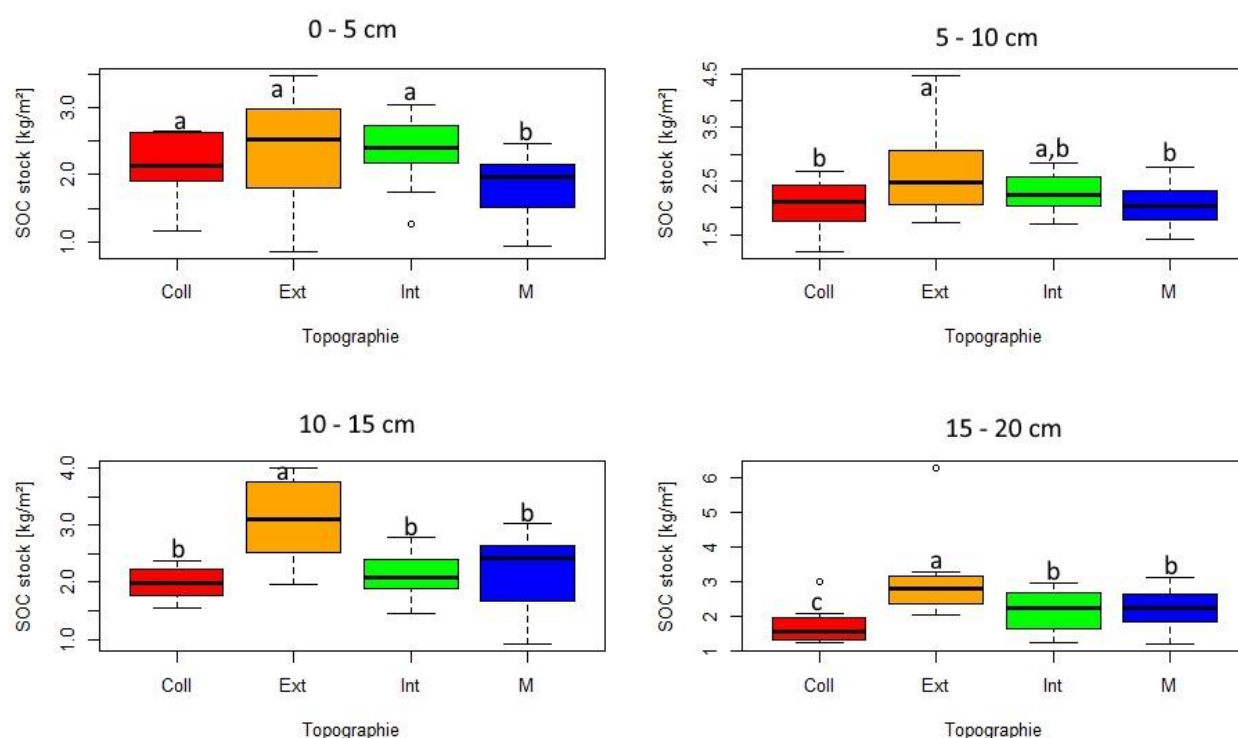


Figure 16 : Boxplots du stock de carbone organique du sol selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

Le stock de carbone organique du sol présentait une variabilité selon la profondeur et la position topographique. Cette distribution reflétait l'intégration conjointe de la teneur en carbone organique et de la densité apparente du sol sur la profondeur considérée. À l'échelle de l'ensemble du profil étudié (0–20 cm), la zone Ext se distinguait par un stock de carbone organique significativement plus élevé que celui des autres zones topographiques.

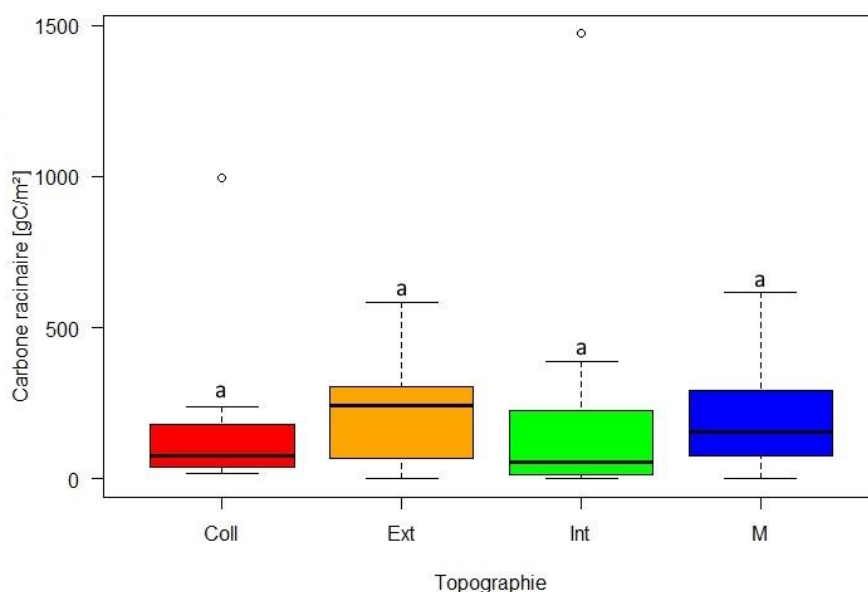


Figure 17 : Boxplot du stock de carbone racinaire du sol (0-20 cm) selon les zones topographiques. La même lettre n'indique aucune différence significative entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

Le stock de carbone racinaire estimé sur l'ensemble des 20 premiers centimètres du sol ne présentait pas de différences significatives entre les zones topographiques. Les valeurs observées étaient comparables entre les zones Coll, Ext, Int et M, indiquant une distribution relativement homogène du carbone racinaire à l'échelle du profil étudié.

Les lettres associées aux moyennes indiquent l'absence de différences significatives entre zones topographiques, sur la base d'intervalles de confiance à 95 %.

Le stock de carbone racinaire ne représentait qu'environ 2% du stock total de carbone comprenant le stock racinaire et du sol.

Discussion

Le stock de carbone du sol, calculé sur les 20 premiers centimètres du sol, présente une variabilité marquée selon la position topographique. Compte tenu des fortes teneurs en carbone organique mesurées dans les zones basses, et notamment dans la zone M,

on pouvait s'attendre à ce que cette zone présente les stocks de carbone les plus élevés. Toutefois, les résultats montrent que c'est la zone Ext qui présente le $\text{SOC}_{\text{stock}}$ total le plus important sur 0–20 cm, tandis que la zone M affiche des valeurs inférieures à celles de la zone Int.

Cette observation s'explique par le rôle déterminant de la densité apparente dans le calcul des stocks de carbone. En zone M, la très faible densité apparente limite la quantité de carbone stockée par unité de surface, malgré des teneurs en carbone organique élevées. À l'inverse, la zone Ext combine des teneurs en carbone importantes avec des densités apparentes intermédiaires, conduisant à des stocks de carbone plus élevés sur l'épaisseur de sol considérée.

Le calcul du $\text{SOC}_{\text{stock}}$ intègre directement cette combinaison entre teneur en carbone et densité apparente, ce qui explique que des sols riches en carbone ne présentent pas nécessairement les stocks les plus élevés par unité de surface (Meersmans et al., 2012 ; Quine et al., 2022). Il serait pertinent d'estimer une teneur en carbone optimale afin de maximiser le $\text{SOC}_{\text{stock}}$, en identifiant les conditions favorables pour un stockage de carbone maximal par unité de surface.

Grâce à l'équation obtenue Figure 13 et l'Equation 2, il a été possible d'obtenir un $\text{SOC}_{\text{stock}}$ maximum de $9,90 \text{ kgC m}^{-2}$ à une teneur en carbone, SOC , de 126 gC kg^{-1} . Il y a un autre maximum qui se trouve à un $\text{SOC}_{\text{stock}} > 9,90 \text{ kgC m}^{-2}$ pour toutes teneurs en carbone $> 400 \text{ gC kg}^{-1}$ (Annexe G).

Toutefois, pour la zone Ext, on observe un $\text{SOC}_{\text{stock}}$ supérieur à $9,90 \text{ kgC m}^{-2}$ ($11,02 \text{ kgC m}^{-2}$) pour une teneur de $\approx 155 \text{ gC kg}^{-1}$. Cette valeur s'explique par le fait que, sur la Figure 13, la zone Ext se situe généralement au-dessus de la courbe de régression, ce qui indique qu'elle présente un rendement de densité apparente (et donc de stockage du carbone) par unité de teneur en carbone supérieur à la tendance générale pour l'ensemble de la zone.

Il convient toutefois de souligner que le $\text{SOC}_{\text{stock}}$ a été calculé sur une profondeur limitée à 20 cm. Or, les observations des profils de sols (voir section 2.3.4) montrent que la zone M conserve des teneurs en carbone organique élevées dans les horizons plus profonds, alors que les autres zones présentent une diminution plus marquée du carbone avec la profondeur. Ainsi, un calcul intégrant une profondeur plus importante aurait pu conduire à une hiérarchisation différente des stocks de carbone, avec un rôle potentiellement plus important de la zone M, comme cela a été observé dans d'autres

plaines alluviales caractérisées par des sols organiques profonds (Quine et al., 2022 ; Vidon et al., 2010).

Les valeurs de SOC_{stock} obtenues ($\approx 4,23 - 4,94 \text{ kg C m}^{-2}$ sur 0–10 cm, et $\approx 7,93 - 11,02 \text{ kgC m}^{-2}$ sur 0–20 cm) sont cohérentes avec celles rapportées pour des plaines alluviales en climat tempéré. Dans les alluvions de l’Elbe (Allemagne), des stocks de $\approx 3,0$ à $4,6 \text{ kg C m}^{-2}$ ont été mesurés dans les 10 premiers centimètres du sol (Heger et al., 2021). Par ailleurs, des travaux réalisés dans des zones humides alluviales tempérées montrent que les valeurs de SOC_{stock} sur le profil jusqu’à 1 mètre varient de $\approx 4,6$ à $13,2 \text{ kg C m}^{-2}$ (Bai et al., 2020).

Concernant le carbone racinaire, les stocks mesurés sur 0–20 cm ne présentent pas de différences significatives entre zones topographiques, ce qui suggère que la distribution de la biomasse racinaire dépend davantage des facteurs biotiques et de l’interaction entre végétation, microenvironnement et propriétés du sol que des seules propriétés physico-chimiques du sol (Carvalho et al., 2024). Les racines contribuent directement au stock de carbone organique du sol via les rhizodépôts, les exsudats et la décomposition, et les exsudats racinaires libèrent des composés organiques dans le sol qui peuvent être stabilisés dans la matière organique ou stimuler la formation de SOC via des interactions avec les microbes et les minéraux (Chari et al., 2024 ; Yang et al., 2023).

3.1.4 Azote

Résultats

La teneur en azote total du sol variait significativement selon la position topographique au sein de la plaine alluviale, tant à l’échelle de l’ensemble du profil étudié (0–20 cm) que pour chacune des couches considérées (Tableau 5). Les distributions des valeurs pour les 20 premiers centimètres du sol sont illustrées à la Figure 18.

Tableau 5 : Azote total du sol selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d’intervalles de confiance à 95 %

	Coll	Ext	Int	M
Azote totale [%]				
0-5 cm	0.65 $\pm$ 0.16 c	1.33 $\pm$ 0.33 a	0.93 $\pm$ 0.17 b	1.23 $\pm$ 0.38 a
5-10 cm	0.55 $\pm$ 0.07 c	1.13 $\pm$ 0.23 b	1.05 $\pm$ 0.24 b	1.57 $\pm$ 0.51 a
10-15 cm	0.49 $\pm$ 0.07 c	1.06 $\pm$ 0.39 b	0.85 $\pm$ 0.25 b	1.53 $\pm$ 0.58 a
15-20 cm	0.35 $\pm$ 0.11 c	0.77 $\pm$ 0.50 b	0.70 $\pm$ 0.27 b	1.32 $\pm$ 0.50 a
0-20 cm	0.51 $\pm$ 0.16 d	1.07 $\pm$ 0.42 b	0.88 $\pm$ 0.26 c	1.41 $\pm$ 0.50 a

À l'échelle du profil, la zone M présentait les teneurs en azote total les plus élevées, suivie par la zone Ext, tandis que les zones Int et Coll affichaient des teneurs plus faibles, la zone Coll se distinguant par les valeurs les plus basses. Cette hiérarchisation était globalement cohérente entre les différentes profondeurs, avec des différences significatives maintenues pour chaque profondeur.

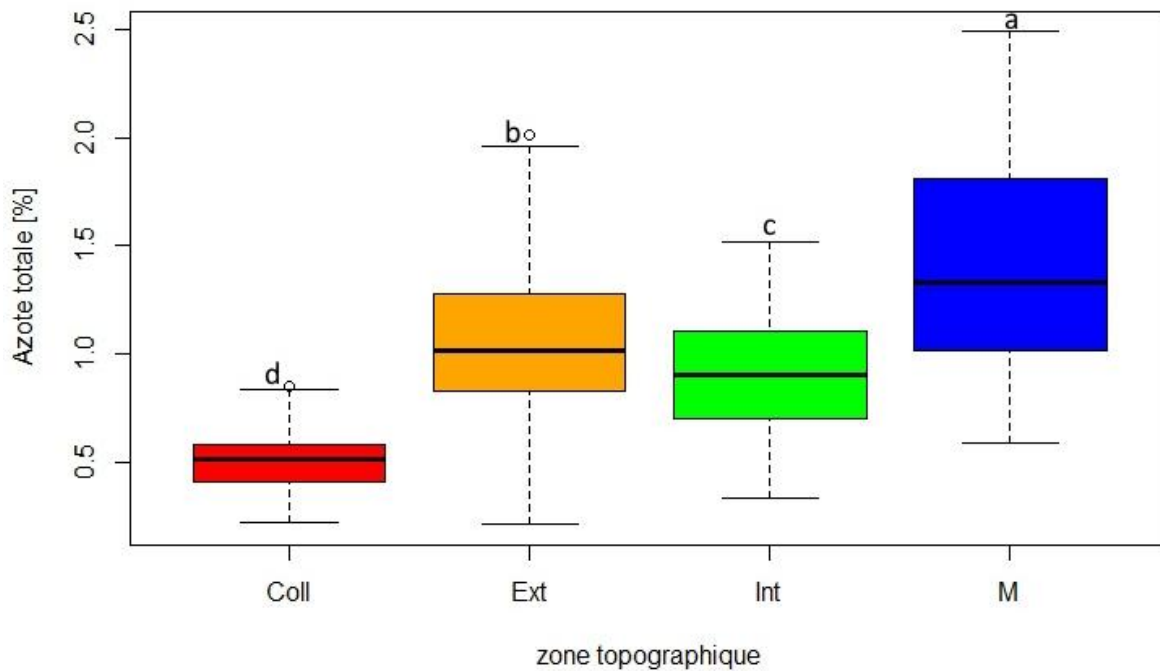


Figure 18 : Boxplot de l'azote totale du sol (0-20 cm) selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

