

Évaluation de l'évolution des marais calcaires à Marisque (UE 7210) et adaptation phénotypique : Différents faciès, différentes stratégies



**Adrien BERQUER, Alexandra JANCZAK,
Nicolas CARON**

Février 2025

Rapport scientifique

Rapport scientifique

D2.2 : Indicateurs biologiques

Évaluation de l'évolution des marais calcaires à Marisque et adaptation phénotypique :
Différents faciès, différentes stratégies

**Adrien BERQUER, Alexandra JANCZAK,
Nicolas CARON**

Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France, Boves, France

LIFE Anthropofens LIF18NAT/FR/000906

Citation recommandée :

Berquer A., Janczak A., Caron N., 2025. Évaluation de l'évolution des marais calcaires à Marisque et adaptation phénotypique : Différents faciès, différentes stratégies. Life Anthropofens LIF18NAT/FR/000906, Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France, Boves, 25p. + Annexes

Illustrations : Cladiaies de Marchiennes et des marais de la Souche © A. Berquer

Cette étude fait partie d'une étude globale d'évaluation des impacts des actions de restauration du projet sur les paramètres éco-hydrologiques des tourbières alcalines du projet (action D.2), qui sera publiée en 2026.

Résumé

Les cladiaies sont des habitats d'intérêt communautaire prioritaires cibles de programmes de restauration et hôtes d'une riche biodiversité faunistique. Plusieurs faciès existent cependant, où des traits morphologiques de l'espèce, mais aussi des traits liés à la communauté végétale varient. L'étude des végétations à *Cladium mariscus* sur quatre sites du Nord de la France a permis de caractériser la communauté végétale, dominée par *Cladium mariscus*, mais aussi des phénotypes distincts. Sur les sites où la végétation n'est pas rattachable au *Cladietum marisci* (Marchiennes) en raison d'une trop faible densité de Marisque, l'allocation des ressources dans la reproduction sexuée et le nombre plus important d'espèces nitrophiles laissent à penser que la population de Marisque de ces sites n'a pas atteint le stade de maturité, et semble en phase de recrutement. Des perturbations environnementales (gyrobroyage, fauche ou piétinement) créent des espaces que le Marisque est capable de recoloniser rapidement, mais laisse aussi la possibilité à d'autres espèces de s'installer. À l'inverse, sur les deux autres sites étudiés, les importantes densités de Marisque, la hauteur de végétation et l'épaisseur de litière observées dans les communautés végétales,ature l'espace disponible, rendent quasiment impossible le recrutement. Les populations de Marisque observées semblent privilégier davantage les traits liés à la survie qu'à la reproduction sexuée. Ces deux faciès de végétation, mais aussi la variabilité phénotypique des Marisques dans les différents sites, laissent présager deux stratégies différentes : L'une basée sur la dispersion et la colonisation, l'autre basée sur la survie et la compétition.

Pour leur conservation sur le long terme, ces résultats laissent entrevoir des perspectives de gestion. Les cladiaies denses semblent assez résistantes aux phénomènes d'introgression, d'autres espèces facteurs de dégradation de l'habitat, en privilégiant un mécanisme de compétition. À l'inverse, les perturbations, par les animaux, ou par la fauche, provoquent un rajeunissement constant de la végétation, favorisant la biodiversité floristique et faunistique (Hétérocères) mais ne permettant pas l'accumulation de litière pouvant être bénéfique à l'accumulation de tourbe ou à une autre partie de la faune comme les araignées. Néanmoins, ces travaux laissent entrevoir également des futures recherches sur les conséquences des enrichissements trophiques des masses d'eau susceptibles de modifier ces communautés végétales.

Abstract

Great fen-sedge (*Cladium mariscus*) habitats are priority habitats of community interest targeted by restoration programs and host to a rich faunal biodiversity. However, several facies exist, where morphological traits of the species, but also traits linked to the plant community vary. We monitored *Cladium mariscus* calcareous fen vegetation on four sites in the North of France to characterize the community but also distinct phenotypes. On sites not related to *Cladietum marisci* (Marchiennes), the lower density, the allocation of resources in sexual reproduction and the greater number of nitrophilous species suggest that the population of Great fen-sedge on these sites has not reached a mature stage and seems to be in the recruitment stage. Environmental disturbances (mowing or trampling) create spaces that Great fen-sedges can recolonize quickly by recruitment but also leave the possibility for other species to settle. Conversely, on the other two sites studied, the high density of individuals, vegetation height and litter thickness, observed in habitats not subject to such disturbances, make recruitment almost impossible, and the Great fen-sedge individuals favour traits linked to survival rather than sexual reproduction. These two vegetation facies, but also the phenotypic variability of Great fen-sedge in the different sites suggest two different strategies. One based on dispersion and colonization, whereas the other one based on survival and competition.

For long-term conservation, these results suggest improved management perspectives. Dense Great fen-sedge beds seem quite resistant to the introgression of species that are factors of habitat degradation, by favoring a competition mechanism. Conversely, disturbances, by animals, or by mowing, cause a constant rejuvenation of the vegetation, promoting floral biodiversity, but not allowing the accumulation that could be beneficial to the accumulation of peat and to arthropod diversity. Nevertheless, this work also suggests future research on the consequences of trophic enrichment of waters likely to modify these plant communities.

TABLE DES MATIERES

Résumé.....	4
Abstract.....	4
1. Introduction	7
2. Matériel & Méthodes.....	8
3. Résultats.....	10
4. Discussion.....	19
5. Remerciements	24
6. Références	24
7. Annexes.....	27

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Plan d'échantillonnage d'un transect. Le sens de déplacement est représenté du bas vers le haut, les placettes sont toujours situées à gauche du sens de déplacement.	9
Figure 2: Représentation des différentes variables mesurées sur chaque transect en 2021 et 2024. Pour chaque variable et chaque transect une comparaison de la variable a été effectuée par un test de Student avec *** : p-value < 0.001, ** : p-value < 0.01, * : p-value < 0.05. L'absence de signe indique une différence non-significative.	11
Figure 3 (2/2).....	13
Figure 4: Représentation graphique des modèles entre moyenne et écart-type de la hauteur de végétation, moyenne et écart-type de l'épaisseur de litière, et densité d'individus avec l'état de conservation estimé.	14
Figure 5: Représentation des relations entre indices d'engorgement (He, haut) et de trophie (Ht, bas) en fonction de la diversité floristique (gauche) et de l'hétérogénéité de la végétation (droite)	15
Figure 6: Précipitations quotidiennes sur les stations les plus proches des sites d'études, entre 2018 et 2024.....	16
Figure 7: Représentation graphique de la côte piézométrique de la nappe souterraine susceptible d'alimenter les sites d'études. A droite, la représentation utilise les mêmes données, centrées réduites	18
Figure 8: Concentrations en nitrates relevées dans les nappes souterraines à proximité des sites d'étude.....	19
Figure 9: Concentrations en ions Hydrogénocarbonates relevées dans les nappes souterraines à proximité des sites d'étude	19

1. Introduction

L'habitat « Marais calcaires à *Cladium mariscus* et espèces du *Caricion davallianae* » (7210*) est un habitat d'intérêt communautaire prioritaire, reconnu à l'échelle européenne et faisant l'objet de gestion conservatoire ou de programme de restauration. Le drainage des zones humides, en particulier des tourbières en Europe a conduit à la régression récente de cet habitat. Dans le Nord-Ouest de l'Europe, les tourbières ont principalement été drainées pour la fourniture d'énergie et de surfaces agricoles ce qui a contribué à leur dégradation. Cet habitat et les espèces qui le composent sont qualifiées de turfigènes, c'est-à-dire qu'ils sont susceptibles d'être les principaux constituants des tourbes lorsque les restes végétaux s'accumulent dans une tourbière où les processus de dégradation sont entravés par l'engorgement. Au cours de l'histoire, les cladiaies apparaissent dans les tourbières assez récemment, aux alentours de 2000 ans avant le présent (Garcia et al., 2024). Les macro-restes retrouvés dans les tourbes des grandes vallées tourbeuses témoignent de la forte présence de *Cladium mariscus* dans les tourbières. Des datations ont permis d'identifier qu'à cette époque, les premiers dysfonctionnements hydrologiques permettant un usage agricole des tourbières ont commencé. Ainsi, il est probable que les perturbations de cette époque aient induit des changements dans le fonctionnement des tourbières et donc de leurs végétations.

Aujourd'hui, si le Marisque est retrouvé dans de nombreux territoires européens, l'habitat de marais calcaires à *Cladium mariscus*, est lui beaucoup plus rare et souvent dans des états de conservation qui ne permettent pas son rattachement à l'habitat tel que défini *stricto sensu* par Bensettiti et al. (2002). Des projets de restauration ont alors été initiés dans le but d'augmenter leurs surfaces et d'améliorer leur état de conservation. Le LIFE Anthropofens est un exemple de projet dont l'objectif est de restaurer cet habitat sur quatre sites Natura 2000, permettant la conservation de la riche biodiversité qu'ils accueillent (Garnier & Darinot, 2013). La pérennité de ces habitats dépend des différents facteurs influençant le fonctionnement des tourbières alcalines. La présence d'une eau calcaire, souvent issue d'émergences de nappes souterraines calcaires est un premier facteur favorisant l'expression de l'habitat. Le manque d'alimentation par de l'eau alcaline peut, sur un temps plus ou moins long (de quelques décennies à quelques siècles), être tamponné par la dissolution du calcaire ayant pu précipiter, par le passé, dans les tourbes, baignées par les eaux de la nappe de surface. Une diminution de la pression des nappes souterraines exercée vers la surface du sol est donc d'une importance particulière pour la conservation de cet habitat, d'autant plus si la capacité tampon de la tourbe est réduite. La qualité d'eau repose également sur les nutriments disponibles dans l'eau alimentant les cladiaies. La présence de nutriments peut dans un premier temps favoriser la croissance de la végétation, y compris des Marisques. Cependant, il est probable qu'un enrichissement trophique de l'eau de surface provoque l'apparition et la sélection d'espèces nitrophiles dans la communauté de l'habitat. Ces espèces nitrophiles sont souvent beaucoup plus courantes et, non typiques de l'habitat, provoquent une altération de l'état de conservation du marais calcaire à Marisque, voire la régression de cet habitat au profit de mégaphorbiaies, dans le cas d'un assèchement conjugué. La principale source de nutriments est l'eau souterraine. En effet, celle-ci est souvent alimentée par des infiltrations d'eau issues de précipitations en surface. Cette eau, dans des régions agricoles particulièrement intensives, comme les Hauts-de-France, transporte alors les nutriments vers les tourbières à travers les nappes souterraines, ou directement par ruissellement. D'autres nutriments d'origine anthropique peuvent également être importés dans le cas de systèmes d'assainissement défaillants ou inexistant, ou encore par la déposition azotée atmosphérique (Vivanco et al., 2018). La présence de nutriments dans la nappe de la tourbe, en plus d'altérer les communautés végétales, induit également le métabolisme de bactéries capables de réduire certaines molécules donneuses d'oxygène et d'électrons (nitrates, nitrites, phosphates, sulfates, etc.). Celles-ci peuvent alors s'alimenter avec le carbone disponible, c'est-à-dire la tourbe, et participer à sa minéralisation, tout en relarguant des gaz à effet de serre, comme le méthane (CH₄).

La quantité d'eau dans les tourbières alcalines, support de l'habitat « Marais calcaires à *Cladium mariscus* et espèces du *Caricion davallianae* » est également primordiale. Des assèchs prolongés et répétés de la tourbe induisent des phénomènes de dégradation, cette fois aérobies, en apportant de l'oxygène atmosphérique aux bactéries du sol, qui participent à la minéralisation la tourbe en relarguant d'importantes quantités de dioxyde de carbone et de protoxyde d'azote (Fenner & Freeman, 2011). La minéralisation de la tourbe, quel que soit le processus, induit une augmentation de la concentration de composés remobilisables, favorables à la croissance des plantes à fort métabolisme, comme les plantes nitrophiles.