Le rapport C/N du sol présentait également des variations significatives selon la position topographique (Tableau 6). Les valeurs sur 0–20 cm, illustrées à la Figure 19, montrent un rapport C/N plus élevé dans la zone Ext, tandis que la zone Coll présente un rapport plus faible. Cette différenciation entre zones s'observe aussi bien sur l'ensemble du profil qu'à chaque niveau de profondeur

Tableau 6 : Rapport C/N du sol selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

C/N	Coll	Ext	Int	M
Rapport C/N				
0-5 cm	11,38 $\pm$ 0,37 c	13,71 $\pm$ 1,33 a	12,85 $\pm$ 0,60 b	13,55 $\pm$ 0,40 a
5-10 cm	11,00 $\pm$ 0,47 c	14,44 $\pm$ 2,61 a	12,45 $\pm$ 0,65 b	13,39 $\pm$ 0,88 a
10-15 cm	10,80 $\pm$ 0,41 d	14,74 $\pm$ 1,89 a	11,86 $\pm$ 0,42 c	13,25 $\pm$ 1,28 b
15-20 cm	10,75 $\pm$ 0,56 d	16,83 $\pm$ 2,82 a	12,03 $\pm$ 0,27 c	13,94 $\pm$ 1,43 b
0-20 cm	10,98 $\pm$ 0,51 d	14,93 $\pm$ 2,47 a	12,30 $\pm$ 0,63 c	13,54 $\pm$ 1,07 b

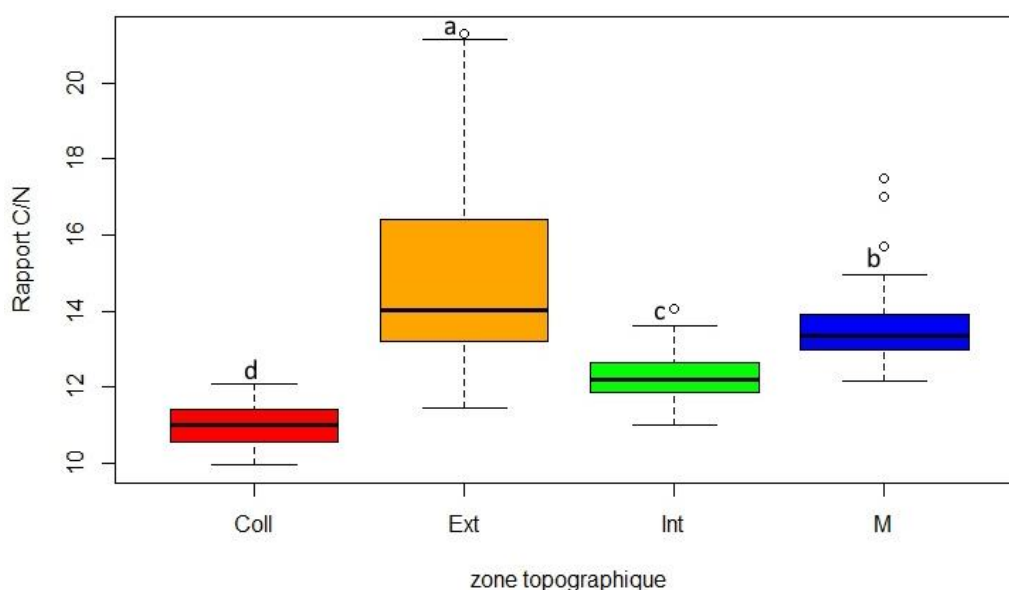


Figure 19 : Boxplot du rapport C/N du sol (0-20 cm) selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

Les lettres associées aux moyennes et aux distributions indiquent des différences significatives entre zones topographiques, établies sur la base d'intervalles de confiance à 95 %.

Discussion

La distribution de l'azote total du sol suit globalement celle du carbone organique, avec des teneurs plus élevées dans les zones hydromorphes, en particulier en zone M ($\approx$ 1,41 %), et plus faibles dans les zones mieux drainées comme la zone Coll ($\approx$ 0,51 %). Cette évolution parallèle du carbone organique et de l'azote total indique que l'azote du sol est principalement lié à la matière organique car ils sont contrôlés par les mêmes facteurs, en particulier les conditions hydriques et la dynamique de la matière organique (Schmidt et al., 2011 ; Wiesmeier et al., 2019).

Le rapport C/N, plus élevé en zone Ext ($\approx 14,93$), traduit une matière organique moins décomposée et une minéralisation du carbone plus lente, liée aux conditions hydromorphes et à la limitation de l'oxygénation du sol. Cette dynamique s'accompagne généralement d'une immobilisation relative de l'azote organique, susceptible de réduire la disponibilité en azote minéral pour les microorganismes et les plantes (Manzoni et al., 2010).

À l'inverse, des rapports C/N plus faibles dans les zones mieux drainées, comme la zone Coll ($\approx 10,98$), indiquent une matière organique plus transformée et une minéralisation du carbone plus efficace, cohérente avec une activité microbienne aérobie accrue. Ces résultats confirment le rôle du rapport C/N comme indicateur clé de la qualité de la matière organique et des processus de minéralisation dans les sols alluviaux (Paustian et al., 2016).

Le fait que la zone Ext présente à la fois le $\text{SOC}_{\text{stock}}$ le plus élevé et le rapport C/N le plus important, malgré une teneur en carbone inférieure à celle de la zone M, suggère que cette zone combine des conditions favorables à l'accumulation du carbone dans le sol (densité apparente intermédiaire et apport de carbone organique significatif) avec une décomposition plus lente de la matière organique qui est moins disponible, traduisant un compromis optimal entre concentration en carbone et dynamique de minéralisation.

3.2 Flux de gaz

3.2.1 Flux surfacique de CO₂

Résultats

Les flux surfaciques de CO₂ du sol présentait des différences significatives selon les zones topographiques de la plaine alluviale (Figure 20, Tableau 7). La zone interne (Int) se distinguait par des flux de CO₂ significativement plus élevés que ceux observés dans les autres zones, tandis que la zone correspondant à l'ancien méandre (M) présentait les flux les plus faibles. Les zones colluviale (Coll) et externe (Ext) affichaient des flux intermédiaires, sans différence significative entre elles. Cette hiérarchisation des zones mettait en évidence une variabilité spatiale marquée de la respiration du sol le long du gradient topographique.

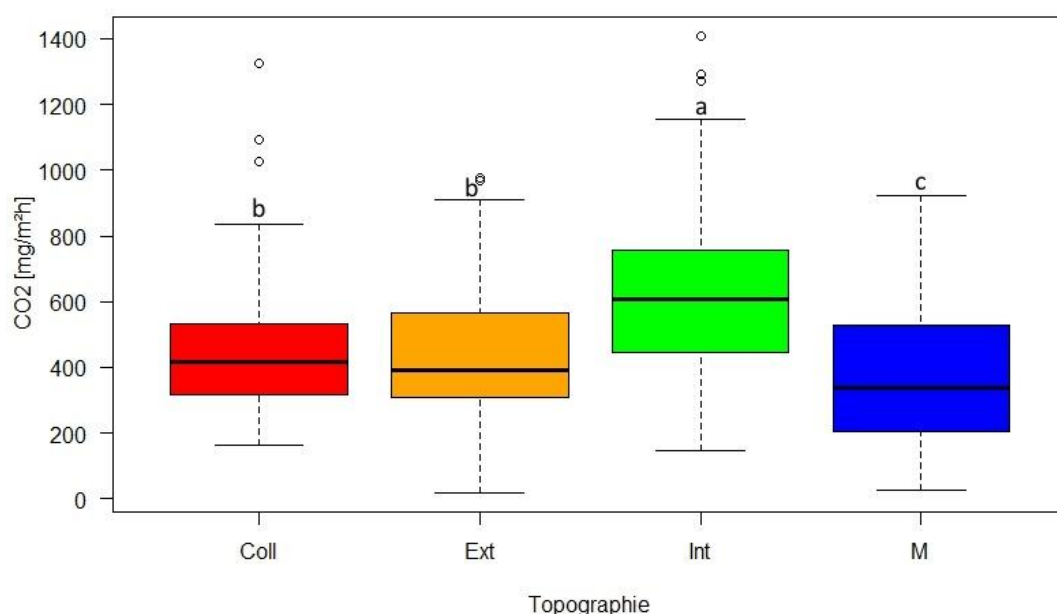


Figure 20 : Boxplot du flux surfacique de CO₂ selon les zones topographiques. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

La distribution des valeurs illustrée Figure 20, montre une variabilité intra-zone importante. Les lettres associées aux distributions confirment des différences significatives entre zones, sur la base d'intervalles de confiance à 95 %.

Tableau 7 : Flux surfacique de CO₂ du sol selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

	Coll	Ext	Int	M
CO ₂ [mg/m ² h]	446,7 $\pm$ 181,4 b	434,6 $\pm$ 174,6 b	623,2 $\pm$ 232,2 a	376,0 $\pm$ 204,3 c

L'évolution temporelle des flux moyens par zone, présentée en Annexe H, indique que les tendances observées entre zones topographiques sont globalement semblables sur l'ensemble de la période de mesure, malgré des fluctuations liées aux conditions environnementales. Par ailleurs, l'analyse des flux cumulés de CO₂ sur la période d'étude (Annexe I) confirme également la contribution dominante de la zone Int aux émissions de CO₂ du sol, tandis que la zone M contribue plus faiblement.

Discussion

La variabilité spatiale des flux de CO₂ observée le long du gradient topographique traduit l'hétérogénéité spatiale des conditions édaphiques au sein de la plaine alluviale et met en évidence le rôle central des conditions hydriques dans le contrôle de la respiration du sol. La contribution dominante de la zone Int suggère que des niveaux d'humidité intermédiaires constituent un compromis optimal entre disponibilité en substrat carbone et diffusion de l'oxygène, favorisant l'activité microbienne aérobie et la respiration racinaire. Ce type de réponse est conforme aux modèles décrivant une relation non linéaire entre humidité du sol et respiration, avec des flux maximaux observés à des teneurs en eau intermédiaires, généralement situées autour de 40 à 60 % de porosité remplie en eau, bien que ces valeurs puissent varier selon les propriétés du sol et le contexte hydrologique (Moyano et al., 2013).

À l'inverse, les faibles flux associés à la zone M, qui contient les teneurs en eau significativement les plus élevées, indiquent que la forte teneur en carbone organique ne se traduit pas nécessairement par une respiration élevée. La saturation fréquente du sol limite l'oxygénation des pores et ralentit la minéralisation aérobie du carbone, ce qui confirme que l'humidité du sol peut devenir un facteur de contrôle plus déterminant que la disponibilité en substrat dans les sols hydromorphes (Sierra et al., 2015 ; Vidon et al., 2010). Ces résultats soulignent l'importance d'intégrer la topographie et la dynamique hydrologique pour interpréter les flux sol-atmosphère dans les plaines alluviales.

3.2.2 Flux surfacique de CH₄

Résultats

Les flux surfaciques de CH₄ du sol montraient une forte variabilité selon les zones topographiques de la plaine alluviale (Figure 21, Tableau 8). Les zones Coll, Ext et Int présentaient majoritairement des flux négatifs, indiquant un fonctionnement global du sol comme puits de méthane atmosphérique. À l'inverse, la zone correspondant à

l'ancien méandre (M) se distinguait par des flux positifs, traduisant un rôle de source de CH₄. Les différences observées entre zones étaient statistiquement significatives, comme l'indiquent les lettres associées aux moyennes.

Tableau 8 : Flux surfacique de CH₄ du sol selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

	Coll	Ext	Int	M
CH ₄ [mg/m ² h]	-0,088 $\pm$ 0,027 c	-0,041 $\pm$ 0,027 b	-0,048 $\pm$ 0,116 b	0,165 $\pm$ 0,749 a

La distribution des flux par site en Figure 21 met en évidence une hétérogénéité marquée, dans la zone M, où la dispersion des valeurs est importante particulièrement pour le site 1 qui présente les flux les plus importants et les plus variables.

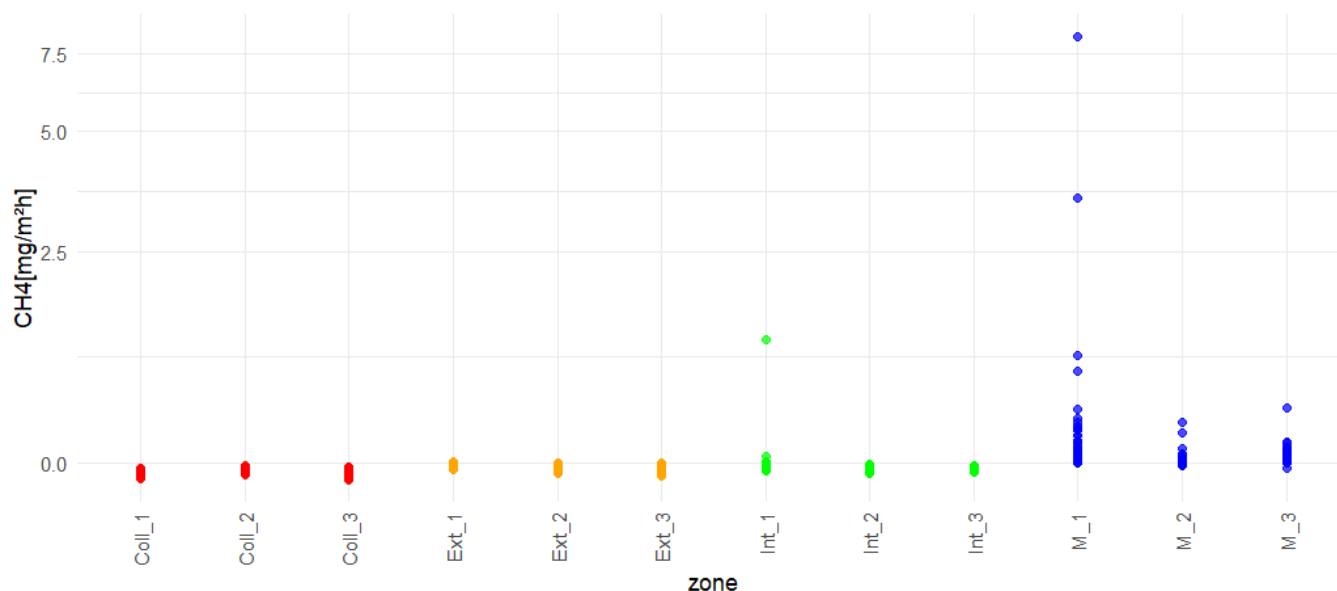


Figure 21 : Flux surfacique de CH₄ par site

Les flux mesurés au niveau de chaque anneau, présentés en Annexe J, confirme cette distinction nette entre la zone M et les autres zones topographiques. Les anneaux situés dans la zone de l'ancien méandre concentraient l'essentiel des flux positifs, tandis que les autres zones montraient presque systématiquement des flux négatifs ou proches de zéro. Les flux cumulés de CH₄ sur l'ensemble de la période d'étude présentés en Annexe K, indiquent les mêmes conclusions : un flux cumulé positif dans la zone M avec une dépendance suivant la zone topographique.