La présente étude porte donc sur les habitats de marais calcaires à Marisque, faisant l'objet de travaux de restauration dans le cadre du projet LIFE Anthropofens (LIFE18NAT/FR/000906), d'une emprise de 480 ha sur quatre sites Natura 2000 en France et en Belgique. L'objectif de l'étude est de comprendre la dynamique des populations, d'identifier les facteurs de pression présents sur les sites, et d'évaluer leur influence, ainsi que celle d'actions de restauration entreprises. Dans un premier temps, le but de l'étude est de déterminer la dynamique et la vigueur des populations de Marisque présentes sur le site, par des mesures morphométriques. Dans un second temps, nous présentons les caractéristiques de la communauté observée sur les sites afin de déterminer l'état de conservation de l'habitat et son évolution. Dans un troisième temps, nous discuterons des potentiels facteurs d'influence agissant sur les variables précédemment identifiées.

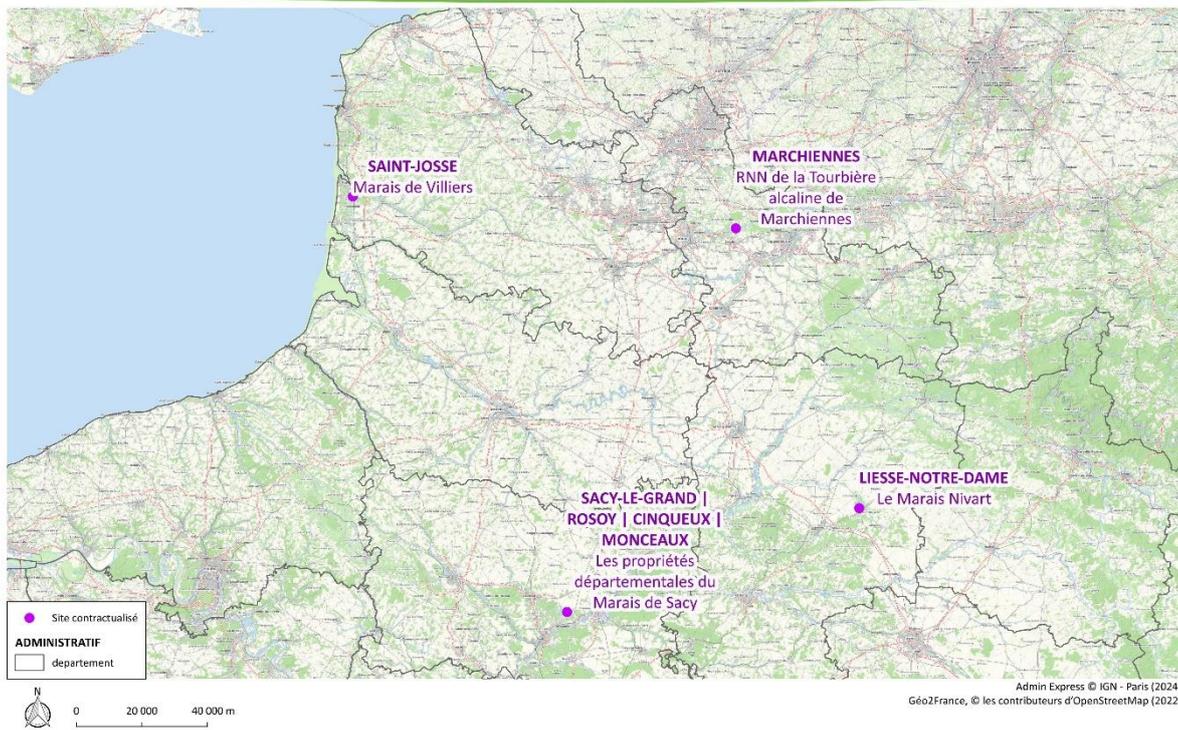
2. Matériel & Méthodes

Quatre sites du Nord de la France (Hauts-de-France) sont identifiés pour accueillir ce suivi (Tableau 1, Carte 1). Les sites sont soumis à des influences bioclimatiques légèrement différentes, mais représentatives du climat régional. Les sites sont en effet orientés sur un gradient de continentalité vers l'Est, avec des températures plus douces et des précipitations plus fortes (850 mm annuels) à l'ouest, à proximité des côtes de la Manche orientale et des variations de température plus importantes et des précipitations moins fortes vers l'Est (650 mm annuels). Les sites sont tous alimentés par des émergences d'eau souterraine alcaline, bien qu'appartenant à des âges géologiques différents (craie du Crétacé, sables et calcaires Tertiaire). Ces tourbières se sont toutes constituées à partir du début de l'Holocène, hormis Villiers qui résulte des régressions quaternaires successives typiques des tourbières arrière-littorales et de la poldérisation de ce secteur.

L'échantillonnage consiste en deux passages, espacés de trois ans, en août 2021 et 2024. Deux transects par site ont été sélectionnés de manière à se trouver dans des cladiaies homogènes de chaque site. Chaque transect est délimité par deux points fixes le long desquels trois placettes de 4 m² (2 × 2 m) sont délimitées. Dans chaque placette de 4m², un relevé botanique est effectué, un comptage du nombre d'individus en fleurs de l'année et de l'année précédente (tiges sèches), les pourcentages de la surface subissant du piétinement et de sol nu, la hauteur des tiges fleuries et la longueur de la plus longue feuille de 10 individus, ainsi que le niveau d'eau apparent. Les épaisseurs de litière et la hauteur de végétation sont mesurées à l'aide d'une baguette de bambou graduée. Deux sous placettes sont situées aux diagonales de la placette dont la première est adjacente au piquet délimitant le transect, selon la Figure 1. Sur ces sous-placettes de 0.25m² (0.5 × 0.5 m), nous avons recensé le nombre d'individus vivants.

Tableau 1: Sites échantillonnés, abréviations utilisées par transect et faciès de la végétation observée

Site (Code Natura 2000)	Transect	Faciès de la cladiaie
Marais de Sacy (FR2200378)	SACY1	<i>Cladiaie pure, petite taille</i>
	SACY2	<i>Cladiaie pure de plus grande taille</i>
Marais de Villiers (FR3110083)	VIL1	<i>Cladiaie jeune et fauchée</i>
	VIL2	
Tourbière de Marchiennes (FR3100507)	MAR1	<i>Mélange de Cladium et de Roselière à Phragmite et Fougère des marais</i>
	MAR2	
Marais Nivart (Souche) (FR2200390)	SOUCH1	<i>Cladiaie pure, petite taille</i>
	SOUCH2	



Base NTC la plus proche du centre de la carte : UTMAL

Réalisation : Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France - Adrien BERQUIER - 22/02/2025

Carte 1: Localisation des sites de l'étude dans le Nord de la France

-  **Placettes de 2m*2m** : relevé végétation / Nb tiges fleuries (n et n-1) / Hauteur tiges fleuries (x10 max) / Longueurs des feuilles (x10)
-  **Placettes de 0,5m*0,5m** : Nb « d'individus vivants » (nombre de tige, fleurie ou non)
-  **9 points de mesure par placette** : Epaisseur de litière (x9) / Hauteur végétation (x9)

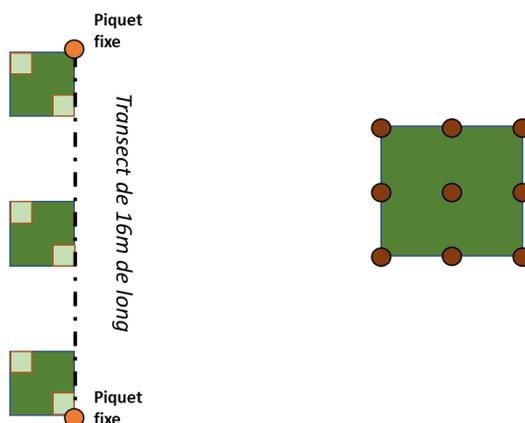


Figure 1: Plan d'échantillonnage d'un transect. Le sens de déplacement est représenté du bas vers le haut, les placettes sont toujours situées à gauche du sens de déplacement.

Afin d'identifier les différences entre les mesures réalisées aux mêmes emplacements en août 2021 et en août 2024, des tests de Student pour échantillons appariés sont utilisés.

Les relations entre état de conservation et morphologie sont étudiées à l'échelle du transect, l'état de conservation étant estimé à cette échelle. Les moyennes et écart-types par quadrat sont donc utilisés pour étudier les corrélations entre les mesures morphométriques des Marisques et l'état de conservation. L'état de conservation est évalué à partir d'un système de notation (note sur 100) élaboré à dire d'experts par le Conservatoire Botanique National de Bailleul à partir de l'observation de facteurs dégradants de la communauté comme le recouvrement en espèces ligneuses, prairiales, nitrophiles, exotiques envahissantes, ou de la placette comme le piétinement et le niveau d'eau apparent (Figure S1 ; Villejoubert et al., 2021). Les relevés où la note est la plus élevée (proche de 100) sont ceux considérés en meilleur état de conservation. Par des tests de corrélation (modèles linéaires univariés), nous présentons l'effet du nombre d'espèces végétales relevées, de l'état de conservation et des indices d'engorgement et de trophie par un calcul de CWM (*Community Weighted Mean* : Somme des valeurs numériques d'un trait fonctionnel pondérées par l'abondance de chaque espèce dans la communauté) des indices de Landolt (1977) pour l'engorgement et la trophie, à l'échelle de la surface observée sur le transect.

Les données météorologiques sont issues du portail Météo-France, où nous avons sélectionné les stations météorologiques de Gizy (poste n° 02346001) pour quantifier les précipitations des marais de la Souche, de Valenciennes (poste n° 59606004) pour la tourbière de Marchiennes, de Breuil-le-Vert (poste n°60107001) pour les marais de Sacy, et Le-Touquet (poste n°62826001) pour le marais de Villiers. La somme des précipitations quotidiennes entre 2018 et 2024 sont extraites et utilisées de manière à couvrir les trois années précédant chaque session de relevés.

Les arrivées d'eau souterraine sur les sites sont estimées à partir de piézomètres mesurant la côte dans la nappe d'alimentation de la tourbière. Le piézomètre BSS003VWHI de Wailly-Beaucamps, forage dans la craie du Séno-Turonien du bassin versant de la Canche et de l'Authie, représente la côte de la nappe souterraine alimentant le marais de Villiers (Vinchon et al., 2000); le piézomètre BSS004LJKU de Beuvry-la-Forêt, forage mesurant la côte de la nappe des sables, probablement les sables Thanétiens pour Marchiennes (Duranel, 2024); le piézomètre BSS000FWWK de Samoussy mesurant la nappe de la craie de Thiérache-Laonnois-Porcien, alimentant les marais de la Souche (Sajaloli, 1994); et le piézomètre BSS000HAUH de la craie picarde, à Sacy-le-Grand pour les marais de Sacy, bien que l'alimentation par cette nappe ne soit que partielle et à défaut de piézomètre installé dans d'autres nappes en rive droite de l'Oise, notamment dans les sables thanétiens alimentant la zone d'étude (Pencoat-Jones & Berquer, 2024).

Plusieurs ouvrages disposent de données de qualité d'eau à proximité des sites d'étude. Nous récoltons les données sur Sacy dans les ouvrages BSS000GZFU (Forage Labruyère dans la craie), BSS000GYXL (Puits La bruyère), BSS000GZFV (Forage Labruyère) ; aux marais de la Souche sur BSS000FXBB (Forage Pierrepont), BSS000FWYD (Puits Pierrepont) BSS000FWZF (Forage Gizy) ; à Marchiennes sur BSS000CFNN (Forage Marchiennes), BSS000CBYN (Forage Genech), BSS000CEQS (Forage Orchies) ; et à Villiers sur le BSS000BPVD (Forage St Aubin). Les données piézométriques et de qualité des eaux souterraines sont en libre accès sur le portail ADES du BRGM.

Des modèles inférentiels d'effets environnementaux sur les différentes variables réponses sont effectués via une sélection de variables sur le package MuMIn (Bartoń, 2024) avec des modèles linéaires généralisés et des tests de Student ou de Wilcoxon pour tester des différences de variables entre échantillons. Toutes les analyses statistiques sont effectuées sur R, v.4.4.1 (R Core Team, 2024). Les représentations graphiques sont réalisées grâce au package ggplot2 (Wickham, 2016).

3. Résultats

L'intégralité des placettes a pu être relevée dans les deux passages, en août 2021 puis en août 2024 (Figure 2).

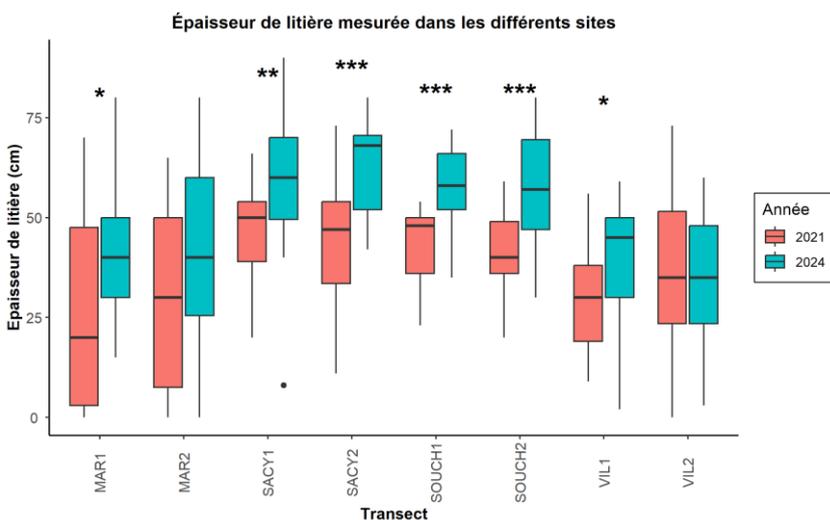
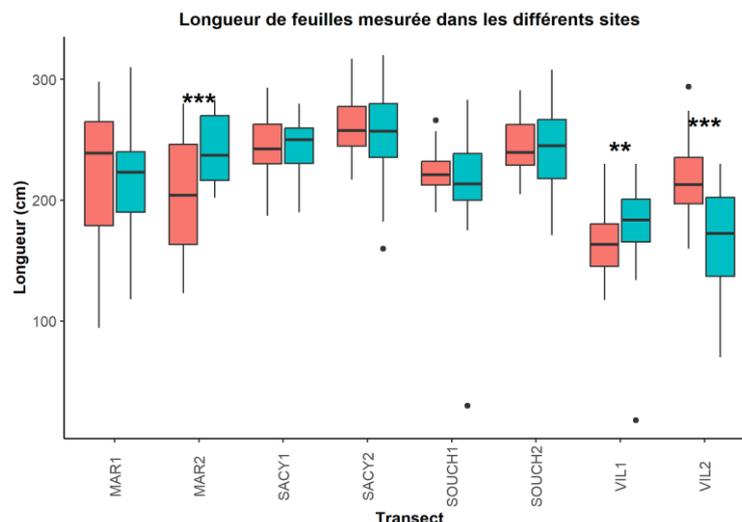
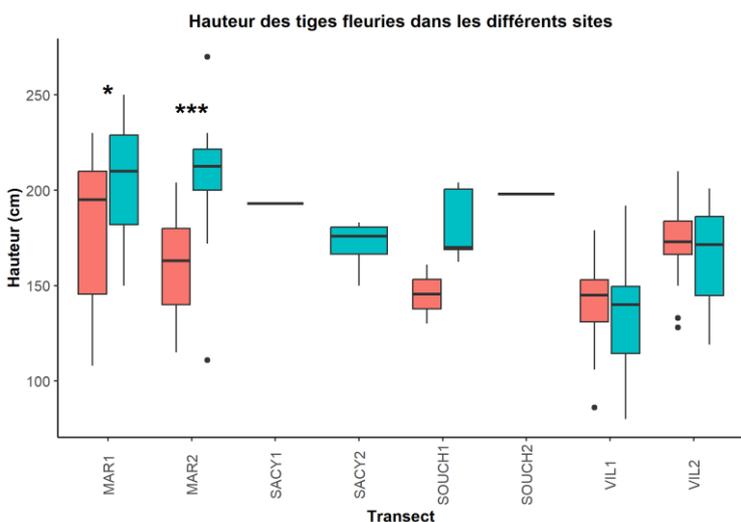
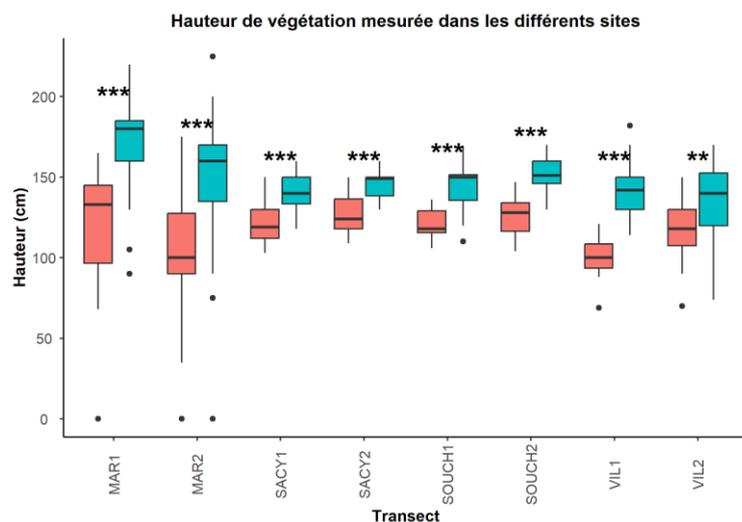
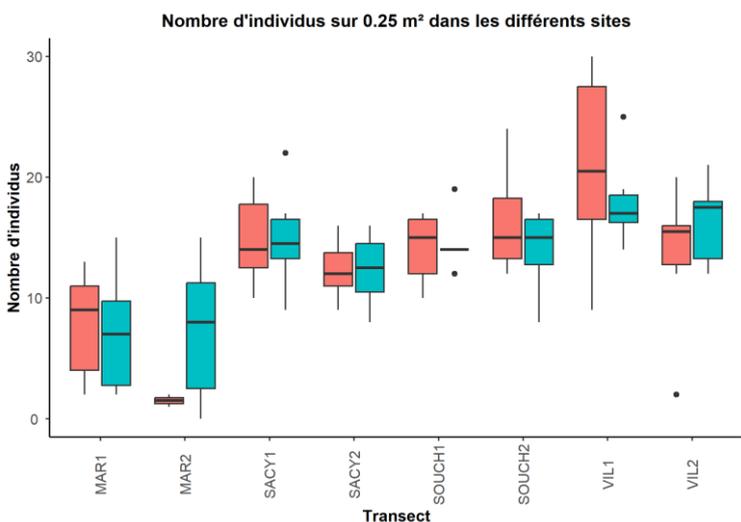


Figure 2: Représentation des différentes variables mesurées sur chaque transect en 2021 et 2024. Pour chaque variable et chaque transect une comparaison de la variable a été effectuée par un test de Student avec *** : p-value < 0.001, ** : p-value < 0.01, * : p-value < 0.05. L'absence de signe indique une différence non-significative.

Le nombre d'individus recensés sur les placettes ne varie pas significativement entre 2021 et 2024, mais est significativement moins important (27.4 m⁻²) à Marchiennes relativement aux autres sites (60.7 m⁻² ; t = -6.67, df= 28.6,

$p < 0.001$). Les hauteurs de végétation sont plutôt homogènes entre les sites, bien que la hauteur soit pour chaque site, et même chaque transect, plus importante en 2024 par rapport à 2021. La hauteur des tiges fleuries est peu représentative car celles-ci sont en nombre insuffisant pour procéder au test statistique à Sacy et à la Souche. En revanche, à Marchiennes, leur hauteur augmente significativement entre 2021 et 2024, alors que ce n'est pas le cas au marais de Villiers. Les longueurs de feuilles sont très homogènes et élevées aux marais de Sacy et de la Souche. À Marchiennes, les longueurs sont très variables avec une augmentation significative uniquement pour le transect MAR2. Les longueurs de feuilles à Villiers varient entre les deux années mais pas dans le même sens : elles augmentent pour VIL1 mais diminuent pour VIL2.

En revanche, les longueurs de feuilles du site de Villiers (181.6 cm) sont significativement moins importantes que celles des autres sites (234.1 cm ; $t = -12.32$, $df = 200$, $p < 0.001$). Les épaisseurs de litière relevées sont les plus élevées sur les sites de la Souche et de Sacy. Sur ces deux sites, et sur chaque transect, les épaisseurs sont plus importantes en 2024 qu'en 2021, ce qui n'est vrai que sur un des deux transects de Marchiennes ou de Villiers. Sur ces sites, les épaisseurs mesurées (34.5 cm) sont significativement inférieures ($t = -9.91$, $df = 403$, $p < 0.001$) aux deux autres sites (51.3 cm).

Sur la base de ces résultats, nous avons effectué des tests de corrélation entre différentes variables et l'épaisseur de litière, par des modèles linéaires univariés (Figure 3) en discriminant, ou non, par année de relève. Le nombre d'individus par placette n'est corrélé ni à la longueur des feuilles des individus de la placette, ni à l'épaisseur de litière. Cependant, nous observons une corrélation négative significative entre le nombre de tiges fleuries en 2024 (-0.55 ; $t = -2.30$; $R^2_{ajusté} = 0.16$; $p = 0.03$) et le nombre d'individus. Lorsque l'épaisseur de litière augmente, le nombre de tiges fleuries diminue significativement (-0.17 ; $t = -2.79$, $R^2_{ajusté} = 0.13$, $p = 0.007$), alors que la hauteur de végétation (0.65 ; $t = 9.98$; $R^2_{ajusté} = 0.19$; $p < 0.001$) et la longueur des feuilles (0.91 ; $t = 8.49$; $R^2_{ajusté} = 0.14$; $p < 0.001$) augmentent significativement. Enfin, la hauteur de végétation mesurée est positivement corrélée à la longueur des feuilles de Marisque (0.49 ; $t = 6.43$; $R^2_{ajusté} = 0.09$; $p < 0.001$).

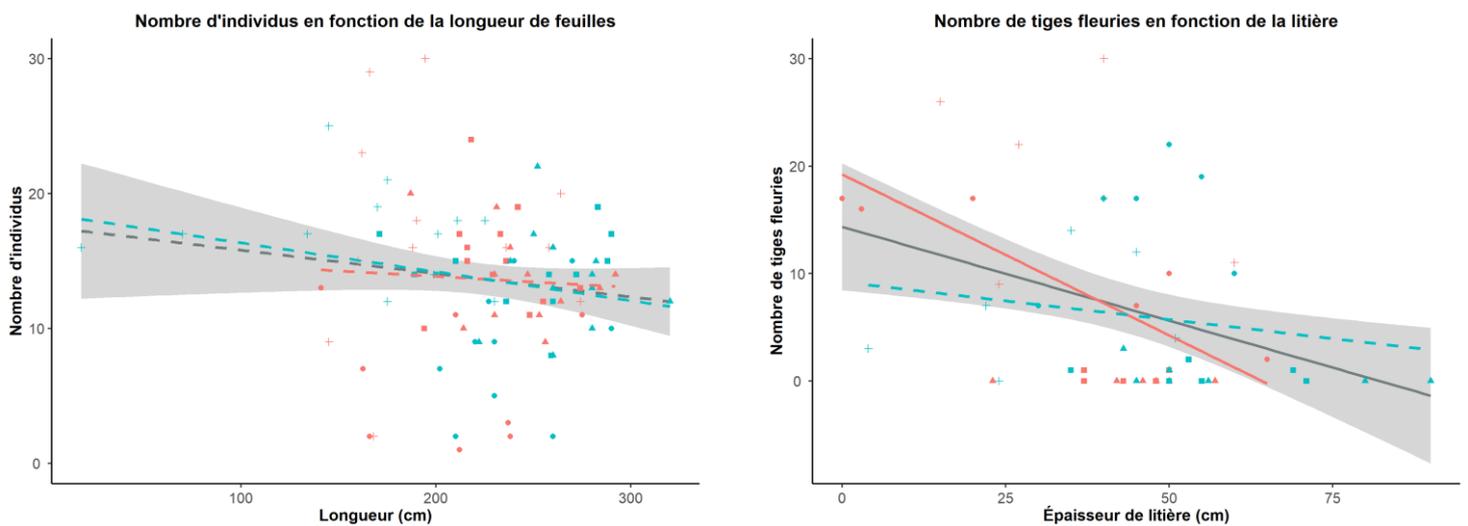


Figure 3 (1/2): Représentation des relations entre variables d'intérêt. Les modèles linéaires ont été réalisés en 2021 (rose), en 2024 (bleu), ou sur les deux années confondues (gris, avec écarts-type). Les traits pleins représentent des relations significatives ($p < 0.05$), et les pointillés des relations non significatives.