Les flux cumulés de CH₄ et de CO₂ sur l'ensemble de la période d'étude, exprimés en équivalent CO₂ et présentés en Figure 22, indiquent que la contribution du méthane au bilan global des GES est négligeable. Le flux de CH₄ exprimé en équivalent CO₂ de la zone M, qui possède les flux de méthane les plus importants, représente seulement environ 1% du flux de CO₂ de cette zone.

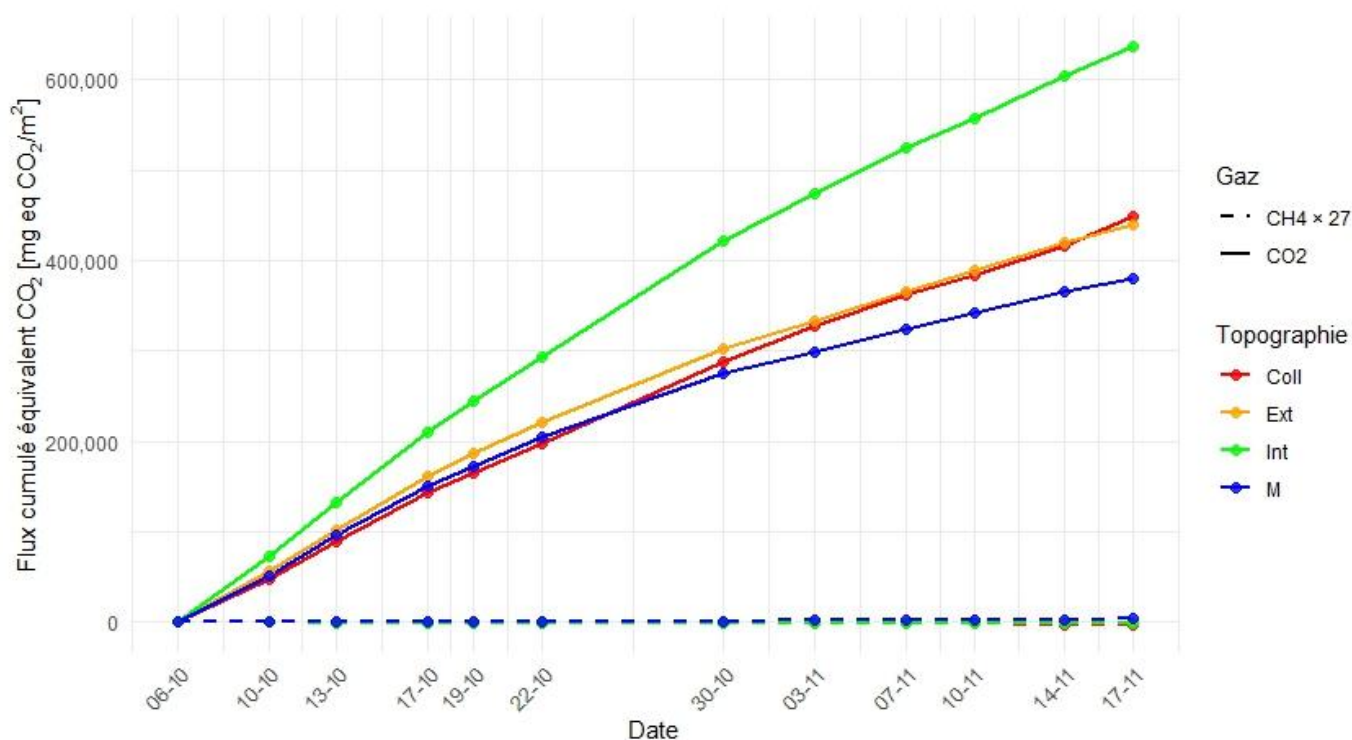


Figure 22 : Flux cumulé sur la période d'étude en équivalent CO₂ pour le CO₂ et le CH₄

Discussion

La distribution spatiale des flux de CH₄ met en évidence un contrôle dominant des conditions hydriques et du statut redox (principalement visible dans la zone Ext section 2.3.4) du sol le long du gradient topographique. Les flux les plus élevés observés en zone M traduisent un fonctionnement majoritairement anaérobie, lié à la saturation fréquente des pores et à la proximité de la nappe phréatique. Ces conditions favorisent l'installation de séquences redox réduites, propices à l'activité des microorganismes méthanogènes, tout en limitant l'oxydation du CH₄ par les méthanotrophes dans les horizons superficiels (Le Mer & Roger, 2001 ; Alewell et al., 2008 ; Bezyk et al., 2023).

Cette variabilité intra-zone suggère des conditions édaphiques très contrastées à petite échelle, probablement liées à la microtopographie, à l'humidité du sol et à l'hétérogénéité des conditions redox, favorables localement à la méthanogenèse. Ces observations sont cohérentes avec les travaux de (Alewell et al., 2008) qui montrent que, dans les zones humides, la production de CH₄ peut résulter de la coexistence de micro-environnements oxiques et anoxiques, contrôlés à la fois par la disponibilité en

matière organique et par la dynamique hydrique. Les flux mesurés dans les zones Coll, Ext et Int sont majoritairement inférieurs ou proches de zéro, traduisant un fonctionnement plus homogène dominé par l'oxydation du méthane, en lien avec des conditions globalement plus aérobies dans les horizons superficiels du sol. Cette oxydation du CH₄ peut toutefois être modifiée par d'autres facteurs, tels que le pH du sol, la nature de l'argile, la température, le type de végétation ou encore la disponibilité en nutriments, qui influencent l'activité et l'efficacité des communautés méthanotrophes (Le Mer & Roger, 2001).

3.2.3 Flux normalisé R_s

Résultats

La normalisation des flux de respiration du sol par le stock de carbone permet d'évaluer l'intensité relative de la minéralisation du sol entre zones topographiques. Le flux normalisé R_s moyen par site, présenté à la Figure 23, montre une variabilité marquée entre zones topographiques tout au long de la période d'étude.

Les variations journalières observées suivaient globalement les fluctuations de la température et de l'humidité du sol, confirmant le rôle majeur de ces paramètres environnementaux dans le contrôle de la respiration du sol.

Toutefois, malgré des conditions hydriques élevées dans certaines zones, des différences persistantes entre zones indiquaient que les propriétés des sols influençaient également sur l'intensité des flux rapportés au carbone stocké.

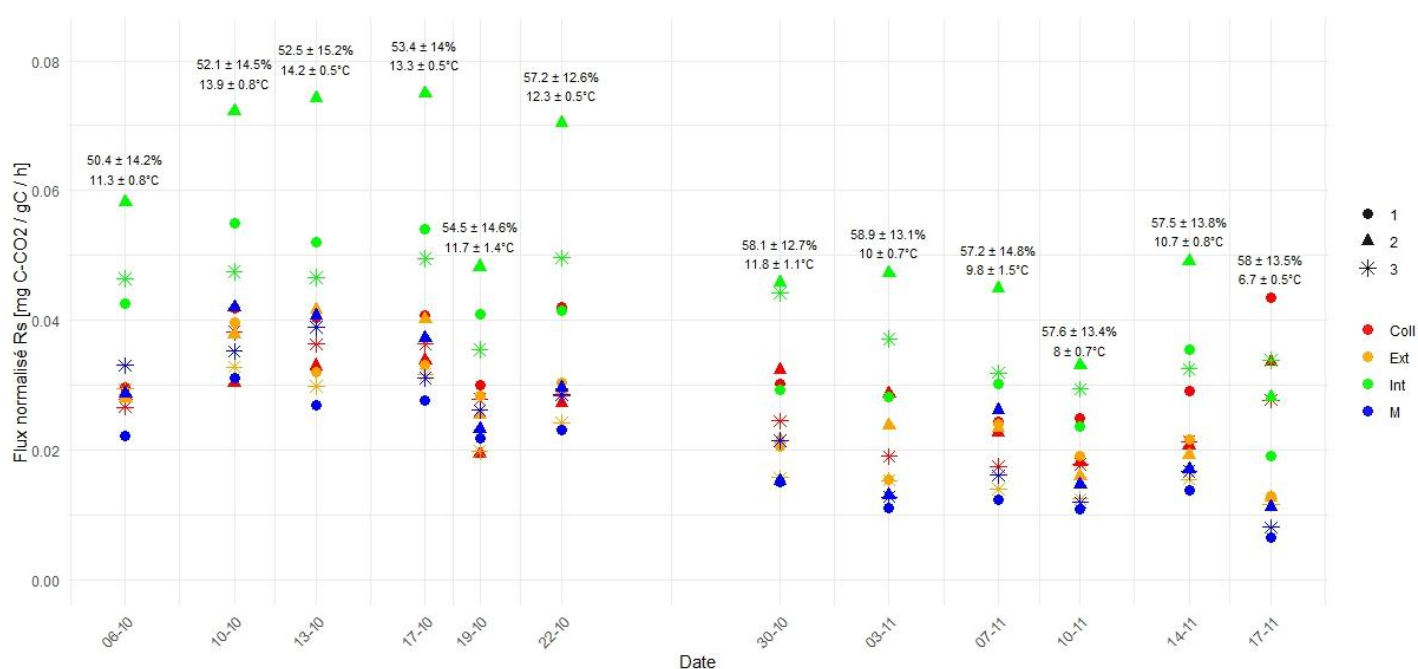


Figure 23 : Flux normalisé R_s moyen par site sur l'ensemble de la période d'étude. La température et l'humidité journalières sont présentées par la moyenne ± écart-type

Le cumul des flux normalisés sur l'ensemble de la période d'étude (Figure 24, Tableau 9) mettait en évidence des différences significatives entre zones topographiques. La zone interne (Int) se distinguait par un flux normalisé R_s significativement plus élevé que celui des autres zones, traduisant une respiration du sol plus intense par unité de carbone stocké. À l'inverse, les zones Ext et M présentaient des flux normalisés plus faibles et statistiquement comparables, tandis que la zone Coll occupait une position intermédiaire.

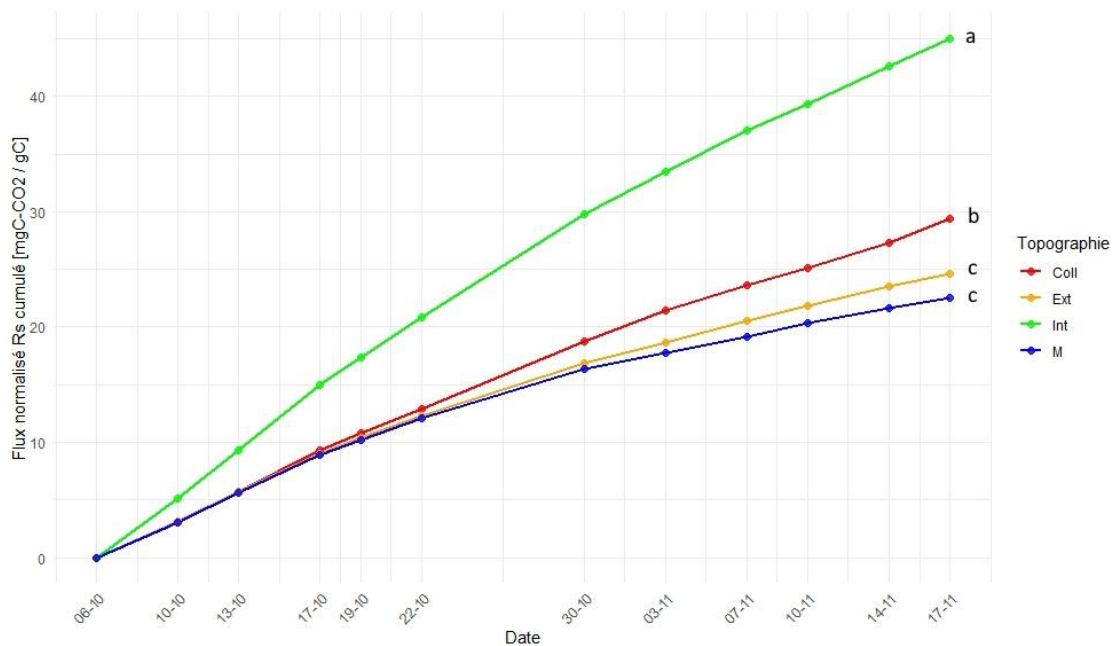


Figure 24 : Flux normalisé R_s cumulé pour l'ensemble de la période d'étude

Tableau 9 : Flux normalisé R_s cumulé selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

	Coll	Ext	Int	M
Rs [mgC-CO₂/gC] 0-10cm	29,4 $\pm$ 5,9 b	24,6 $\pm$ 3,3 c	44,9 $\pm$ 12,4 a	22,5 $\pm$ 7,2 c

Lorsque la normalisation a été réalisée en prenant en compte le stock de carbone cumulé sur les 20 premiers centimètres du sol (Annexe L), la hiérarchisation des zones était maintenue. La zone Int conservait les valeurs les plus élevées de flux normalisé R_s , confirmant une dynamique de minéralisation du carbone plus active. Les zones Ext et M restaient caractérisées par des flux normalisés plus faibles, suggérant une plus grande stabilité du carbone organique stocké dans ces secteurs. La zone Coll présentait à nouveau une valeur intermédiaire, indiquant un fonctionnement transitoire entre les zones les plus minéralisantes et celles où le carbone apparaît plus stabilisé.

Discussion

La normalisation des flux de respiration par le stock de carbone met en évidence des différences fonctionnelles nettes entre zones topographiques, qui ne sont pas directement explicables par la seule quantité de carbone stockée. Les valeurs élevées de R_s cumulées observées en zone Int ($\approx 44,9 \text{ mgC-CO}_2\cdot\text{gC}^{-1}$) indiquent une minéralisation du carbone plus intense par unité de carbone, suggérant que le carbone y est globalement plus biodisponible. Ce fonctionnement est cohérent avec des conditions hydriques intermédiaires et des rapports C/N plus faibles, favorables à une activité microbienne efficace et à une décomposition rapide de la matière organique (Manzoni et al., 2010).