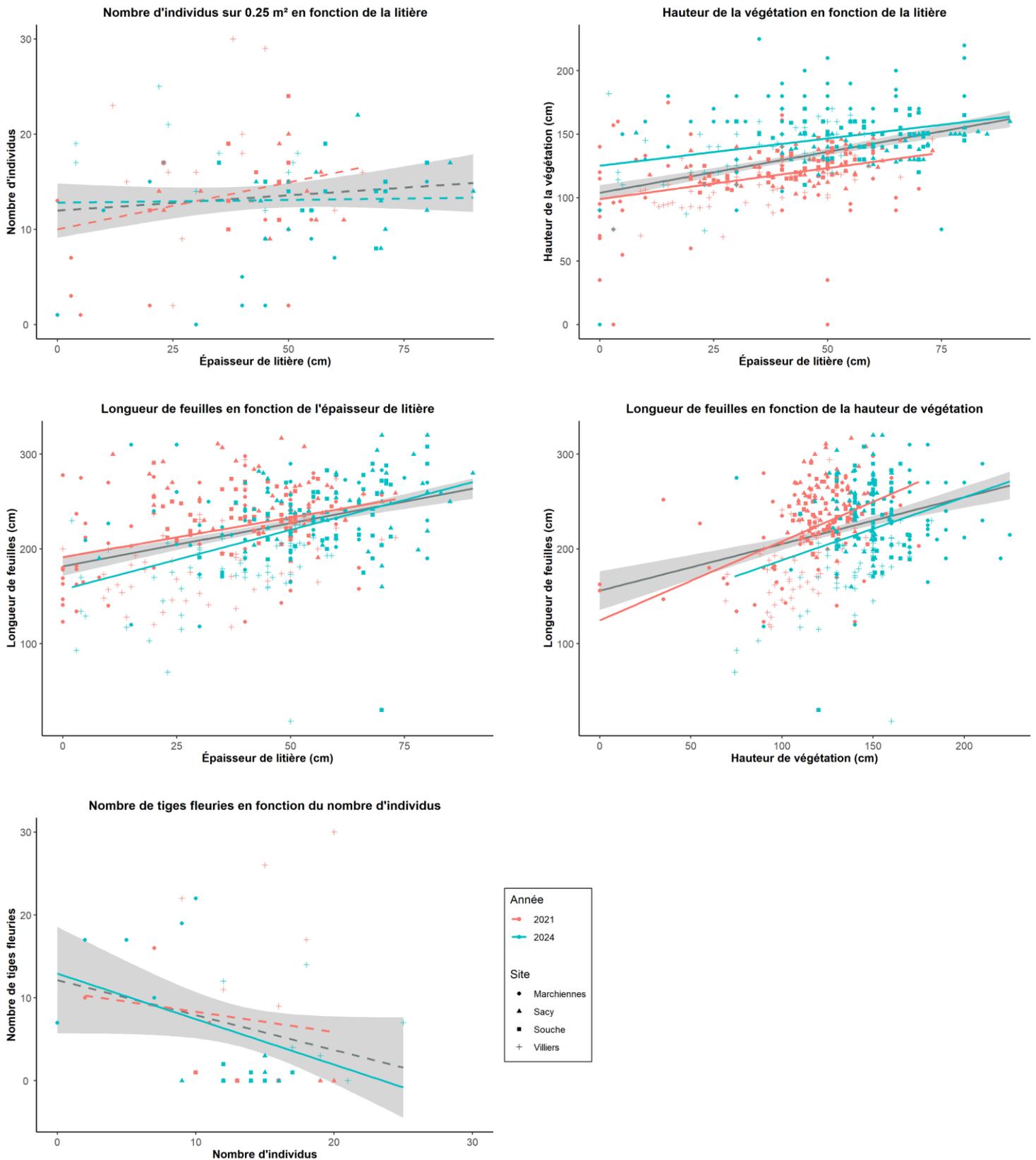


Figure 3 (2/2)

L'état de conservation a ensuite été estimé sur la base de chaque transect, soit les 3 placettes de 4 m², totalisant 12 m². Il est distribué entre des valeurs de 80 et 85 sur une note de 100 au transect MARC2, alors qu'il atteint la note de 100 sur VIL 1 et SACY2, en 2024. Nous avons modélisé l'état de conservation par les différentes variables ayant trait à la morphologie (Moyenne et écart-type de l'épaisseur de litière, Hauteur moyenne des tiges, Hauteur et écart-type

de la hauteur de végétation, Moyenne et écart-type de la longueur de feuilles, Moyenne du nombre de tiges et biodiversité végétale du transect).

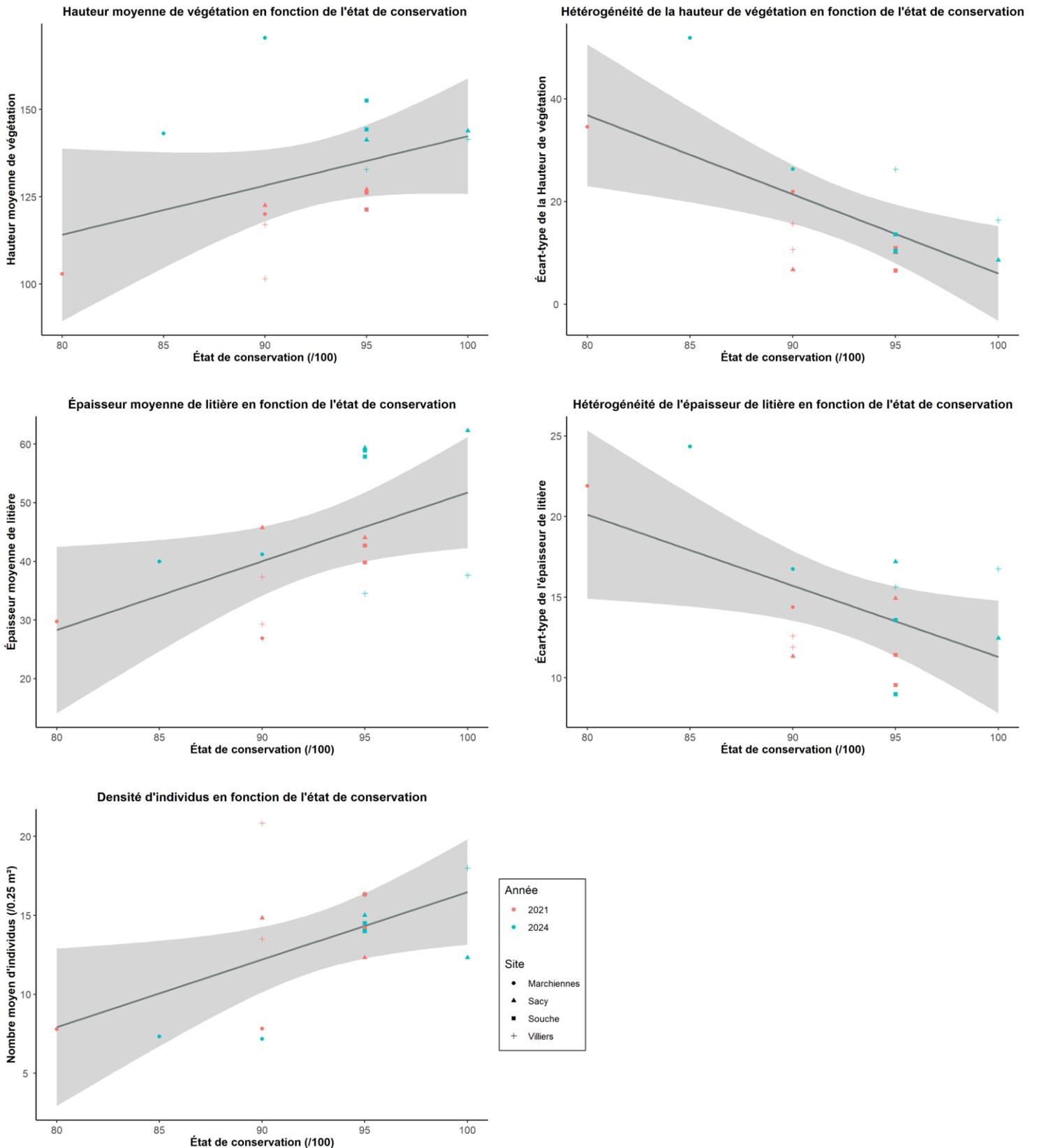


Figure 4: Représentation graphique des modèles entre moyenne et écart-type de la hauteur de végétation, moyenne et écart-type de l'épaisseur de litière, et densité d'individus avec l'état de conservation estimé.

Le nombre important de variables, et la corrélation entre certaines d'entre elles nous conduit à effectuer une sélection de modèle par la fonction dredge du package MuMIn, sur la base de l'AICc. Le meilleur modèle retenu est celui

modélisant l'état de conservation par la moyenne et l'écart-type de la hauteur de végétation (Figure 4). Par ailleurs, la hauteur moyenne de végétation est corrélée à l'épaisseur moyenne de litière ($r = 0.59, p = 0.017$) et l'écart-type de la hauteur de végétation corrélée positivement à l'écart-type de l'épaisseur de litière ($r = 0.84, p < 0.001$), et négativement à la densité d'individus ($\rho = -0.63, p = 0.009$), effet également détecté sur les données brutes (Figure 3). L'épaisseur moyenne de litière et la hauteur moyenne de la végétation augmente avec l'état de conservation alors que l'hétérogénéité (écart-type) de ces deux variables diminue avec l'état de conservation. La densité d'individus augmente avec l'état de conservation (Figure 4).