À l'inverse, les zones M et Ext présentent des valeurs de R_s significativement plus faibles (respectivement $\approx 22,5$ et $\approx 24,6 \text{ mgC-CO}_2\cdot\text{gC}^{-1}$), malgré des stocks de carbone parfois élevés, traduisant une plus grande stabilité apparente du carbone organique. En zone M, la saturation fréquente du sol limite la diffusion de l'oxygène et contraint la respiration aérobie, réduisant ainsi l'intensité de la minéralisation rapportée au stock de carbone. Ce découplage entre stock et flux confirme que les contraintes hydriques et redox peuvent devenir plus déterminantes que la disponibilité en substrat pour contrôler la respiration du sol (Le Mer & Roger, 2001 ; Alewell et al., 2008).

Lorsque la normalisation est réalisée sur un stock de carbone intégré sur 20 cm, la persistance de la hiérarchisation des zones renforce l'interprétation selon laquelle les différences de R_s reflètent des fonctionnements biogéochimiques contrastés, et non un simple effet de profondeur d'intégration. La zone Coll, avec des valeurs intermédiaires, illustre un fonctionnement transitoire où la minéralisation du carbone est partiellement contrainte par les conditions hydriques, sans atteindre toutefois les limitations fortes observées dans les sols hydromorphes. Ces résultats confirment que le flux normalisé R_s constitue un indicateur pertinent pour caractériser la dynamique réelle du carbone dans les sols alluviaux, en intégrant simultanément qualité de la matière organique, conditions environnementales et contraintes microbiennes (Manzoni et al., 2010).

3.2.4 Analyse des flux selon la température et l'humidité

Résultats

L'application du modèle Q_{10} mettait en évidence des différences significatives de sensibilité thermique de la respiration du sol entre les zones topographiques (Tableau 10, Figure 25), traduisant des fonctionnements significativement différents selon la topographie, indépendamment des niveaux moyens de flux. La zone Coll présentait

la sensibilité thermique la plus faible, avec un Q_{10} significativement inférieur à celui des autres zones, indiquant une réponse modérée de la respiration à l'augmentation de la température et un contrôle thermique limité. À l'inverse, la zone de l'ancien méandre (M) se distinguait par une sensibilité thermique très élevée, suggérant une forte amplification des flux avec la température, bien que cette réponse s'accompagnait d'une variabilité importante, indiquant l'influence conjointe d'autres facteurs environnementaux. La zone Int, malgré des flux normalisés élevés, présentait un Q_{10} plus modéré, traduisant une respiration soutenue mais moins dépendante des variations thermiques.

Tableau 10 : Résultats de Q_{10} et R_{10} pour le flux normalisé R_s ($n=144$) selon les zones topographiques. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques sur la base d'intervalles de confiance à 95 %

	R_s [mgC-CO ₂ /gC/h]	R_{10} [mgC-CO ₂ /gC/h]	Q_{10} [-]	R^2 [-]
Coll	0,029 $\pm$ 0,012 b	0,0247 $\pm$ 0,0012 b	1,83 $\pm$ 0,32 d	0,13
Ext	0,024 $\pm$ 0,010 c	0,0192 $\pm$ 0,0006 c	3,82 $\pm$ 0,34 b	0,43
M	0,022 $\pm$ 0,012 d	0,0158 $\pm$ 0,0008 d	7,29 $\pm$ 1,59 a	0,44
Int	0,044 $\pm$ 0,018 a	0,0367 $\pm$ 0,0011 a	2,77 $\pm$ 0,31 c	0,38

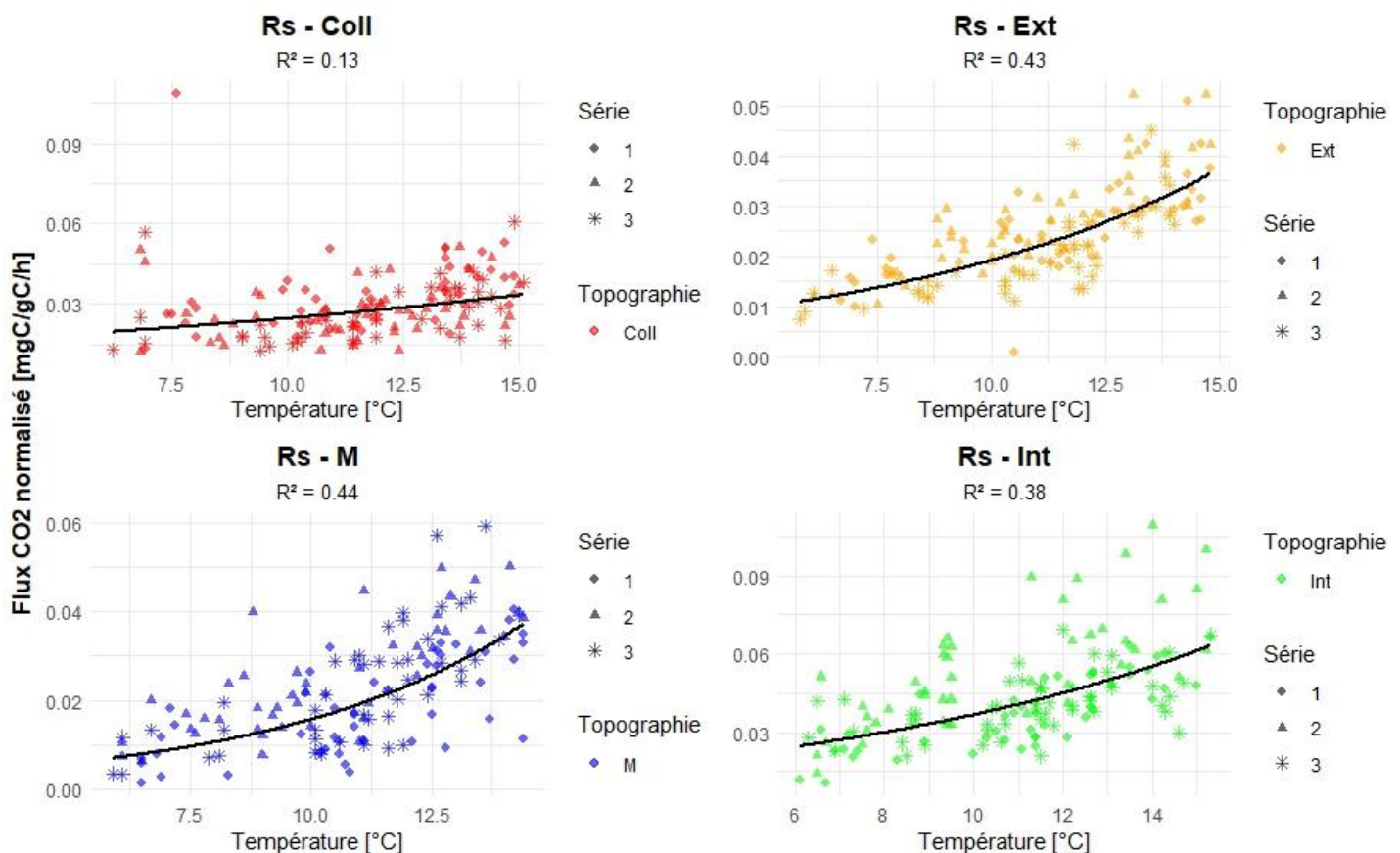


Figure 25 : Ajustement de la respiration du sol selon les zones topographiques, modélisation Q_{10} basée sur la température du sol

L'application du modèle Q_{10} au flux de CH_4 dans la zone de l'ancien méandre mettait en évidence une sensibilité thermique très faible (Tableau 11, Figure 26). Le Q_{10} peu élevé et le faible pouvoir explicatif du modèle indiquaient que la température du sol jouait un rôle limité dans le contrôle des émissions de méthane. Ces résultats suggéraient que la variabilité du flux de CH_4 était principalement régie par d'autres facteurs environnementaux, indépendamment des variations thermiques observées

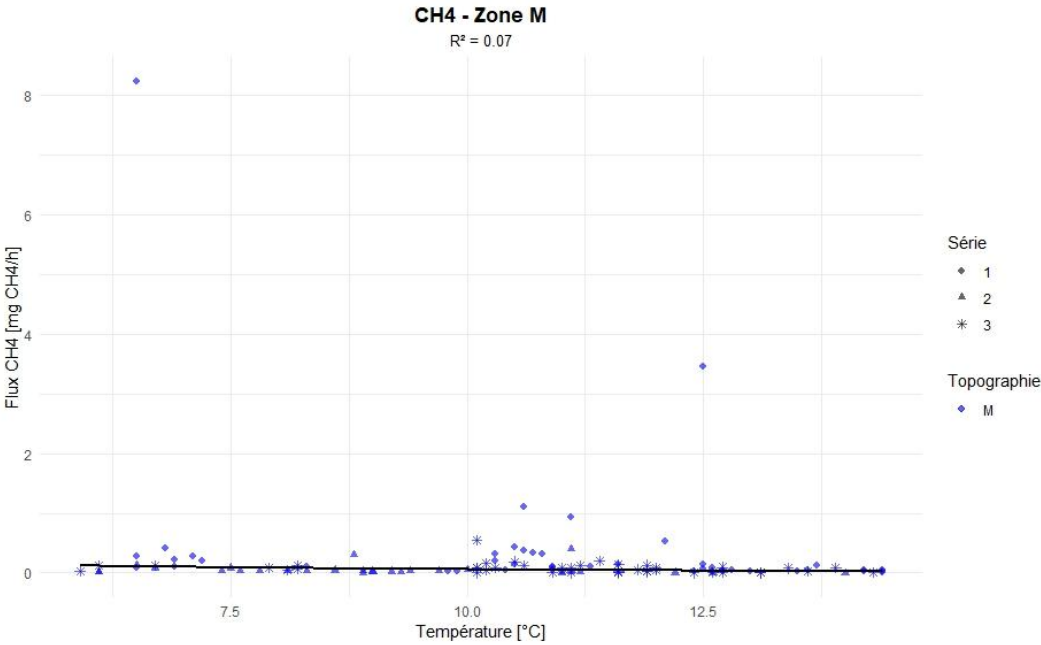


Figure 26 : Ajustement de l'émission de CH_4 pour la zone M, modélisation Q_{10} basée sur la température du sol

Tableau 11: Résultats de Q_{10} et R_{10} pour le flux de CH_4 ($n=144$) pour la zone M. Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type

	CH ₄ [mg/m²/h]	R ₁₀ [mgC-CO ₂ /gC/h]	Q ₁₀ [-]	R² [-]
M	0,21 ± 0,83	0,0568 ± 0,0080	0,197 ± 0,135	0,070

L'analyse des résidus du modèle en fonction de l'humidité du sol (Figure 27) indiquait que la température seule n'explique pas entièrement la variabilité des flux. La répartition équilibrée des résidus positifs et négatifs entre zones (Tableau 12) mettait en évidence une modulation de la respiration du sol par l'état hydrique, quelles que soient les conditions thermiques.

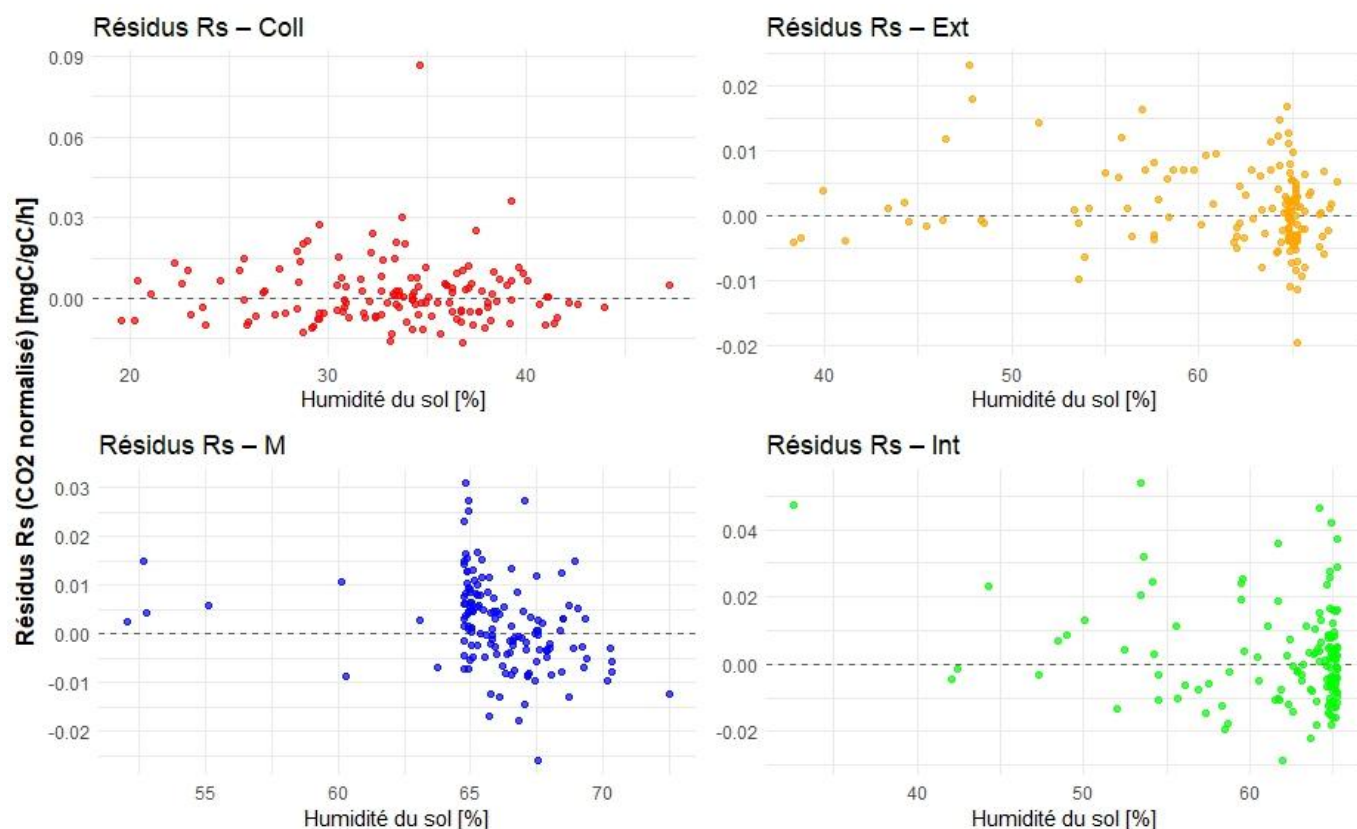


Figure 27 : Résidus entre R_s mesurée et la courbe d'ajustement du modèle Q_{10} en fonction de l'humidité du sol en [%] selon les zones topographiques.