Nous procédons à la même analyse pour les indices d'engorgement (He) et de trophie (Ht), dont les valeurs indiquent que la communauté est, comme attendue, représentative d'un milieu fortement engorgé et de faible charge trophique. Un test de Wilcoxon pour échantillons appariés nous indique que les valeurs d'engorgement (He) sont significativement plus importantes ($V = 0, p = 0.022$), et les valeurs de trophie (Ht) moins importantes ($V = 27, p = 0.035$) en 2024 qu'en 2021. Les sélections de modèles nous permettent de retenir les mêmes variables pour chaque modèle : l'écart-type de la hauteur de végétation et le nombre d'espèces dans les modèles les plus parcimonieux ($AICc = 22.8, df = 4$; vs $AICc = 22.5, df = 5$ pour le modèle He à $AICc$ le plus faible et $AICc = 27.8, df = 4$ vs $AICc = 26.0, df = 6$ et $AICc = 26.8$ et $df = 5$ pour les modèles Ht aux AIC les plus faibles; $\Delta_{AICc} < 2$). Les équations retenues par modèle linéaire sont $He = 0.0015 Hveg_{sd} - 0.011 Nsp + 5.00$ ($R^2_{adj} = 0.85$) et $Ht = -0.002 Hveg_{sd} + 0.023 Nsp + 1.97$ ($R^2_{adj} = 0.77$)

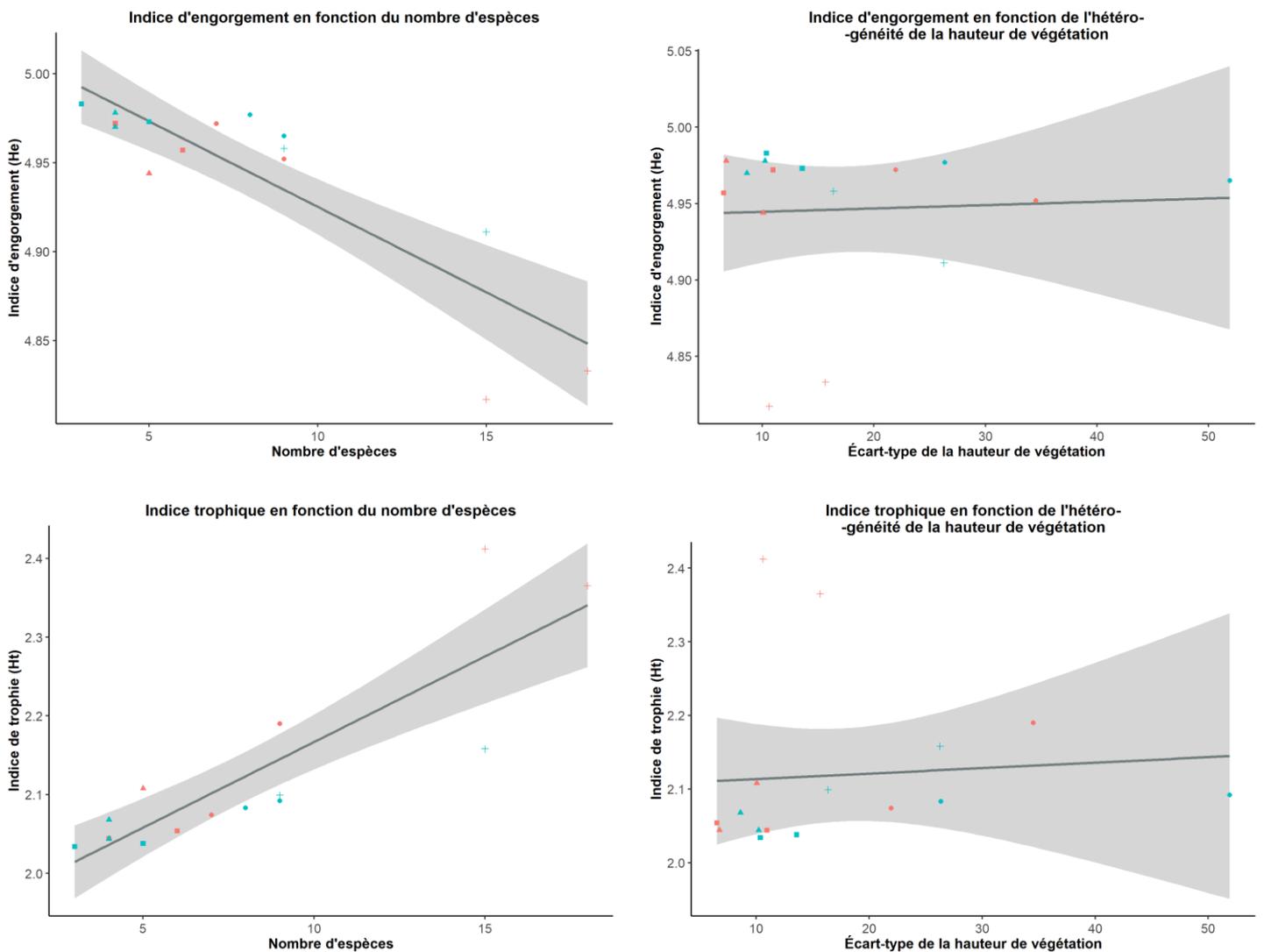


Figure 5: Représentation des relations entre indices d'engorgement (He, haut) et de trophie (Ht, bas) en fonction de la diversité floristique (gauche) et de l'hétérogénéité de la végétation (droite)

Le coefficient le plus important est attribué à la variable nombre d'espèces, négatif pour l'indice d'engorgement He mais positif pour l'indice trophique Ht. Bien que retenus par les modèles, les coefficients de l'écart-type de la hauteur de végétation sont relativement faibles, mais positifs dans les deux cas (Figure 5).

Précipitations quotidiennes des sites

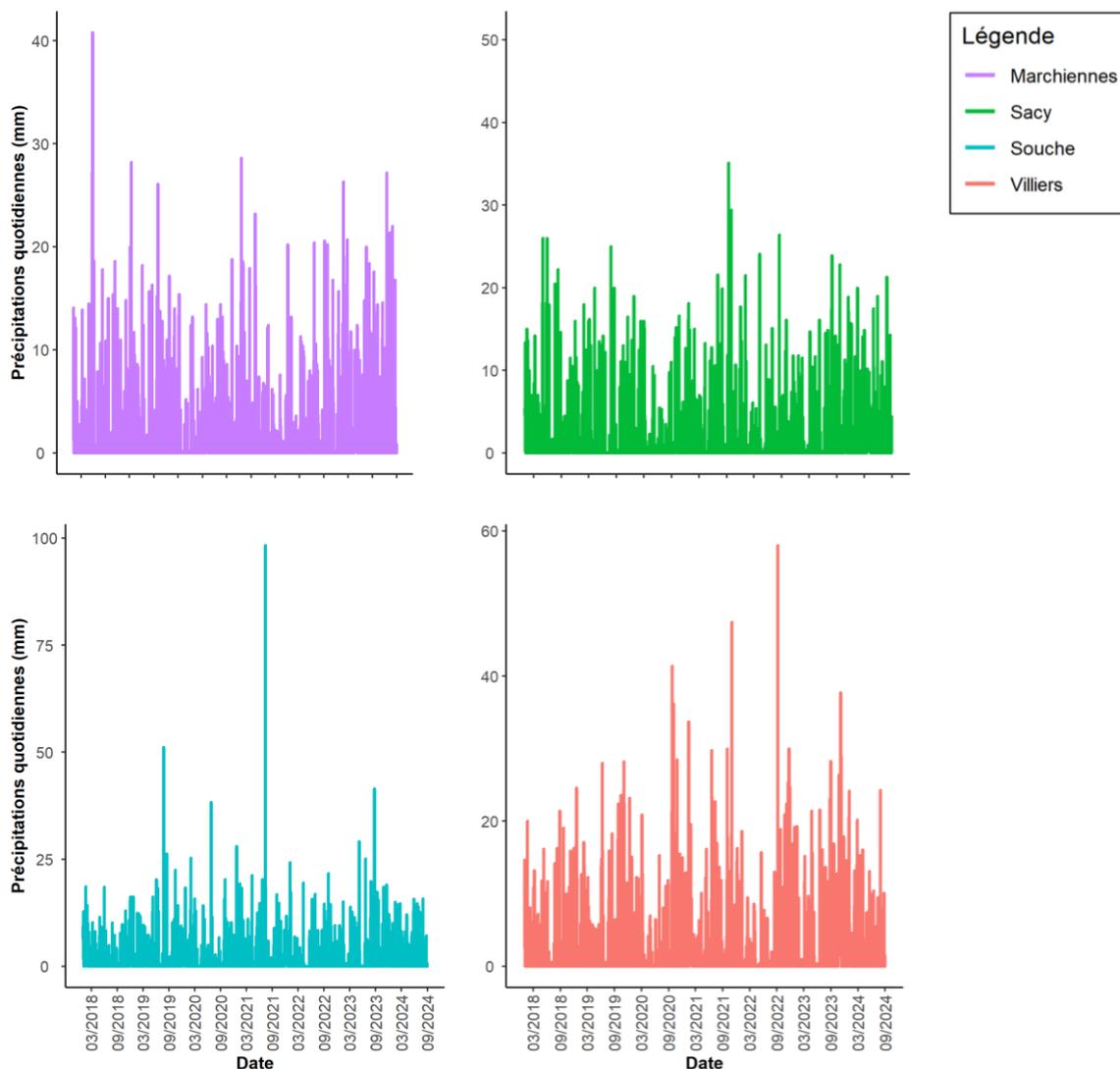


Figure 6: Précipitations quotidiennes sur les stations les plus proches des sites d'études, entre 2018 et 2024.

Les paramètres environnementaux permettent d'estimer les caractéristiques des précipitations reçues par chaque site, ainsi que les différences entre sites et entre saisons (Figure 6, Tableau 2).

Tableau 2: Moyenne et écart-type des précipitations quotidiennes par site et par pas de temps. Les statistiques associées testent les différences dans les valeurs des trois années précédant chaque relevé. Aucune différence n'est significative (test de Student).

Site	Total		≤ Août 2021		> Août 2021		T test	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	t	p
Marchiennes	1.89	3.82	1.79	3.79	1.99	3.85	1.317	0.188
Sacy	1.95	4.11	1.88	3.82	2.03	4.40	0.934	0.350
Souche	2.04	4.60	2.09	4.94	2.00	4.20	-0.487	0.626
Villiers	2.54	5.12	2.37	4.69	2.71	5.55	1.692	0.091

Aucune différence significative dans les quantités de précipitations reçues par les sites trois années avant chaque relevé n'est détectée. Par des comparaisons deux à deux entre les sites, nous ne détectons aucune différence dans la quantité de précipitation reçue par les sites de Marchiennes, de Sacy et de la Souche. En revanche, Villiers reçoit significativement plus de précipitations que chacun de ces trois sites (Tableau 3).

Tableau 3: Comparaison entre sites de la quantité de précipitation quotidienne reçue.

Sites testés	Valeur t	Valeur p
Marchiennes-Sacy	-0.577	0.564
Marchiennes-Souche	-1.298	0.195
Marchiennes-Villiers	-5.150	< 0.001
Sacy-Souche	-0.733	0.464
Sacy-Villiers	-4.518	< 0.001
Souche-Villiers	-3.655	< 0.001

Nous avons ensuite étudié les chroniques piézométriques des nappes souterraines, susceptibles d'alimenter les zones d'études (Figure 7).

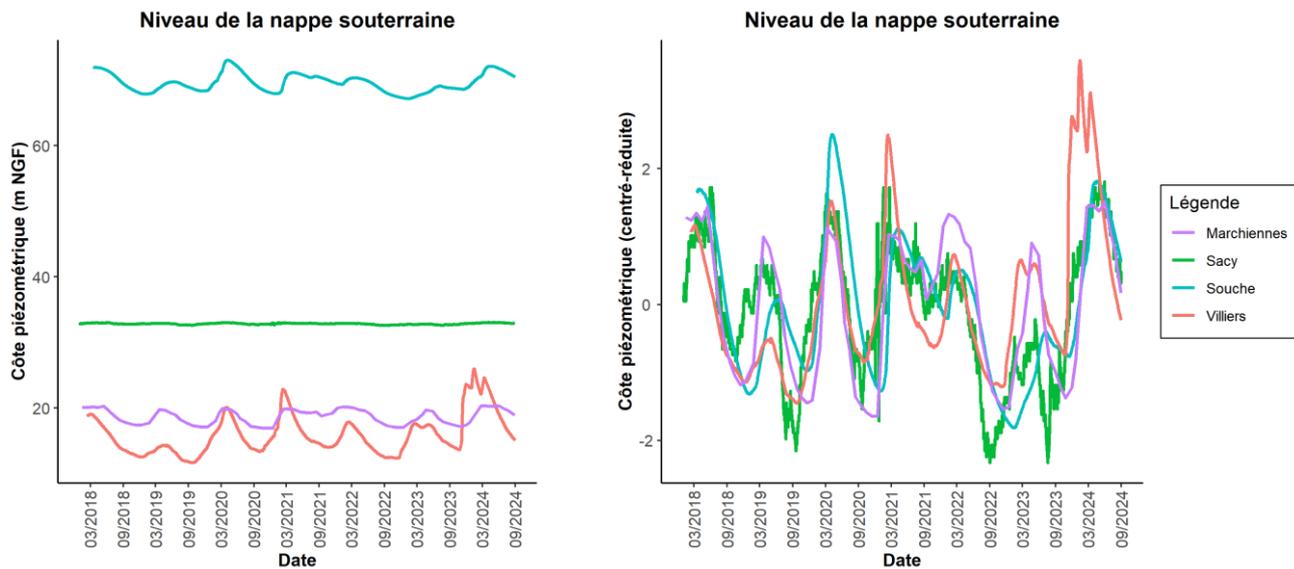


Figure 7: Représentation graphique de la côte piézométrique de la nappe souterraine susceptible d'alimenter les sites d'études. A droite, la représentation utilise les mêmes données, centrées réduites

Les niveaux des nappes souterraines dans les trois années précédant les relevés diffèrent dans les sites. À Sacy et dans la Souche, les niveaux d'eau des trois années précédant le deuxième échantillonnage sont inférieurs à ceux mesurés les années précédant le premier échantillonnage. Nous détectons un phénomène inverse dans la nappe de la craie du marais de Villiers (Tableau 4).