Tableau 12 : Pourcentage entre la respiration du sol RS et la courbe d'ajustement du modèle Q_{10} en fonction de l'humidité du sol au-dessus et en-dessous de 0

	% au-dessus de 0	% en-dessous de 0
Coll	49,3	50,7
Ext	53,5	46,5
M	56,9	43,1
Int	48,6	51,4

Pour le méthane, l'analyse des résidus en fonction de l'humidité du sol (Figure 28, Tableau 13) montrait également une répartition relativement équilibrée entre valeurs positives et négatives. Cette dispersion soulignait le rôle prépondérant des conditions hydriques dans le contrôle des émissions de méthane.

Tableau 13 : : Pourcentage entre le flux de CH_4 et la courbe d'ajustement du modèle Q_{10} en fonction de l'humidité du sol au-dessus et en-dessous de 0

	% au-dessus de 0	% en dessous de 0
M	54,3	45,7

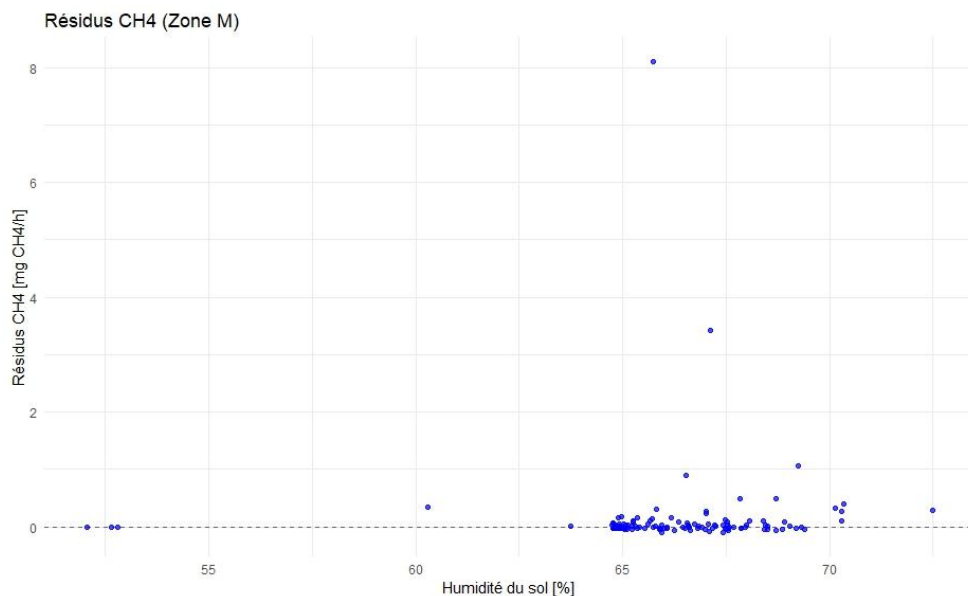


Figure 28 : Résidus entre le flux CH_4 mesuré et la courbe d'ajustement du modèle Q_{10} en fonction de l'humidité du sol en [%] pour la zone M

Discussion

Les contrastes de Q_{10} observés entre zones topographiques indiquent que la sensibilité thermique de la respiration du sol ne reflète pas uniquement un contrôle direct de la température, mais résulte de l'interaction entre contraintes hydriques, accessibilité du carbone et disponibilité en oxygène. Davidson et al. (2006) montrent que des valeurs élevées de Q_{10} traduisent souvent un changement du facteur limitant dominant, plutôt qu'une réponse thermique intrinsèque de l'activité microbienne.

Dans cette optique, la faible sensibilité thermique observée en zone Coll ($Q_{10} \approx 1,83$) suggère une respiration contrôlée par des substrats accessibles et des conditions aérobies stables. À l'inverse, le Q_{10} très élevé mesuré en zone M ($Q_{10} \approx 7,29$) reflète une respiration fortement contrainte, où l'augmentation de la température amplifie les flux en levant partiellement les limitations liées à l'anoxie et à l'accessibilité du carbone. Des synthèses expérimentales montrent en effet que les pools de carbone physiquement ou chimiquement protégés présentent une sensibilité apparente accrue à la température (Conant et al., 2011).

La très faible sensibilité thermique du CH_4 en zone M ($Q_{10} \approx 0,21$), associée à un faible pouvoir explicatif du modèle, indique que la température ne constitue pas un facteur de contrôle majeur des émissions de méthane. Cette faible dépendance thermique est cohérente avec les synthèses montrant que la production et l'oxydation du CH_4 sont avant tout régulées par les conditions redox, la saturation en eau et la disponibilité en oxygène, la température n'intervenant qu'en second ordre lorsque ces contraintes

dominant (Le Mer & Roger, 2001 ; Davidson et al., 2006). En outre, la méthanogenèse est généralement associée à la persistance de conditions hydromorphes, nécessaires à l'installation de communautés strictement anaérobies, ce qui peut conduire à des émissions de CH₄ élevées même lors de périodes de températures plus basses, contribuant ainsi à une sensibilité thermique apparente très faible (Le Mer & Roger, 2001). Les résultats confirment ainsi que, dans les sols hydromorphes, les émissions de CH₄ sont principalement gouvernées par la dynamique hydrique plutôt que par les variations thermiques saisonnières.

L'analyse des résidus du modèle Q₁₀ montre que la température n'explique pas à elle seule la variabilité de la respiration normalisée du sol, l'humidité intervenant comme un facteur majeur en fonction de l'oxygénation et de l'accessibilité du carbone. Pour le CH₄, la dispersion similaire des résidus confirme que les émissions sont principalement contrôlées par la persistance de conditions hydromorphes et redox réductrices, la température ne jouant qu'un rôle secondaire lorsque la saturation du sol est dominante.

3.3 Avantages perçus d'un reméandrage à partir des résultats de l'étude

L'analyse des flux de gaz et des propriétés du sol des différentes zones topographiques met en évidence une forte hétérogénéité fonctionnelle au sein de la plaine alluviale, incluant l'ancien méandre. Les contrastes observés entre zones en termes de stocks de carbone, de respiration du sol et d'émissions de CH₄ illustrent la diversité des fonctionnements biogéochimiques associés à des conditions hydriques et édaphiques différenciées.

La zone interne (Int) se distingue par des flux de respiration normalisée élevés, traduisant une minéralisation du carbone plus intense par unité de carbone stocké. Ces résultats suggèrent que des conditions d'humidité intermédiaires et une bonne oxygénation des horizons superficiels favorisent l'activité microbienne et le recyclage du carbone. Ce fonctionnement est caractéristique de sols alluviaux dynamiques, contribuant au maintien de la fertilité et au soutien de la production végétale, des fonctions essentielles des plaines alluviales (Acreman & Holden, 2013).

À l'inverse, l'ancien méandre (zone M) présente des flux de CO₂ normalisés plus faibles et des émissions de CH₄ associées à des conditions hydromorphes persistantes. Ces résultats indiquent une limitation de la minéralisation aérobie et une plus grande stabilité relative du carbone stocké, malgré une activité méthanogène localisée. Cette coexistence de zones à recyclage rapide du carbone et de zones à stockage plus stable souligne la complémentarité fonctionnelle des différentes unités topographiques.

L'étude de l'ancien méandre met en évidence le rôle potentiel des structures passées du fonctionnement du cours d'eau dans le maintien d'une mosaïque de processus biogéochimiques au sein des plaines alluviales. Cette hétérogénéité fonctionnelle est susceptible de soutenir à la fois le stockage du carbone, la régulation des flux de gaz à effet de serre et la diversité des habitats, des éléments clés des services écosystémiques associés aux systèmes fluviaux (Gurnell et al., 2016).

3.4 Limitations et perspectives

Cette étude présente plusieurs limites qui doivent être prises en compte dans l'interprétation des résultats. En premier lieu, l'estimation des stocks de carbone a été limitée aux 20 premiers centimètres du sol. Or, les observations pédologiques montrent que certaines zones, notamment l'ancien méandre, conservent des teneurs élevées en carbone organique à plus grande profondeur. Une extension des prélèvements en profondeur permettrait de mieux quantifier les stocks totaux de carbone et de mieux évaluer le rôle des zones hydromorphes dans le stockage à long terme du carbone.

Par ailleurs, bien que le dispositif d'échantillonnage permette de capter une forte variabilité spatiale, la microtopographie très marquée de la plaine alluviale implique une hétérogénéité à très fine échelle qui ne peut être entièrement représentée. L'étude a dû se limiter à un nombre de points compatible avec les contraintes de temps et de matériel, ce qui restreint la généralisation des résultats à l'ensemble de la plaine alluviale.

Sur le plan statistique, l'analyse repose principalement sur des intervalles de confiance à 95 %. Cette méthode permet d'identifier des différences fiables entre zones sans supposer une distribution particulière des données. Néanmoins, des analyses complémentaires, telles qu'une ANOVA suivie de tests post-hoc, ou des modèles linéaires mixtes intégrant explicitement les effets de la topographie, de l'humidité et de la température, permettraient d'affiner la compréhension des facteurs contrôlant les flux de gaz et la respiration normalisée.

Certaines propriétés du sol n'ont pas été mesurées alors qu'elles peuvent influencer fortement la dynamique du carbone et des gaz. Des analyses supplémentaires couramment utilisées, telles que le pH du sol, la texture, l'ammonium ou les nitrates apporteraient des informations essentielles sur les conditions physico-chimiques contrôlant l'activité microbienne, la stabilisation du carbone.

Les mesures de flux de gaz ont été réalisées sur une période temporelle limitée. Un suivi sur une durée plus longue, couvrant l'ensemble des saisons, permettrait de mieux caractériser la variabilité saisonnière des flux de CO₂ et de CH₄ et d'évaluer l'influence de la phénologie végétale, des épisodes hydrologiques extrêmes et des variations thermiques annuelles sur les processus biogéochimiques.

Finalement, cette étude a été menée dans une plaine alluviale tempérée présentant une forte variabilité hydrologique et pédologique. Les résultats reflètent donc un

fonctionnement spécifique à ce contexte et ne peuvent pas être directement extrapolés à d'autres systèmes alluviaux soumis à des régimes climatiques, géomorphologiques ou hydrologiques différents.

4. Contributions

Contribution personnelle :

Jeroen Meersmans, Nicolas Kovacs, Matthias Maindiaux et moi-même avons réalisé l'ensemble des prélèvements de sol ainsi que toutes les mesures de flux de gaz.

J'ai séché et émotté l'ensemble des échantillons de sol pour lesquels, j'ai pesé la fraction de sol, rocheuse et racinaire. Ils ont ensuite été analysés au laboratoire d'analyses des sols agricoles de La Hulpe en utilisant la méthode de combustion sèche.

J'ai réalisé l'étude statistique avec la supervision de Jeroen Meersmans et Nicolas Kovacs.

La rédaction de ce document a été réalisée par mes soins.

Utilisation de l'intelligence artificielle :

Des outils d'intelligence artificielle ont été utilisés comme aide ponctuelle à l'élaboration du code d'analyse statistique, à la correction orthographique du document et à la traduction de la partie Abstract.

Ces outils n'ont en aucun cas influencé l'interprétation scientifique des résultats ni les conclusions de l'étude.

5. Conclusion

Cette étude met en évidence une forte structuration spatiale des propriétés du sol et des flux de gaz dans les différentes zones topographiques de la plaine alluviale. Les différences observées entre zones montrent que la respiration du sol ne dépend pas uniquement des stocks de carbone, mais résultent d'interactions complexes entre conditions hydriques, disponibilité en oxygène, qualité de la matière organique et contraintes physico-chimiques.

La zone interne se distingue par une respiration normalisée élevée, traduisant une minéralisation plus active par unité de carbone, tandis que la zone de l'ancien méandre présente des flux plus faibles malgré des teneurs élevées en carbone, suggérant une plus grande stabilisation liée à l'anoxie.

La faible sensibilité thermique du méthane confirme que ses émissions sont principalement contrôlées par la dynamique hydrique et les conditions d'oxydoréduction plutôt que par la température.

Dans l'ensemble, les résultats soulignent le rôle déterminant des anciens éléments (méandre) du paysage alluvial dans l'organisation des processus biogéochimiques des plaines alluviales. Ils indiquent également que l'importance des zones hydromorphes pour le stockage du carbone pourrait être sous-estimée lorsque l'analyse se limite aux horizons superficiels du sol, alors que des stocks significatifs peuvent persister en profondeur.

Bibliographie

- Acreman, M., & Holden, J. (2013). How Wetlands Affect Floods. *Wetlands*, 33(5), 773-786. <https://doi.org/10.1007/s13157-013-0473-2>
- Alewell, C., Paul, S., Lischeid, G., & Storck, F. R. (2008). Co-regulation of redox processes in freshwater wetlands as a function of organic matter availability? *Science of The Total Environment*, 404(2-3), 335-342. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.11.001>
- Arthington, A. H., Bhaduri, A., Bunn, S. E., Jackson, S. E., Tharme, R. E., Tickner, D., Young, B., Acreman, M., Baker, N., Capon, S., Horne, A. C., Kendy, E., McClain, M. E., Poff, N. L., Richter, B. D., & Ward, S. (2018). The Brisbane Declaration and Global Action Agenda on Environmental Flows (2018). *Frontiers in Environmental Science*, 6, 45. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00045>
- Bai, J., Yu, L., Du, S., Wei, Z., Liu, Y., Zhang, L., Zhang, G., & Wang, X. (2020). Effects of flooding frequencies on soil carbon and nitrogen stocks in river marginal wetlands in a ten-year period. *Journal of Environmental Management*, 267, 110618. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110618>
- Bezyk, Y., Dorodnikov, M., Górka, M., Sówka, I., & Sawiński, T. (2023). Temperature and soil moisture control CO₂ flux and CH₄ oxidation in urban ecosystems. *Geochemistry*, 83(3), 125989. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2023.125989>
- Bircher, S., Andreasen, M., Vuollet, J., Vehviläinen, J., Rautiainen, K., Jonard, F., Weihermüller, L., Zakharova, E., Wigneron, J.-P., & Kerr, Y. H. (2016). Soil moisture sensor calibration for organic soil surface layers. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 5(1), 109-125. <https://doi.org/10.5194/gi-5-109-2016>
- Carvalho, J. I., Carayugan, M. B., Tran, L. T. N., Hernandez, J. O., Youn, W. B., An, J. Y., & Park, B. B. (2024). Variation in Root Biomass and Distribution Based on the Topography, Soil Properties, and Tree Influence Index : The Case of Mt. Duryun in Republic of Korea. *Plants*, 13(10), 1340. <https://doi.org/10.3390/plants13101340>
- Chari, N. R., Tumber-Dávila, S. J., Phillips, R. P., Bauerle, T. L., Brunn, M., Hafner, B. D., Klein, T., Obersteiner, S., Reay, M. K., Ullah, S., & Taylor, B. N. (2024). Estimating the global root exudate carbon flux. *Biogeochemistry*, 167(7), 895-908. <https://doi.org/10.1007/s10533-024-01161-z>
- Chenu, C., Angers, D. A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., & Balesdent, J. (2019). Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research*, 188, 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>
- Claeson, S. M., Flitcroft, R. L., & Meyer, K. (2025). Effect of river and floodplain restoration and reconnection on aquatic macroinvertebrates: Seasonal responses over time. *Restoration Ecology*, 33(5), e70079. <https://doi.org/10.1111/rec.70079>
- Conant, R. T., Ryan, M. G., Ågren, G. I., Birge, H. E., Davidson, E. A., Eliasson, P. E., Evans, S. E., Frey, S. D., Giardina, C. P., Hopkins, F. M., Hyvönen, R., Kirschbaum, M. U. F., Lavallee, J. M., Leifeld, J., Parton, W. J., Megan Steinweg, J., Wallenstein, M. D., Martin Wetterstedt, J. Å., & Bradford, M. A. (2011). Temperature and soil organic matter decomposition rates—Synthesis of current knowledge and a way forward. *Global Change Biology*, 17(11), 3392-3404. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02496.x>