Tableau 4: Moyenne et écart type des côtes piézométriques relevées dans les nappes souterraines des différents sites. Le test permet de comparer les différences de côte dans les deux périodes précédant l'échantillonnage.

Site	Total		≤ Août 2021		> Août 2021		T test	
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	t	p
Marchiennes	18.70	1.11	18.61	1.13	18.80	1.09	0.801	0.425
Sacy	32.83	0.11	32.85	0.10	32.82	0.13	-5.889	< 0.001
Souche	69.61	1.36	69.79	1.41	69.42	1.28	-6.892	< 0.001
Villiers	15.76	2.84	15.32	2.59	16.23	3.02	7.982	< 0.001

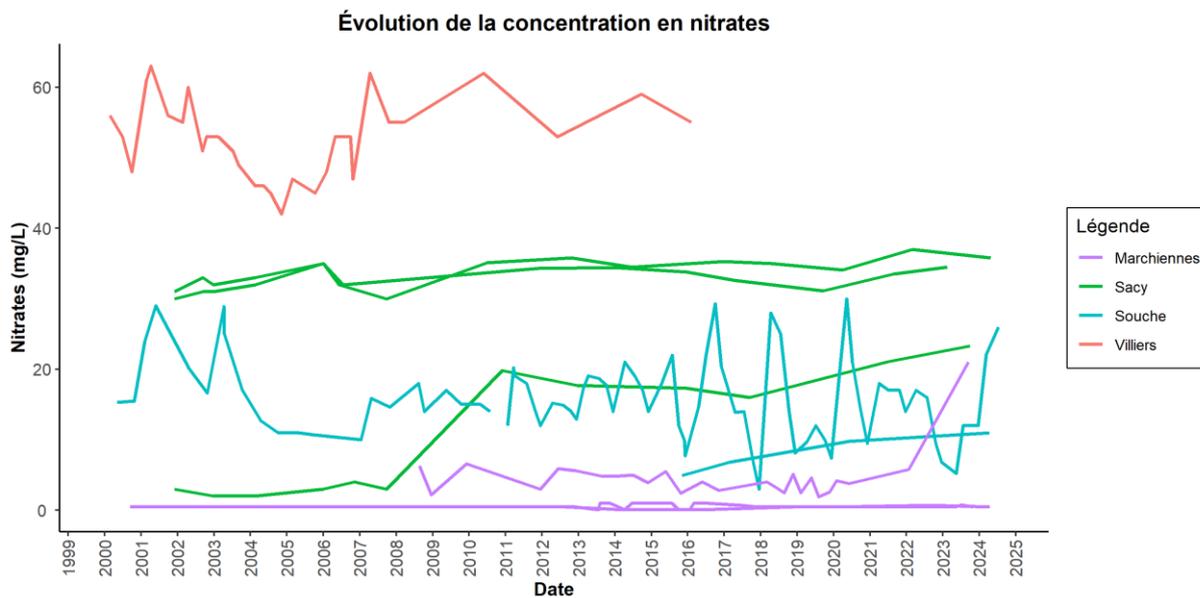


Figure 8: Concentrations en nitrates relevées dans les nappes souterraines à proximité des sites d'étude.

Le faible nombre d'analyses physico-chimiques de la qualité de l'eau souterraine ne nous permet pas de tester les différences de concentrations en nutriments et en carbonates/hydrogénocarbonates entre les deux périodes précédant les relevés, ni sur d'autres molécules dont la concentration pourrait être intéressante (Phosphore, Potassium, Manganèse...).

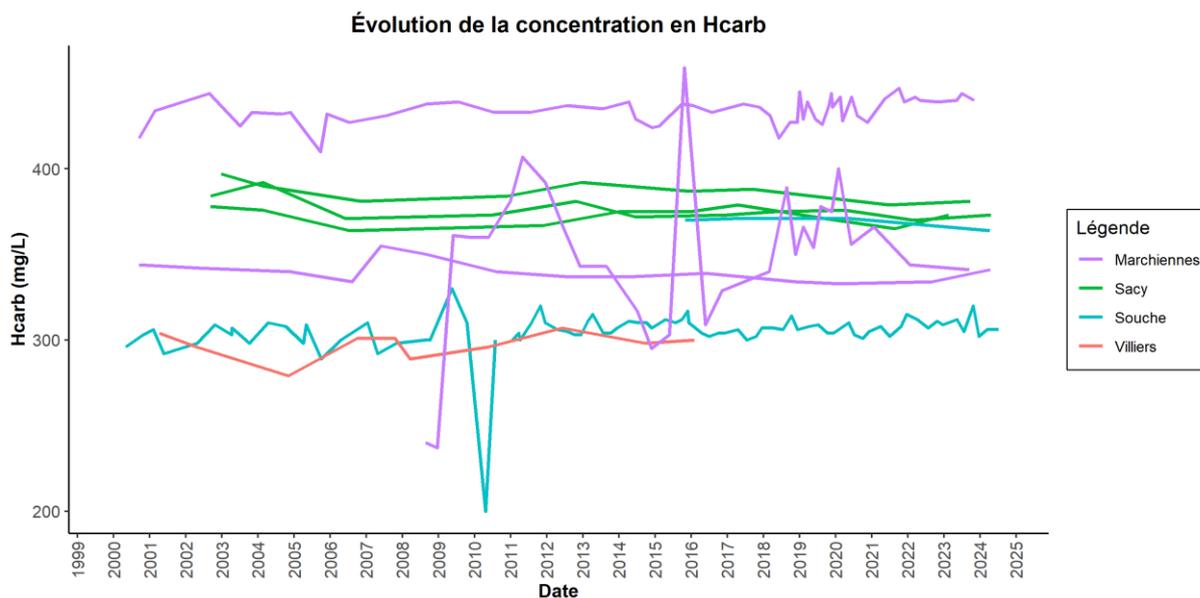


Figure 9: Concentrations en ions Hydrogénocarbonates relevées dans les nappes souterraines à proximité des sites d'étude

Néanmoins, il est possible de distinguer des tendances à plus long terme dans les concentrations de ces éléments (Figure 8 et Figure 9). Pour les hydrogénocarbonates, seul l'ouvrage BSS000CBYN (Genech) montre une augmentation significative ($p < 0.001$). Concernant les nitrates, il existe une augmentation significative pour les BSS000GZFU (forage la Bruyère ; $p < 0.001$), BSS000GYXL (Puit de la bruyère ; $p = 0.001$), BSS000FXBB (Pierrepont ; $p = 0.039$) et BSS000BPVD (Saint-Aubin ; $p < 0.001$). Les résultats des modèles linéaires testant ces tendances sont présentés en Figure S2.

4. Discussion

Les cladiaies étudiées sur les sites sont évaluées en bon état de conservation. Certains critères déclassants présents dans la grille d'état de conservation n'ont été observés sur aucun site, alors que d'autres sont beaucoup plus fréquents,

comme le piquetage d'espèces ligneuses ou en hélophytes, les traces de piétinement, ou encore un dérèglement hydrique apparent. Dans tous les cas, la description correspond aux critères « optimaux » d'après Clément et al. (2020), et la grille d'évaluation de l'état de conservation de l'habitat 7210, adaptée du CBN de Bailleul (Coulombel 2020 ; Villejoubert et al. 2021).

Les observations ont été réalisées sur deux saisons distinctes, mais à la même époque de l'année : la dernière semaine d'août. Sur site, des différences importantes dans le niveau d'eau apparent ont été remarquées et sont dues à une année 2024 exceptionnellement humide. Cependant, les différences observées entre les sites sont restées, avec des sites globalement en bon état de conservation, rattachables aux Marais calcaires à *Cladium mariscus* (UE 7210) en bon état plus (Villiers et Marchiennes) ou moins (Sacy et Souche) diversifiés floristiquement.

Les mesures morphométriques réalisées sur les Marisques montrent que dans ces deux faciès de végétation, les individus et la communauté d'espèces sont différents. Certains traits sont rattachables à la reproduction et la différence significative dans leur observation entre sites (hampes florales de l'année ou de l'année précédente) montre que les individus se développant sur les sites de Villiers et de Marchiennes privilégient un investissement dans la reproduction sexuée (davantage d'individus en fleurs). Ces sites sont également ceux pour lesquels des densités plus faibles et plus hétérogènes ont été observées. Cette densité pourrait être expliquée par des patches d'installation préférentiels des Marisques dans une matrice d'un autre habitat, par exemple une roselière à Phragmite commun et Fougère des marais (*Thelypterido palustris* - *Phragmitetum australis*), ou un bas-marais alcalin (*Hydrocotylo-Schoenion*). Les relativement faibles différences entre les deux sessions laissent présager deux hypothèses. La première pourrait être que les Marisques mettent assez longtemps à coloniser un milieu, si bien qu'à l'échelle de trois ans, aucune différence significative n'est perceptible. La deuxième pourrait être que les sites à moindre densité en Marisques sont ceux sur lesquels se produisent des limitations. Celles-ci peuvent être soit chimiques, soit mécaniques. Tester cette hypothèse nécessiterait d'étudier davantage la qualité de l'eau sur le site. Toutefois, les indices dont nous disposons, notamment concernant un enrichissement trophique des nappes souterraines susceptibles d'alimenter les tourbières étudiées, laissent à penser que la végétation à Marisque devrait davantage se développer face à la végétation de tourbière basse alcaline. À l'inverse, l'habitat à Marisque devrait régresser face à une dynamique de végétation eutrophile, par exemple par la présence d'espèces de mégaphorbiaies, ou d'espèces à croissance rapide comme les Roseaux. D'autres perturbations peuvent engendrer un rajeunissement de la végétation susceptible d'interférer sur les variables mesurées. Des traces de piétinement par des grands mammifères comme les sangliers ou les chevreuils, ont en effet été reportées, notamment à Marchiennes, laissant dans la cladiaie des coulées exemptes de Marisques. Par ailleurs, la gestion appliquée sur certains sites (gyrobroyage alterné à Villiers) permet une dédensification et un probable rajeunissement périodique de certaines cladiaies, conduisant à une moindre épaisseur de litière, une longueur de feuilles significativement inférieure mais à une plus forte production de graines. Sur les marais de Sacy, l'effet du piétinement entre un parc pâturé extensivement (hors site d'étude) et un parc non pâturé (site d'étude) est un bon exemple d'effet du piétinement sur cet habitat. Il semble qu'avec la réduction progressive du nombre de bovins sur le parc pâturé, à l'échelle d'une vingtaine d'années, la cladiaie se densifie, ce qui laisse présager un devenir de cette surface en cladiaie en bon état de conservation telle qu'étudiée dans la parcelle non pâturée des marais de Sacy. Les cladiaies des marais de Sacy ont servi à l'élaboration de la grille d'évaluation de l'état de conservation de l'habitat 7210. La faible présence d'espèces nitrophiles et la forte densité d'individus sont désormais des marqueurs de bon état de conservation. Cependant, cette évaluation basée sur un faciès de cladiaie, semble questionnable pour évaluer l'état de cladiaies d'un autre faciès, comme les cladiaies comportant une plus forte proportion d'espèces eutrophiles, et un plus grand nombre d'individus fleuris. En effet, si le critère retenu était l'existence d'une diversité de stade phénologique, et si la grille d'évaluation construite à partir des cladiaies différentes de celles de Sacy, il est probable que les états de conservation, que nous estimons relatifs, auraient pu être inversés. Ainsi, il peut être judicieux de se reporter à une définition de sens plus général telle que décrite dans les cahiers d'habitats avec la définition du l'habitat 7210: « Végétations caractérisées par la présence, et le plus souvent par la dominance, du Marisque (*Cladium mariscus*)" (Bensettiti et al., 2002). Une cladiaie (*Cladietum marisci*) en bon état de conservation, sur une tourbière fonctionnelle devrait donc être dominée par le Marisque, peut héberger d'autres espèces du même niveau topographique, à savoir des hélophytes de la classe des *Phragmito-Magnocaricetea*, mais

plus difficilement des espèces eutrophiles de la classe des *Filipendulo-Convolvuletea* ou des *Galio-Urticetea*. L'enrichissement en espèces de niveaux topographique et trophique supérieurs est alors considéré comme une dégradation de l'habitat, notamment due à une altération des facteurs environnementaux.

Les cladiaies diversifiées de Villiers (A. Janczak)

« Sur le marais de Villiers, du fait des choix des gestionnaires vis-à-vis des enjeux et des végétations exprimées sur le site du marais de Cucq voisin (hébergeant de nombreux patchs de cladiaies dense et de fourrés) il a été décidé de favoriser les stades plus ouverts et dynamiques de végétations. Ainsi chaque patch d'habitat est broyé en moyenne une fois tous les 5 ans. Cinq secteurs définis d'une surface totale d'environ 5500 m² sont toutefois laissés en densification et ne bénéficient que de coupes ponctuelles et sélectives des ligneux.

Les cladiaies ont été souvent peu considérées si ce n'est à l'égal d'une roselière à Phragmite pour l'avifaune paludicole car abritant peu d'espèces végétales floristiques d'intérêt. Elles sont pourtant, à l'instar du bois mort pour les forêts, un habitat d'espèce et un élément fonctionnel à conserver pour maintenir la biodiversité en tourbière. En effet, elles constituent du fait de leurs structurations complexes un habitat privilégié pour de nombreuses espèces faunistiques souvent peu étudiés (gastéropodes, araignées, hétérocères...). De plus le Marisque est une espèce souvent impliquée dans la turfigènesse et par conséquent constitue un élément fonctionnel de la tourbière qu'il convient de conserver au même titre que d'autres espèces comme les mousses brunes. »

Les traits phénotypiques liés à un investissement dans la survie et à la lutte dans la compétition individuelle sont davantage marqués dans les marais de Sacy et de la Souche. Dans ces deux cas, peu d'individus reproducteurs sexués ont été observés. L'épaisseur de litière, la hauteur de la végétation, les longueurs de feuilles, et la densité étaient pour les deux sites, importantes, avec très peu de différences entre les placettes, entre les transects, et même entre les deux sites. Il semble que sur ces sites, les cladiaies aient atteint un stade de pleine maturité avec l'accumulation d'une litière épaisse susceptible d'être à l'origine de la tourbe de ces tourbières. En effet, des macro-restes de Marisque y sont visibles à faible profondeur. Le maintien ou la restauration des niveaux d'eau importants dans ces tourbières pourrait permettre de contribuer à l'accumulation de cette litière, et donc au stockage du carbone. Des recherches complémentaires sur ce phénomène dans ces sites permettraient de documenter l'effet de stockage du carbone, s'il existe. La densité d'individus, élevée et homogène, laisse à penser qu'il n'existe plus d'espace de colonisation au sein de la cladiaie. Le Marisque étant une espèce rhizomateuse, cette densité pourrait être due à une reproduction végétative permettant la densification, sous forte concurrence. Une étude génétique pourrait confirmer le mécanisme exact de cette hypothèse, à savoir s'il s'agit de clones ou s'il s'agit d'une plasticité phénotypique exprimée à l'échelle individuelle. En effet, avec cette densité, cette épaisseur de litière, et cette hauteur de végétation, peu d'individus sont capables de se frayer un chemin vers la lumière, et il est aisé de penser que la survie de nouveaux individus a peu de chance d'être assurée. La conséquence est probablement un investissement supplémentaire des individus, déjà installés dans ces conditions, dans les organes permettant la survie des individus. Les individus ayant développé cet investissement dans les organes ou dans la stratégie de reproduction végétative, l'emportent largement dans cet environnement compétitif et sont sélectionnés. En s'élançant hors de la végétation vers la lumière et en produisant plus de feuilles, ces individus ont une probabilité d'accroître leur survie, alors qu'en investissant dans la descendance par production de graines, la stratégie pourrait se révéler perdante. Ces observations rejoignent les résultats d'une précédente étude démontrant que la compétition limite le recrutement de l'espèce (Meredith, 1985). Pour l'espèce voisine des Everglades, en Floride, *Cladium jamaicense*, il a été montré que les populations clonales disposent d'une plus faible diversité génétique (F_{ST} et D) que les populations fleuries, bien que les populations des Everglades semblent généralement peu diversifiées génétiquement (Ivey & Richards, 2001). Les auteurs interprètent cette dépression par un faible nombre d'individus fondateurs de chaque population, que la reproduction végétative exacerbe. Des études similaires sur les sites permettraient de confirmer ou infirmer certaines hypothèses sur les ressemblances dans les traits d'histoire de vie entre *Cladium jamaicense* et *Cladium mariscus*.

Grâce à l'étude des traits phénotypiques, il nous est possible de discuter des stratégies adaptatives des Marisques. En effet, sur les sites de Villiers et de Marchiennes, les individus développent principalement des traits reflétant une stratégie *r* : production d'un grand nombre de descendants pour favoriser la colonisation et la survie face aux conditions instables (fauche, piétinement), et au risque accru de mortalité interannuelle. À l'inverse les individus des marais de la Souche et de Sacy développent les traits maximisant l'accès aux ressources et donc la survie, au détriment de la production de descendants. Ces traits sont en effet favorisés par le peu de perturbation reporté sur ces sites, si bien qu'un individu déjà bien développé a une forte probabilité de survie. Cette stratégie semble donc refléter la stratégie K, répondant à la théorie de la biogéographie insulaire de MacArthur et Wilson (1967).

Ainsi, lorsqu'on étudie la variabilité de ces traits phénotypiques, il semble que les cladiaies en bon état de conservation sont celles allouant leurs ressources à la survie des individus déjà en place. Les meilleurs états de conservation des cladiaies sont corrélés à l'épaisseur de la litière, la hauteur de végétation, la densité d'individus, et à l'homogénéité dans ces variables (Figure 4). À l'échelle de la communauté, des richesses spécifiques plus importantes sont corrélés à des modifications des traits fonctionnels. La richesse est en effet corrélée à une baisse de l'indice d'engorgement, et à une augmentation de l'indice de trophie. Il est possible que les espèces eutrophiles ou d'un niveau topographique supérieur à l'optimum de *Cladium mariscus* soient celles qui colonisent les cladiaies, initialement fortement engorgées et relativement oligotrophe, mais ayant subies des perturbations. Dans le cas contraire, il se pourrait que ce soit un phénomène de colonisation du Marisque sur une végétation plus eutrophe, mais ce dernier cas est hautement improbable dans un contexte d'enrichissement trophique généralisé des masses d'eau, même si des phénomènes locaux peuvent exister. Bien que le comportement de ces métriques He et Ht soit informatif, la valeur de la métrique appliquée à la communauté est particulièrement influencée par la dominance du Marisque. Ainsi, avec des forts recouvrements, sa prédominance tire la valeur de la communauté autour de la valeur d'engorgement et de trophie attribuée par Landolt au Marisque, limitant la gamme de variation de la variable, son gradient, et la possibilité de l'utiliser en analyses statistiques. Des mesures directes de l'engorgement du site par des piézomètres de la nappe de surface, et de la trophie du site par des dosages réguliers des nutriments (Nitrates, Orthophosphates) permettraient de mieux définir les caractéristiques abiotiques des sites et le reflet de ces conditions par les traits fonctionnels de la communauté. Si des piézomètres, installés avant la fin de l'étude sur le site, pourront satisfaire ce point dans des analyses futures, il serait particulièrement pertinent d'envisager également des prélèvements et dosages de nutriments réguliers sur chaque site.

Les Cladiaies de la Souche : du végétal pour l'animal (N. Caron)

« Dans les Marais de la Souche, il subsiste encore de belles étendues de Cladiaies, notamment sur les secteurs de Liesse-Notre-Dame, Pierrepont et Vesles-et-Caumont. Du fait d'une stratification verticale complexe et dotées de niches écologiques diversifiées, cet habitat revêt un intérêt certain pour bon nombre de groupes de faune. En ça, la gestion des Cladiaies est réfléchiée afin de préserver au mieux une densité, une couverture et hauteur de litière lui permettant de jouer pleinement son rôle de refuge pour la faune et diversifier les micro-habitats. »

Certaines cladiaies colonisant des végétations de bas marais (*Scheuchzerio-Caricetea*) ont été observées à Villiers, ce qui laisse à penser que la trophie n'est probablement pas le seul filtre environnemental agissant sur l'assemblage d'espèces, puisqu'une fauche épisodique semble permettre la cohabitation de *Cladium mariscus* avec tout un cortège d'espèce des *Scheuchzerio-Caricetea*, susceptible d'être rattachable au bas-marais (UE 7230). Le mécanisme d'assemblage de la communauté semble donc reposer sur la compétition interspécifique. Les cladiaies de Sacy et de la Souche sont estimées en bon état de conservation, cet état étant défavorisé par la présence d'espèces nitrophiles, mais, comme démontré précédemment, favorisé par les traits phénotypiques liés à la survie. La forte compétition pour les ressources, notamment la lumière dans le cas de cladiaies hautes, denses et à épaisse litière ne laisse que peu de probabilité à une espèce différente de coloniser l'habitat. Nos observations de terrain, en dehors du plan d'échantillonnage confirment ce phénomène. Dans les layons où les Marisques sont broyés dans le but de permettre la circulation pour différents usages (gestion, chasse, etc...), une forte proportion d'espèces non typiques de l'habitat

se développent. Ainsi, ces layons sont souvent recouverts de végétations de l'*Hydrocotylo-Schoenion* où les Roseaux sont capables de progresser beaucoup plus rapidement que dans la cladiaie non gérée. À intervention régulière, ce filtre environnemental apporté par la gestion permet une introgression d'espèces différentes, favorisant la biodiversité au détriment de la dominance floristique du Marisque dans l'habitat d'intérêt communautaire prioritaire (UE 7210). Quelques espèces peuvent néanmoins se développer dans les cladiaies non gérées et sont considérées comme des facteurs de dégradation de l'état de conservation, ce sont les ligneux. Généralement, le Bouleau pubescent (*Betula pubescens*), espèce qualifiée de pionnière, et capable de disperser de nombreux propagules (stratégie *r*), bien qu'il soit fortement probable que la plupart des graines ou des individus finissant par se décomposer sous la litière, sont capables, à la faveur d'une coulée ou d'un abaissement des niveaux d'eau, de germer et de se développer dans les cladiaies. Si un retour de niveaux d'eau élevés permet de limiter son développement voire induire un état dense et mature, voire sénescant, des altérations hydrologiques ou mécaniques répétées peuvent cependant conduire à une cladiaie piquetée de ligneux. Afin d'améliorer l'état de conservation, le gestionnaire pourra alors prendre la décision d'intervenir par un déboisement très ponctuel, et surtout d'envisager une restauration hydrologique du site (Berquer et al., 2024c).

Sur les sites étudiés, il ne semble pas y avoir de grandes différences dans l'hydrologie. En effet, la pluviométrie est relativement stable sur tous les sites avec des quantités quotidiennes non significativement différentes entre les trois années précédant les observations de 2021 et les années précédant celles de 2024. Les nappes souterraines ont toutefois quelques variations que l'on a testé comme significatives. En effet, en été 2022, une sécheresse exceptionnelle a drastiquement fait baisser les niveaux d'eau des nappes, ce qui s'est répercuté sur les sites. Il s'en est suivi une saison très humide de l'automne 2023 à l'hiver 2024, date de l'écriture du présent rapport, permettant un maintien de niveaux d'eau élevés dans les cladiaies des sites étudiés. Si les sites démontrent habituellement des niveaux d'eau insatisfaisants quant à la préservation des tourbes et tourbières, les niveaux observés lors de la session 2024 présentent des niveaux tout à fait optimaux, avec une litière partiellement inondée et des feuilles hors de l'eau. Ce sont des niveaux d'eau atteignables voire supérieurs à un niveau d'eau qu'on pourrait obtenir après restauration. Il a été montré que les caractéristiques hydrologiques et pédologiques des sites influencent le phénotype d'une espèce américaine de Marisque, *Cladium jamaicense*, (Richards & Olivas, 2019) et nos résultats semblent démontrer que *C. mariscus* puisse, comme son pendant américain, adapter son phénotype aux conditions environnementales.