- Davidson, E. A., Janssens, I. A., & Luo, Y. (2006). On the variability of respiration in terrestrial ecosystems : Moving beyond Q_{10} . *Global Change Biology*, 12(2), 154-164. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01065.x>
- European Environment Agency. (2020). *Floodplains : A natural system to preserve and restore*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/431107>
- Even, C., Roux, G., Lantz, F., Petit, J.-E., Laval-Szopa, S., et al. (2021). *Énergies et pollutions : Enjeux de la transition écologique*. EDP Sciences.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *The state of the world's forests 2022: Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb9360en>
- Gurnell, A. M., Rinaldi, M., Belletti, B., Bizzi, S., Blamauer, B., Braca, G., Buijse, A. D., Bussetini, M., Camenen, B., Comiti, F., Demarchi, L., García De Jalón, D., González Del Tánago, M., Grabowski, R. C., Gunn, I. D. M., Habersack, H., Hendriks, D., Henshaw, A. J., Klösch, M., ... Ziliani, L. (2016). A multi-scale hierarchical framework for developing understanding of river behaviour to support river management. *Aquatic Sciences*, 78(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s00027-015-0424-5>
- Heger, A., Becker, J. N., Váscónez Navas, L. K., & Eschenbach, A. (2021). Factors controlling soil organic carbon stocks in hardwood floodplain forests of the lower middle Elbe River. *Geoderma*, 404, 115389. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115389>
- Hossain, M. F., Chen, W., & Zhang, Y. (2015). Bulk density of mineral and organic soils in the Canada's arctic and sub-arctic. *Information Processing in Agriculture*, 2(3-4), 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.09.001>
- Infoclimat (s.d.). *Climatologie 2025 – Spa (6490)*. Consulté le 15 décembre 2025 depuis <https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2025/spa/valeurs/06490.html>
- Institut Royal Météorologique de Belgique. (s.d.). *Climatogrammes période 1991-2020*. Consulté le 15 décembre 2025 depuis <https://www.meteo.be/fr/climat/climats-dans-le-monde/climatogrammes-periode-1991-2020>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Summary for policymakers. In H. Lee & J. Romero (Eds.), *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1-34). IPCC. <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>
- IPBES. (2018). *Summary for policymakers of the assessment report on land degradation and restoration of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* (R. Scholes, L. Montanarella, A. Brainich, N. Barger, B. ten Brink, M. Cantele, B. Erasmus, J. Fisher, T. Gardner, T. G. Holland, F. Kohler, J. S. Kotiaho, G. von Maltitz, G. Nangendo, R. Pandit, J. Parrotta, M. D. Potts, S. Prince, M. Sankaran, & L. Willemen, Eds.). IPBES Secretariat.
- IPBES. (2018). *Summary for policymakers of the regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Africa of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services* (E. Archer, L. E. Dziba, K. J. Mulongoy, M. A. Maoela, M. Walters, R. Biggs, M.-C. Cormier-Salem, F. DeClerck, M. C. Diaw, A. E. Dunham, P. Failler, C. Gordon, K. A. Harhash, R. Kasisi, F. Kizito, W. D. Nyingi, N. Oguge, B. Osman-Elasha, L. C. Stringer, L. Tito de Morais, A. Assogbadjo, B. N. Egoh, M. W. Halmy, K. Heubach, A. Mensah, L. Pereira, & N. Sitas, Eds.). IPBES Secretariat.

- Kail, J., Brabec, K., Poppe, M., & Januschke, K. (2015). The effect of river restoration on fish, macroinvertebrates and aquatic macrophytes: A meta-analysis. *Ecological Indicators*, 58, 311-321. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.011>
- Le Mer, J., & Roger, P. (2001). Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: A review. *European Journal of Soil Biology*, 37(1), 25-50. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(01\)01067-6](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(01)01067-6)
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60-68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- LI-COR Environmental. (2025). Deriving the flux equation: LI-8250. Consulté le 16 décembre 2025 depuis <https://www.licor.com/support/LI-8250/topics/deriving-the-flux-equation-co2.html>
- Ma, S., He, F., Tian, D., Zou, D., Yan, Z., Yang, Y., Zhou, T., Huang, K., Shen, H., & Fang, J. (2018). Variations and determinants of carbon content in plants: A global synthesis. *Biogeosciences*, 15(3), 693-702. <https://doi.org/10.5194/bg-15-693-2018>
- Maaß, A.-L., Schüttrumpf, H., & Lehmkuhl, F. (2021). Human impact on fluvial systems in Europe with special regard to today's river restorations. *Environmental Sciences Europe*, 33(1), 119. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00561-4>
- Manzoni, S., Trofymow, J. A., Jackson, R. B., & Porporato, A. (2010). Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter. *Ecological Monographs*, 80(1), 89-106. <https://doi.org/10.1890/09-0179.1>
- Mathiba, M., Awuah-Offei, K., & Baldassare, F. J. (2015). Influence of elevation, soil temperature and soil moisture content on reclaimed mine land soil CO₂ fluxes. *Environmental Earth Sciences*, 73(10), 6131-6143. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3839-8>
- Meersmans, J., Martin, M. P., Lacarce, E., De Baets, S., Jolivet, C., Boulonne, L., Lehmann, S., Saby, N. P. A., Bispo, A., & Arrouays, D. (2012). A high resolution map of French soil organic carbon. *Agronomy for Sustainable Development*, 32(4), 841-851. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0086-9>
- Moyano, F. E., Manzoni, S., & Chenu, C. (2013). Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. *Soil Biology and Biochemistry*, 59, 72-85. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.01.002>
- Natagora, Département Conservation. (2025). BioCheck RNA : Emmels .
- Ngao, J., Longdoz, B., Perrin, D., Vincent, G., Epron, D., Le Dantec, V., Soudani, K., Aubinet, M., Willm, F., & Granier, A. (2006). Cross-calibration functions for soil CO₂ efflux measurement systems. *Annals of Forest Science*, 63(5), 477-484. <https://doi.org/10.1051/forest:2006028>
- Noe, G. B., & Hupp, C. R. (2009). Retention of Riverine Sediment and Nutrient Loads by Coastal Plain Floodplains. *Ecosystems*, 12(5), 728-746. <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9253-5>
- Ontl, T. A., & Schulte, L. A. (2012). *Soil carbon storage*. Nature Education Knowledge, 3(10).
- Paustian, K., Lehmann, J., Ogle, S., Reay, D., Robertson, G. P., & Smith, P. (2016). Climate-smart soils. *Nature*, 532(7597), 49-57. <https://doi.org/10.1038/nature17174>
- Quine, T. A., Cressey, E. L., Dungait, J. A. J., De Baets, S., Meersmans, J., Jones, M. W., & Nicholas, A. P. (2022). Geomorphically mediated carbon dynamics of floodplain soils and implications for net effect of carbon erosion. *Hydrological Processes*, 36(9), e14657. <https://doi.org/10.1002/hyp.14657>

- Saint-Laurent, D., Paradis, R., Drouin, A., & Gervais-Beaulac, V. (2016). Impacts of Floods on Organic Carbon Concentrations in Alluvial Soils along Hydrological Gradients Using a Digital Elevation Model (DEM). *Water*, 8(5), 208. <https://doi.org/10.3390/w8050208>
- Schmidt, M. W. I., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D. A. C., Nannipieri, P., Rasse, D. P., Weiner, S., & Trumbore, S. E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. *Nature*, 478(7367), 49-56. <https://doi.org/10.1038/nature10386>
- Scott, D. N., & Wohl, E. E. (2018). Geomorphic regulation of floodplain soil organic carbon concentration in watersheds of the Rocky and Cascade Mountains, USA. *Earth Surface Dynamics*, 6(4), 1101-1114. <https://doi.org/10.5194/esurf-6-1101-2018>
- Sierra, C. A., Trumbore, S. E., Davidson, E. A., Vicca, S., & Janssens, I. (2015). Sensitivity of decomposition rates of soil organic matter with respect to simultaneous changes in temperature and moisture. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 7(1), 335-356. <https://doi.org/10.1002/2014MS000358>
- Skopp JM (2000) Physical properties of primary particles. In: Summer ME (ed) *Handbook of soil science*. CRC Press, Boca Raton, pp A3-A17
- Stoffers, T., Buijse, A. D., Geerling, G. W., Jans, L. H., Schoor, M. M., Poos, J. J., Verreth, J. A. J., & Nagelkerke, L. A. J. (2022). Freshwater fish biodiversity restoration in floodplain rivers requires connectivity and habitat heterogeneity at multiple spatial scales. *Science of The Total Environment*, 838, 156509. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156509>
- Stoffers, T., Collas, F. P. L., Buijse, A. D., Geerling, G. W., Jans, L. H., Van Kessel, N., Verreth, J. A. J., & Nagelkerke, L. A. J. (2021). 30 years of large river restoration : How long do restored floodplain channels remain suitable for targeted rheophilic fishes in the lower river Rhine? *Science of The Total Environment*, 755, 142931. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142931>
- Tan, Z., Zhang, Y., Liang, N., Song, Q., Liu, Y., You, G., Li, L., Yu, L., Wu, C., Lu, Z., Wen, H., Zhao, J., Gao, F., Yang, L., Song, L., Zhang, Y., Munemasa, T., & Sha, L. (2013). Soil respiration in an old-growth subtropical forest : Patterns, components, and controls. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(7), 2981-2990. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50300>
- Vandaudenard, T., & Baltus, H. (2025). *BioCheck RNA : Emmels* (Rapport technique). Département Conservation, Natagora
- Vidon, P., Allan, C., Burns, D., Duval, T. P., Gurwick, N., Inamdar, S., Lowrance, R., Okay, J., Scott, D., & Sebestyen, S. (2010). Hot Spots and Hot Moments in Riparian Zones : Potential for Improved Water Quality Management¹. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 46(2), 278-298. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00420.x>
- Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., Von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., Van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H.-J., & Kögel-Knabner, I. (2019). Soil organic carbon storage as a key function of soils—A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333, 149-162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- Wikipédia. (s.d.). *Wikipédia*. Consulté le 13 décembre 2025 depuis <https://www.wikipedia.org>
- Wohl, E., Bledsoe, B. P., Jacobson, R. B., Poff, N. L., Rathburn, S. L., Walters, D. M., & Wilcox, A. C. (2015). The Natural Sediment Regime in Rivers: Broadening the

- Foundation for Ecosystem Management. *BioScience*, 65(4), 358-371.
<https://doi.org/10.1093/biosci/biv002>
- World Meteorological Organization. (2024). State of the global climate 2024. *World Meteorological Organization*.
- Yang, X., Wang, B., Fakher, A., An, S., & Kuzyakov, Y. (2023). Contribution of roots to soil organic carbon: From growth to decomposition experiment. *CATENA*, 231, 107317.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107317>

Annexe

A. Photos des espèces présentes dans la réserve de l'Emmels (sources : Wikipédia, s.d.)



Juncus squarrosus
(Jonc rude)



Carex nigra
(Laïche noire)



Carex echinata
(Laïche étoilée)



Dactylorhiza maculata
(Orchis tacheté)



Gentiane pneumonanthe
(Jonc rude)



Saxicola rubetra
(Tarier des près)



Gallinago gallinago
(Bécassine des marais)



Castor fiber
(Castor commun)

B. Coordonnées du transect établi par la KU Leuven (Alexander James, PhD student, KU Leuven)

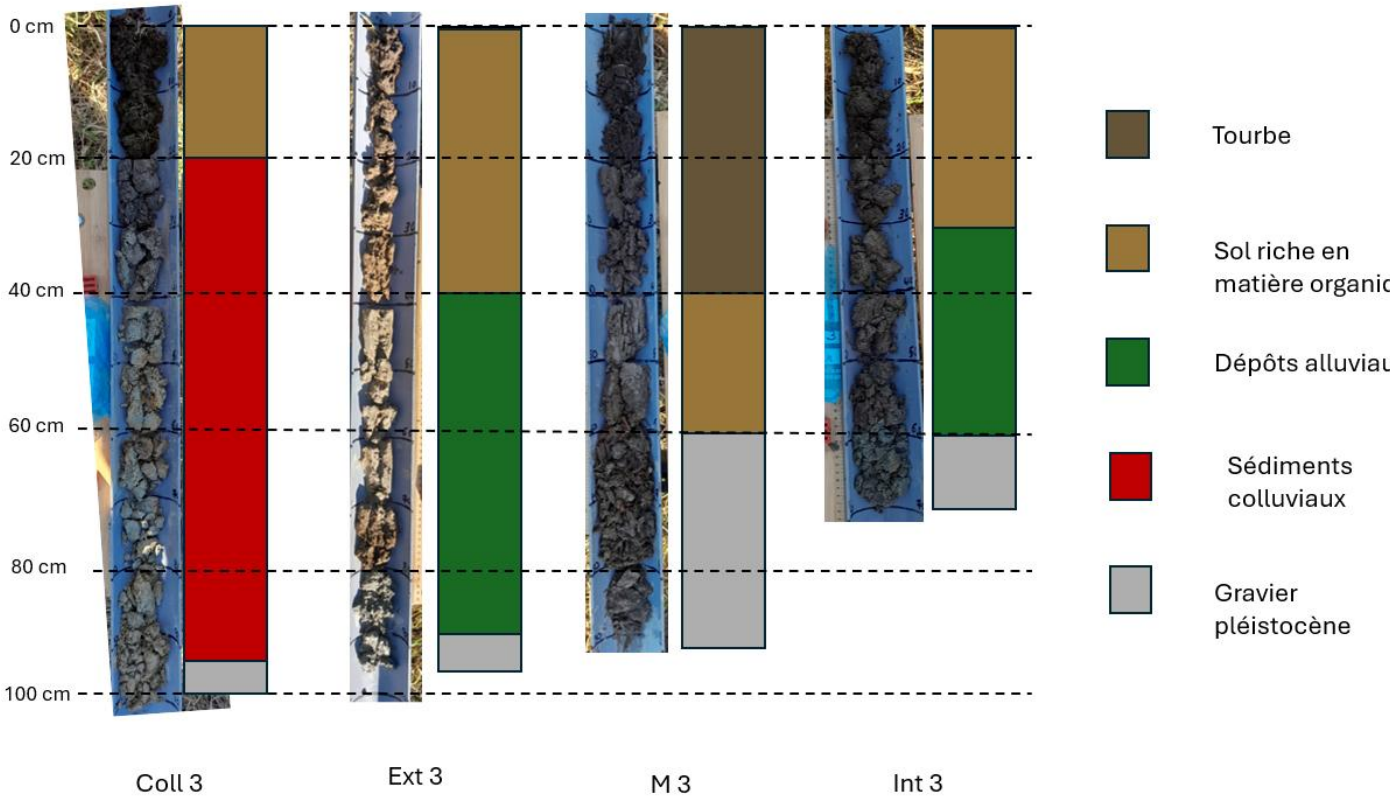
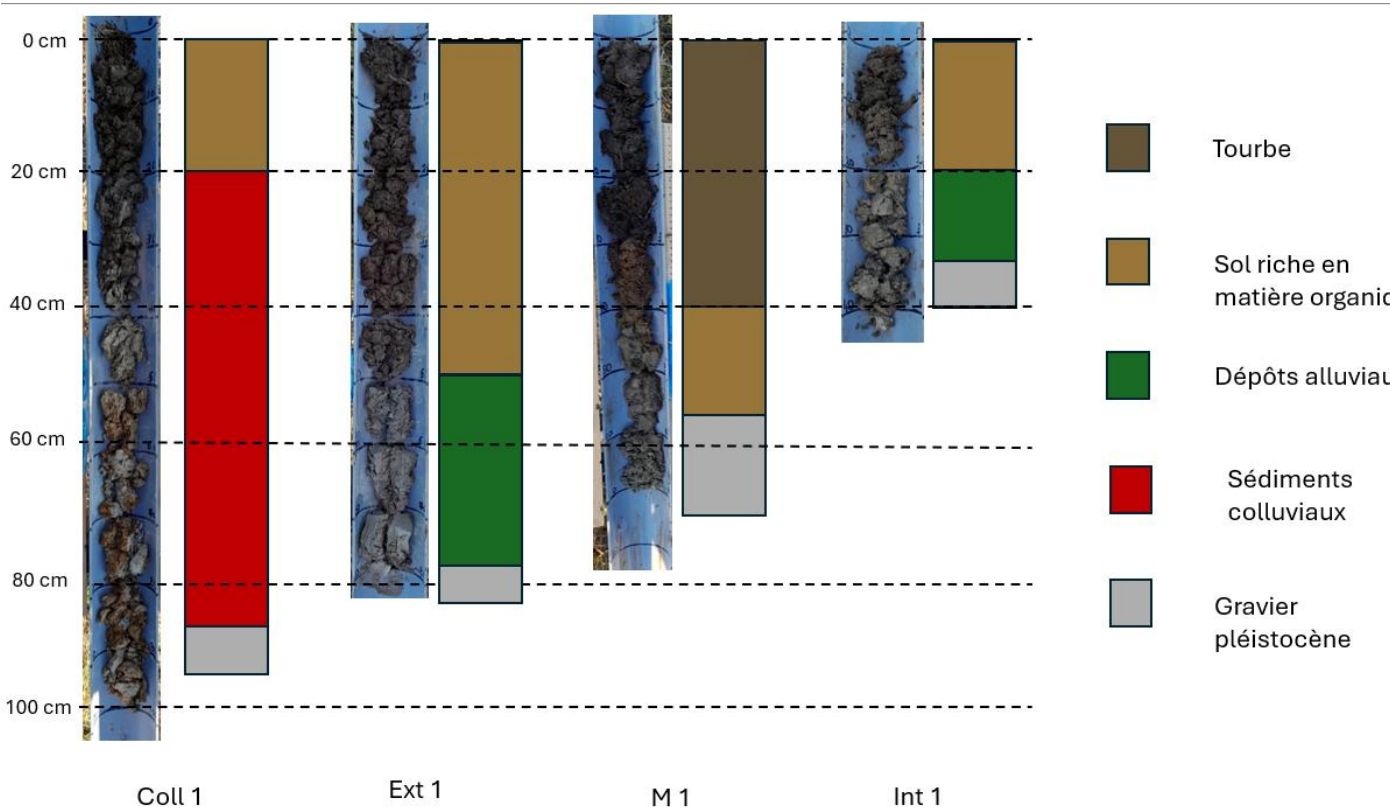
NAME	NORTH (Lambert Belge 72)	EAST (Lambert Belge 72)	Coordonnée X (WGS 84)	Coordonnées Y (WGS 84)
Ems1c01	113129.45538	276154.374346	6.140209971603288	50.31560229347581
Ems1c2	113137.872143	276156.648764	6.140244717241662	50.31567745442727
Ems1c3	113145.515375	276160.517271	6.140301579623138	50.315745320926155
Emsriv1	113149.355874	276163.160765	6.140339972643238	50.315779271703605
Emsriv2	113149.540628	276163.28839	6.140341825996124	50.315780904867864
Emsriv3	113150.466933	276164.369281	6.140357308614614	50.31578899846896
Emsriv4	113150.445105	276164.719216	6.140362213255602	50.31578872719574
Ems1c4	113153.395478	276165.537972	6.140374694629346	50.3158150691396

Ems1c5	113161.29994	276168.289936	6.140415972219636	50.31588552306524
Ems1c6	113167.943112	276172.766958	6.14048104155879	50.31594427047288
Ems1c7	113174.520919	276175.9931	6.140528530764882	50.3160026987786
Ems1c8	113181.402651	276179.884756	6.14058546366441	50.3160637158912
Ems1c9	113189.576809	276184.263222	6.140649663165574	50.316136244683726
Ems1profile	113196.934005	276186.669117	6.140685900284596	50.3162018540133
Ems1profile1	113202.346438	276189.024407	6.140720775330506	50.31624999488037
Ems1profile2	113207.34283	276190.77783	6.1407470626429	50.3162945255782
Ems1profile3	113110.006978	276145.938154	6.140085039021194	50.315429303315405
Ems1profile4	113116.373412	276148.508062	6.1401232450591	50.31548597277929
Ems1profile5	113123.89759	276151.731303	6.140171009743782	50.315552907735416

C. Coordonnée des points de mesure de GES (anneaux PVC) du dispositif expérimental (Lambert Belge 2008)

Nom	N	E	Nom	N	E
Coll_1_a	613218.76	776189.638	M_1_a	613186.816	776173.835
Coll_1_b	613218.49	776190.493	M_1_b	613186.456	776175.009
Coll_1_c	613217.643	776190.061	M_1_c	613185.494	776174.426
Coll_1_d	613218.075	776189.442	M_1_d	613186.169	776173.504
Coll_2_a	613216.397	776194.84	M_2_a	613182.282	776179.383
Coll_2_b	613216.137	776195.692	M_2_b	613181.223	776179.96
Coll_2_c	613215.205	776195.505	M_2_c	613180.824	776179.366
Coll_2_d	613215.674	776194.563	M_2_d	613181.545	776178.755
Coll_3_a	613214.055	776199.831	M_3_a	613177.19	776184.223
Coll_3_b	613213.755	776200.748	M_3_b	613176.582	776184.869
Coll_3_c	613212.896	776200.302	M_3_c	613175.972	776184.262
Coll_3_d	613213.552	776199.23	M_3_d	613176.892	776183.645
Ext_1_a	613199.023	776180.406	Int_1_a	613175.935	776169.195
Ext_1_b	613198.735	776181.425	Int_1_b	613175.378	776169.968
Ext_1_c	613197.964	776181.029	Int_1_c	613174.79	776169.595
Ext_1_d	613198.351	776180.092	Int_1_d	613175.25	776168.891
Ext_2_a	613194.144	776184.381	Int_2_a	613173.461	776175.596
Ext_2_b	613193.649	776185.372	Int_2_b	613172.959	776176.29
Ext_2_c	613192.843	776184.936	Int_2_c	613172.09	776175.527
Ext_2_d	613193.115	776183.974	Int_2_d	613172.886	776174.413
Ext_3_a	613190.055	776189.585	Int_3_a	613169.088	776177.72
Ext_3_b	613189.599	776190.846	Int_3_b	613168.1	776178.454
Ext_3_c	613188.778	776190.503	Int_3_c	613167.282	776178.335
Ext_3_d	613189.362	776189.352	Int_3_d	613168.089	776177.279

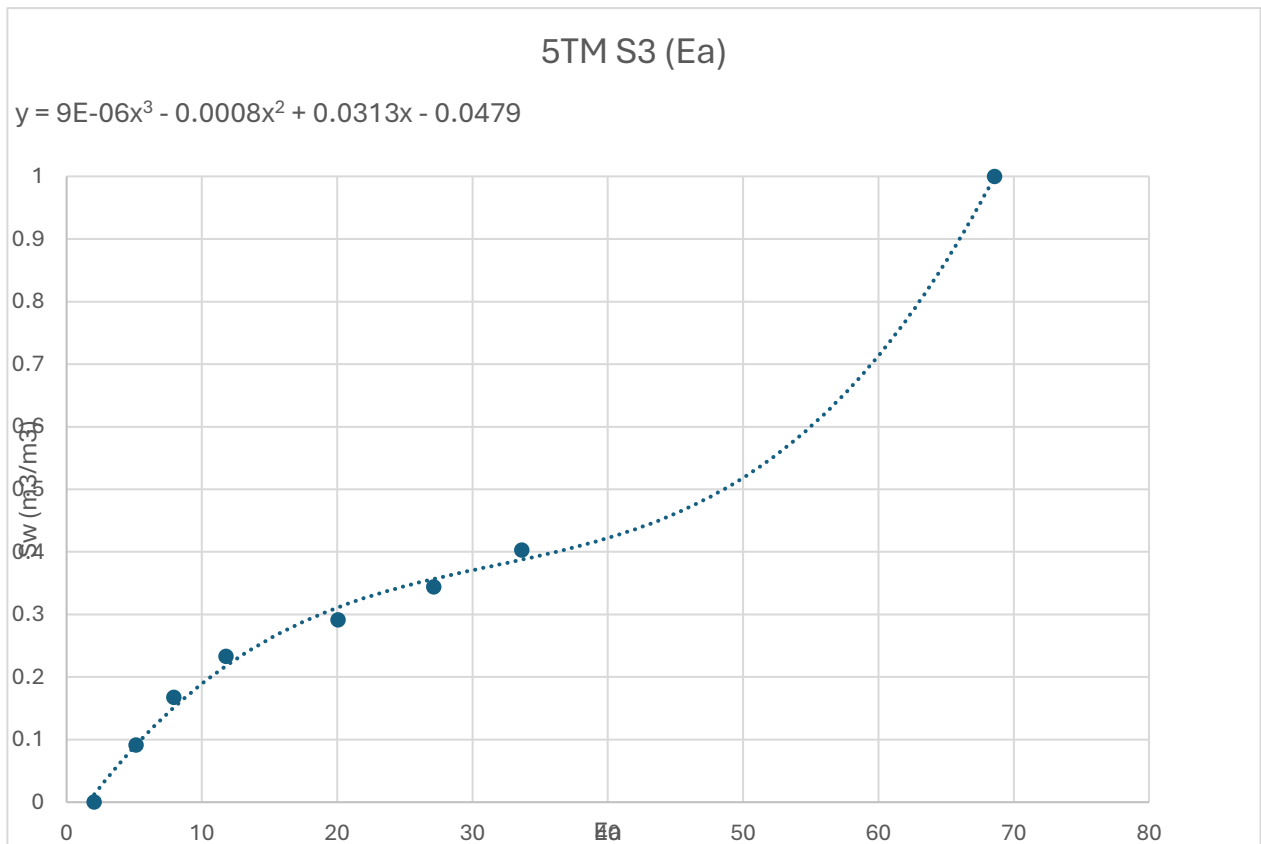
D. Pédologie de la zone d'étude



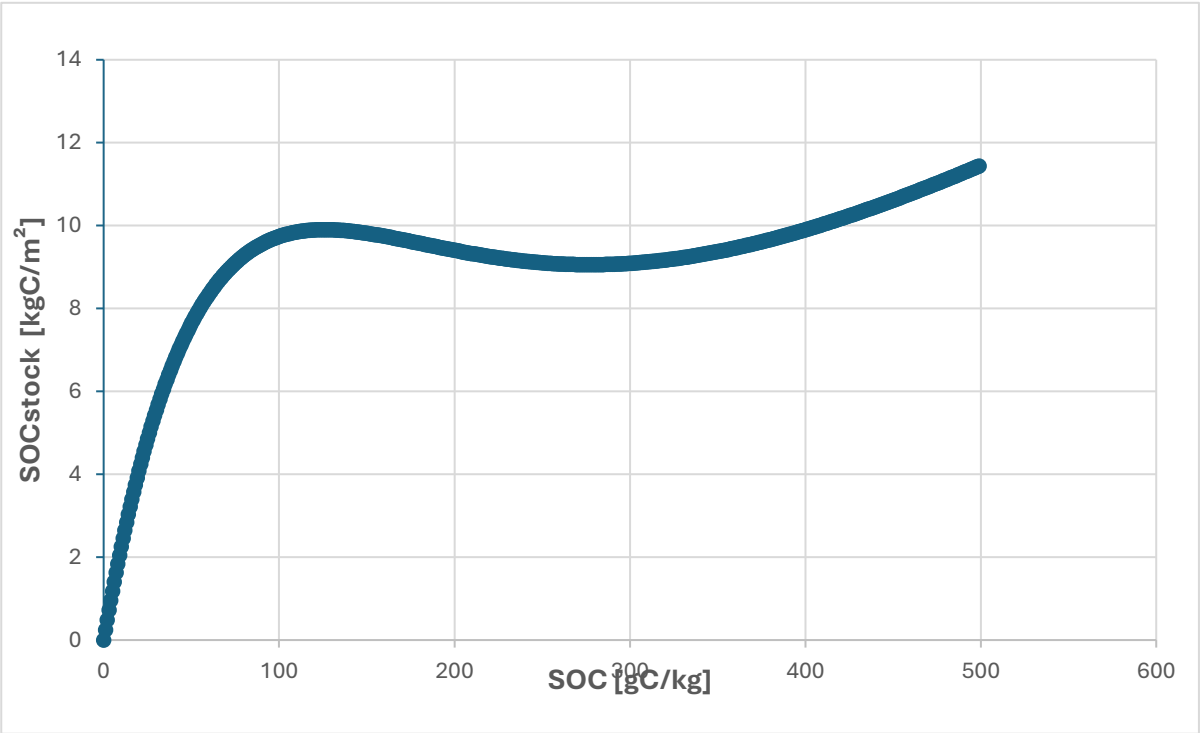
E. Photo d'un macrofossile de racine fractionné (source : photo personnelle)