Enfin, le dernier paramètre étudié, la trophie, est susceptible, dans le futur, de provoquer des perturbations importantes de la végétation en renforçant la probabilité d'introgression d'espèces nitrophiles en cas d'une perturbation mécanique mineure dans une cladiaie d'un des sites. Ces conclusions rejoignent celles d'une étude montrant que la trophie favorise la colonisation des cladiaies des Everglades à *Cladium jamaicense* par *Typha domingensis* (Weisner & Miao, 2003).

Si le gestionnaire est souvent désarmé face à l'enrichissement trophique généralisé des masses d'eau, dû à d'autres activités (agriculture intensive, réseaux d'assainissement non conformes), des possibilités de gestion locale des nutriments peuvent être envisagées. Une stratégie, développée dans le LIFE Anthropofens (Berquer et al., 2024a ; Berquer et al., 2024b), peut s'avérer bénéfique, par exemple en utilisant la végétation locale comme piège à nutriments. L'objectif est que l'eau stationne suffisamment longtemps dans des zones où poussent des plantes capables de réduire la concentration en nutriments. Celles-ci, à l'image d'une station d'épuration par lagunage, se nourrissent des nutriments dont les eaux sont chargées et au fur et à mesure du parcours de l'eau dans la végétation, celle-ci a une teneur en nutriments qui diminue. Cependant, ces moyens nécessitent une exportation annuelle des nutriments stockés dans la biomasse végétale, donc une fauche assez intensive est nécessaire afin de procéder à l'exportation de matière hors-site. Par ailleurs, une partie de la surface d'un site peut être sacrifiée à cet effet.

Vues les conséquences des nutriments sur la végétation patrimoniale, la difficulté et le coût de les gérer, la poursuite des recherches est nécessaire afin d'identifier des moyens de gestion des nutriments plus efficaces et pratiques. Par ailleurs, il serait bienvenu de réduire l'apport des nutriments dans les écosystèmes terrestres, et de gérer les surplus avant qu'ils n'arrivent dans des compartiments hydrologiques indispensables à la santé publique (eau potable), à la biodiversité et à la lutte contre le changement climatique (dégradation des tourbes).

5. Remerciements

Nous tenons à remercier les partenaires et financeurs du Life Anthropofens LIF18NAT/FR/000906, les différents observateurs de terrain, de participation à la conceptualisation de l'étude, les chargés d'étude des équipes sites: M. Castelli, W. Cheyreyzy, A. Gazaix, G. Jacek, V. Lecocq, A. Pencoat-Jones ; et tous les collègues du Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France, du Parc Naturel Régional Scarpe-Escaut, du Conservatoire Botanique National de Bailleul et du département de l'Oise pour la mise en œuvre du projet sur les sites de l'étude et leur gestion.

6. Références

- Bartoń K., 2024. MuMIn: Multi-Model Inference. R package version 1.48.4
- Bensettiti F., Gaudillat V. & Haury J. (coord.), 2002. « Cahiers d'habitats » Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 3 - Habitats humides. MATE / MAP / MNHN. Éd. La Documentation française, Paris, 457 p.
- Berquer A., Alderweireld F. & Janczak A., 2024a. Tourbières et changement climatique: l'exemple des tourbières de l'Authie et du littoral du Pas-de-Calais. 24^{ème} congrès des Conservatoires d'espaces naturels, Nancy, doi: [10.13140/RG.2.2.20426.89285](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20426.89285)
- Berquer A., Czerniak L. & Rivière G., 2024b. Tourbières alcalines : vers une meilleure qualité d'eau ? L'exemple de la RNN Etang Saint-Ladre. Colloque du Groupe d'Études des Tourbières, 2024, Boves, doi : [10.13140/RG.2.2.26950.28482](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26950.28482)
- Berquer A., Levraut S., Castelli M., Alderweireld F., André A., Antoine P., Basseur B., Capoulade J., Czerniak L., Décultot C., François R., Garcia C., Hummel J., Janczak A., Meire G., Opdekamp W., Trongneux P., Vandendriessche M., Chombart C., Daubresse R., James M., Duran P., 2024c. Fonctionnement des tourbières alcalines, gestion de l'eau et restauration. LIFE Anthropofens, Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France, Boves. 52p
- Clément H., Reich M., Mistarz M. & Garcin J., 2020. Évaluation de l'état de conservation des bas-marais calcaires d'intérêt communautaire. Cahiers d'évaluation à l'échelle des sites Natura 2000. Version 1. UMS Patrinat – OFB/CNRS/MNHN. 183p.
- Coulombel R., 2020. Grille d'évaluation de l'état de conservation des "Marais calcaires à *Cladium mariscus* et espèces du *Caricion davallianae*" (7210). Document Excel de trois onglets, adapté à la région Hauts-de-France, dans le cadre du projet Life Anthropofens.
- Duranel A., 2024. Étude écohydrologique de la Réserve Naturelle Nationale de la Tourbière de Marchiennes – Rapport final. LIFE+ Nature Anthropofens, Ecotelm pour le Syndicat Mixte du Parc Naturel Régional Scarpe-Escaut, 176 p. + Annexes
- Garcia C., Basseur B., Bacon J., Saulnier-Copard S., Gauthier C., Mathieu L.-A., Gauthier A., Michaelis D., Mokadem F. & Antoine P., 2025. Lateglacial and Holocene palaeoenvironmental evolution of alkaline peatlands in the Somme valley (France): between climate and anthropogenic forcing. *Boreas*, 54: 34-59. doi : [10.1111/bor.12676](https://doi.org/10.1111/bor.12676)
- Garnier G. & Darinot F., 2013. Les Cladiaies, un paradis pour les araignées. Les Cahiers Techniques - CEN Rhône-Alpes. 19p
- Ivey C. & Richards J., 2001. Genetic diversity of Everglades Sawgrass, *Cladium jamaicense* (Cyperaceae). *International Journal of Plant Sciences*, 162: 817-825. doi: [10.1086/320775](https://doi.org/10.1086/320775).
- Landolt E., 1977. *Ökologische zeigerwerte zur schweizer Flora*. Stiftung Rübel.
- MacArthur, R. H., & Wilson, E. O., 1967. *The Theory of Island Biogeography*. Princeton, N.J.: Princeton University Press, 203 p.

- Meredith T.C., 1985. Factors Affecting Recruitment from the Seed Bank of Sedge (*Cladium mariscus*) Dominated Communities at Wicken Fen, Cambridgeshire, England. *Journal of Biogeography* 12 (5) : 463-472.
- Pencoat-Jones A. & Berquer A., 2024. Caractérisation du fonctionnement éco-hydrologique et restauration d'habitats dans les marais de Sacy. Atelier "Eau-Rivière-Tourbière", Colloque du Groupe d'Études des Tourbières, Boves. doi: [10.13140/RG.2.2.10805.49126](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10805.49126)
- Pôle-relais lagunes méditerranéennes, 2014. Méthodes et outils de diagnostic des roselières méditerranéennes françaises en faveur de l'avifaune paludicole. Recueil d'expériences, 34p.
- Richards J. H. & Olivas P.C., 2019. A common-mesocosm experiment recreates sawgrass (*Cladium jamaicense*) phenotypes from Everglades marl prairies and peat marshes. *American Journal of Botany* 107(1): 1–10, doi: [10.1002/ajb2.1411](https://doi.org/10.1002/ajb2.1411)
- Sajaloli B., 1994. Histoires d'eau dans le marais de la Souche (Aisne) : le fonctionnement de l'hydrosystème, reflet de l'alternance des cycles d'abandon et d'appropriation ? (Water stories in the swamp of Souche (Aisne, France): links between the functioning of the marsh space and the organization of rural societies). In: *Bulletin de l'Association de géographes français*, 71e année, 1994-3 (juin). Les marais continentaux de la France des plaines et des moyennes montagnes. Aspects écologiques et sociologiques, gestion et protection. pp. 250-266. doi : [10.3406/bagf.1994.1744](https://doi.org/10.3406/bagf.1994.1744)
- Saltmarsh A., Mauchamp A. & Rambal S., 2006. « Contrasted effects of water limitation on leaf functions and growth of two emergent co-occurring plant species, *Cladium mariscus* and *Phragmites australis* », *Aquatic Botany* 84 : 191–198.
- Villejoubert G., Coulombel R. & Fontenelle A., 2021a. Programme LIFE Anthropofens (LIFE18 NAT/FR/000906). Etat initial (ACTION D1.1) : Suivi des habitats à l'échelle des unités de végétation - Evaluation de l'état de conservation des habitats d'intérêt communautaire envisagés dans les polygones de travaux du LIFE Anthropofens. Conservatoire botanique national de Bailleul. 375 p.
- Villejoubert G., Coulombel, R. & Fontenelle, A., 2021b. Programme LIFE18 NAT/FR/000906 Anthropofens. Etat initial (ACTION D1.1) : Suivi des habitats à l'échelle des unités de végétation - Evaluation de l'état de conservation des habitats d'intérêt communautaire envisagés dans les polygones de travaux du LIFE Anthropofens - ANNEXES – Grilles d'évaluations des Habitats d'Intérêt Communautaire. Conservatoire botanique national de Bailleul. 259 p.
- Vinchon C., Gouny J.C., Farjanel G., Hervieux D., Van Vliet Lanoë B. & Baeteman C., 2000. Évolution géologique du système côtier picard entre Berck et Merlimont (62) au Quaternaire. Scénarios géoprospectifs de l'évolution dunaire. Rap. BRGMIRP-50039-FR, Bureau de recherches géologiques et minières pour l'Office National des Forêts, 89 p.
- Vivanco M. G., Theobald M. R., García-Gómez H., Garrido J. L., Prank M., Aas W., Adan, M., Alyuz U., Andersson C., Bellasio R., Bessagnet B., Bianconi R., Bieser J., Brandt J., Briganti G., Cappelletti A., Curci, G., Christensen J. H., Colette A., Couvidat F., Cuvelier C., D'Isidoro M., Flemming J., Fraser A., Geels C., Hansen K. M., Hogrefe C., Im U., Jorba O., Kitwiroon N., Mandera A., Mircea M., Otero N., Pay M.-T., Pozzoli L., Solazz, E., Tsyro S., Unal A., Wind P. & Galmarini S., 2018. Modeled deposition of nitrogen and sulfur in Europe estimated by 14 air quality model systems: evaluation, effects of changes in emissions and implications for habitat protection, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18: 10199–10218, doi: [10.5194/acp-18-10199-2018](https://doi.org/10.5194/acp-18-10199-2018)
- Weisner S.E.B. & Miao S.L., 2024. Use of morphological variability in *Cladium jamaicense* and *Typha domingensis* to understand vegetation changes in an Everglades marsh. *Aquatic Botany* 78 (4): 319-335, doi: [10.1016/j.aquabot.2003.11.007](https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2003.11.007)
- Wickham H., 2016. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York. ISBN 978-3-319-24277-4, <https://ggplot2.tidyverse.org>.

7. Annexes

Évaluation de l'état de conservation des "Marais calcaires à <i>Cladium mariscus</i> et espèces du <i>Caricion davalliana</i> " (7210)					
Commune		Site			
Date		Lieu-dit			
Observateur(s)		Remarque			
ID CBN unique					
CRITÈRE	INDICATEUR	Échelle de collecte	MODALITÉ	NOTE	CHOIX
	Description des indicateurs				
Surface de l'habitat	Évolution de la surface entre 2 évaluations de l'état de conservation (indiquer les causes de l'évolution)	Polygone	Progression notable (+