F. Courbe de calibration de la zone Coll

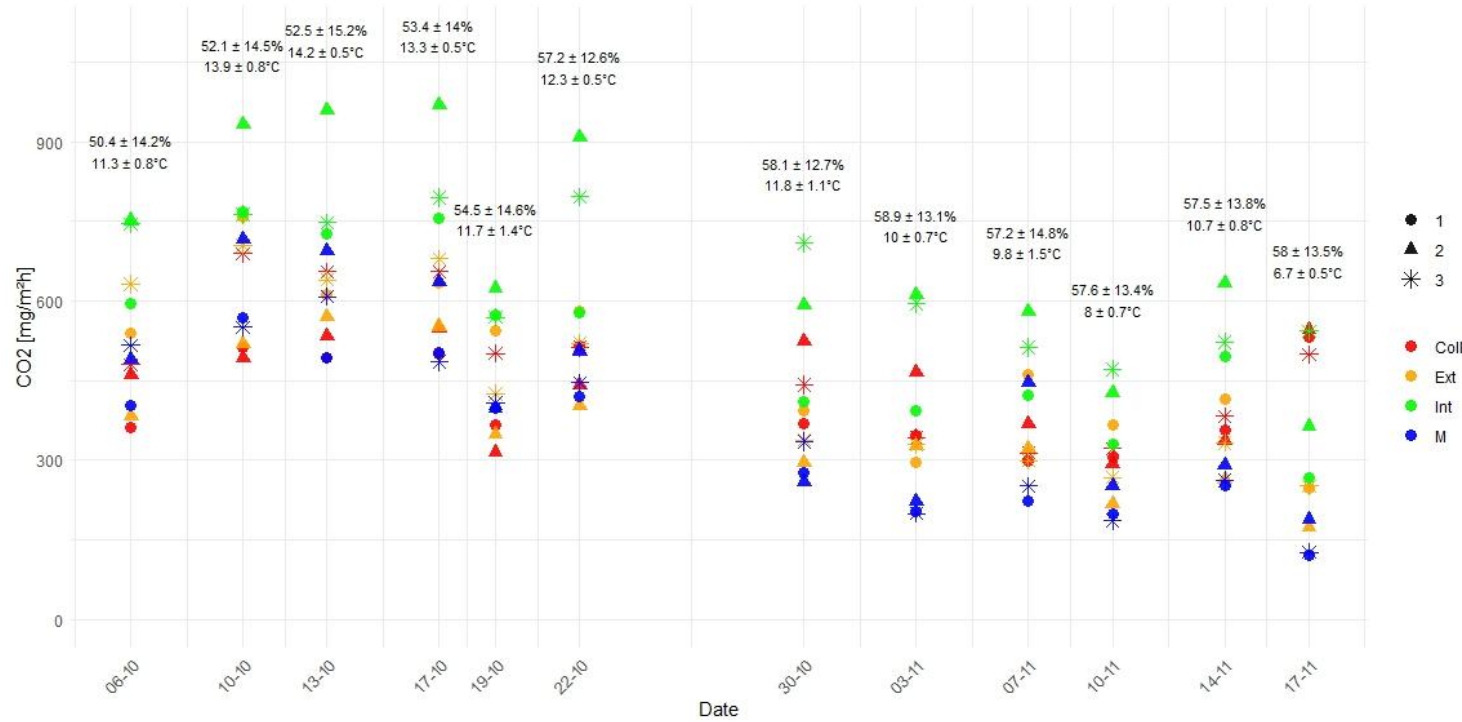


G. Graphique du stock de carbone du sol sur les 20 premiers centimètres du sol en fonction de sa teneur en carbone

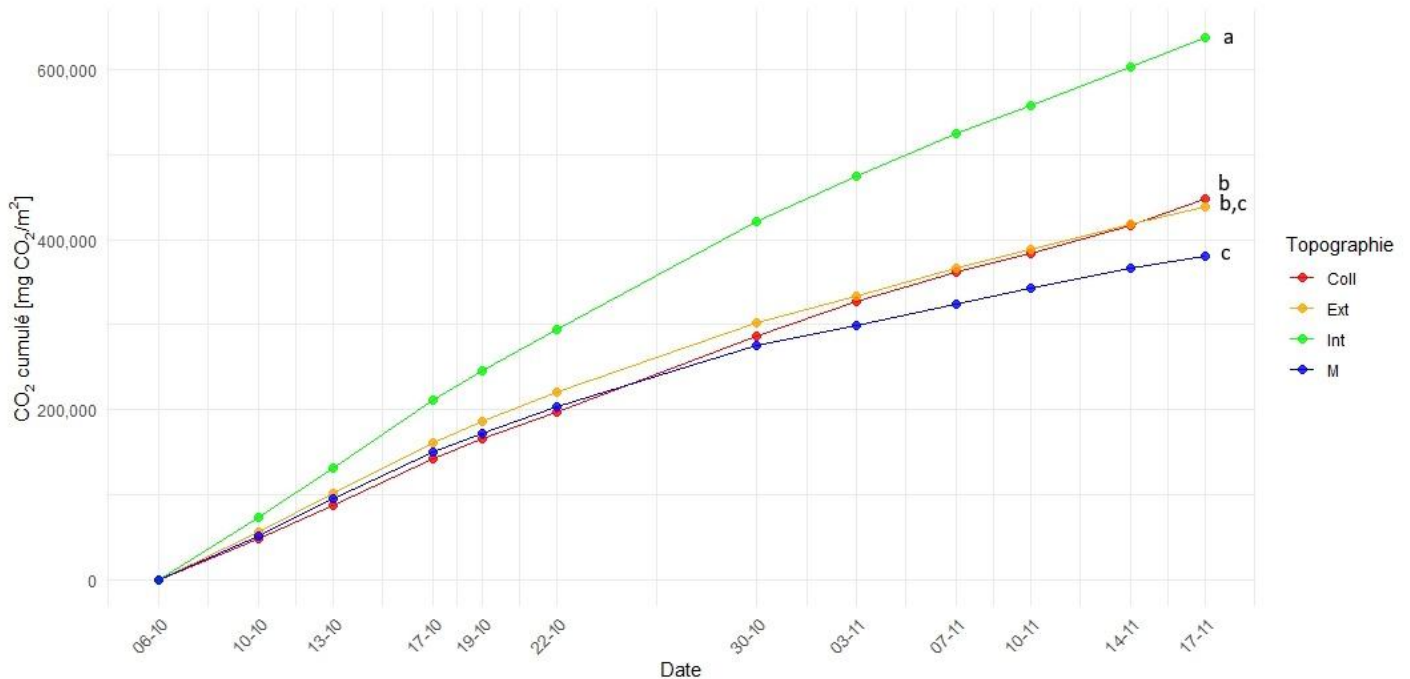


H.

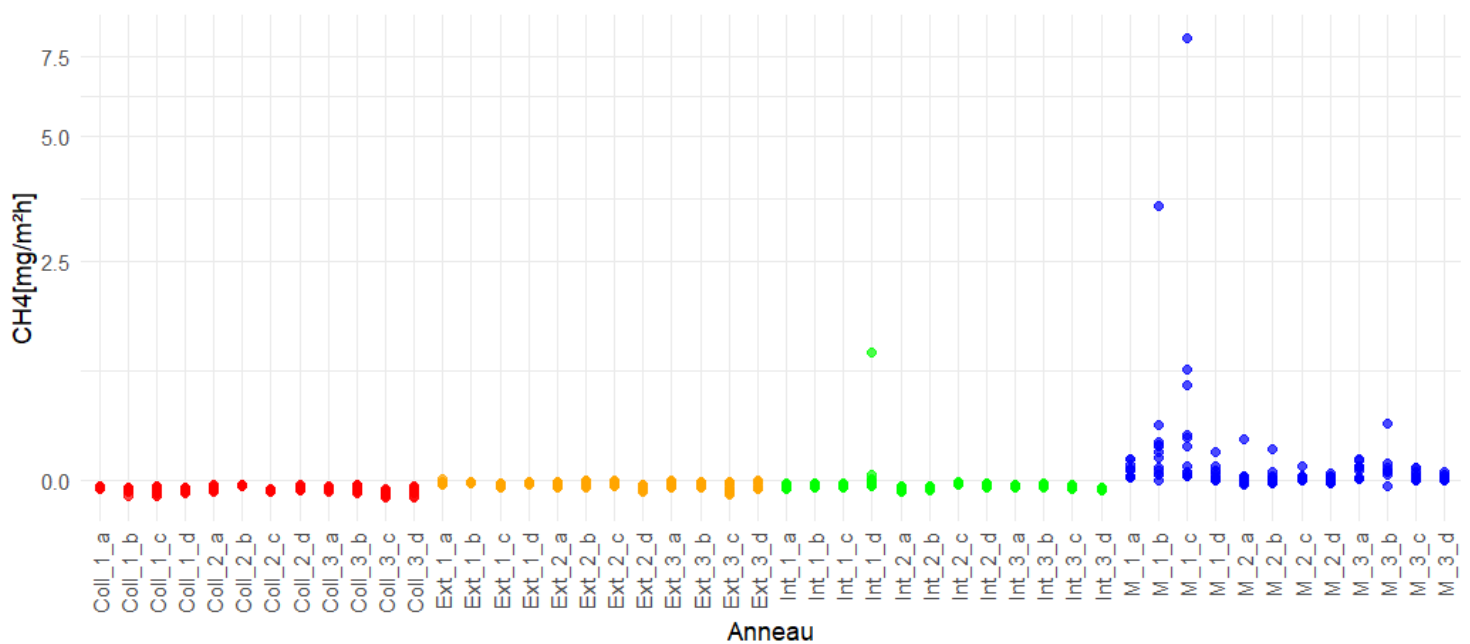
Flux surfacique moyen de CO₂ par site sur l'ensemble de la période d'étude. La température et l'humidité journalières sont présentées par la moyenne $\pm$ écart-type



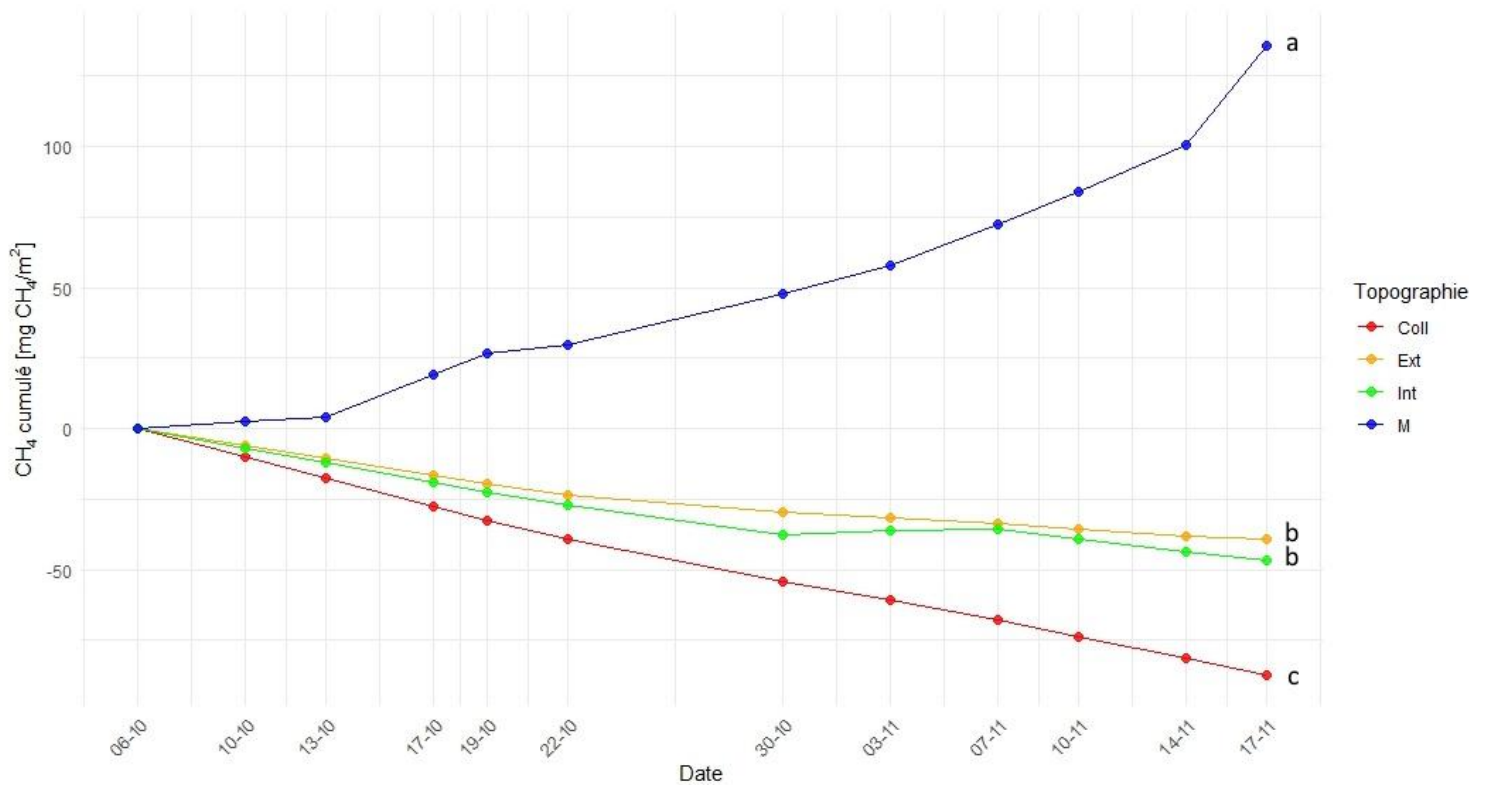
I. Flux cumulé de CO₂ sur l'ensemble de la période d'étude.
Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques (intervalle de confiance à 95 %)



J. Flux surfacique de CH₄ pour chaque anneau



K. Flux cumulé de CH₄ sur l'ensemble de la période d'étude. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques (intervalle de confiance à 95 %)



L. Flux normalisé R_s cumulé sur l'ensemble de la période d'étude en prenant en compte un SOC_{Stock} de 20 cm. . Les valeurs sont exprimées en moyenne $\pm$ écart-type. Des lettres différentes indiquent des différences significatives entre zones topographiques (intervalle de confiance à 95 %)

	Coll	Ext	Int	M
R_s [mgC/gC] 0-20 cm	15,41 $\pm$ 2,49 b	10,88 $\pm$ 1,08 c	19,89 $\pm$ 5,43 a	12,53 $\pm$ 3,98 c

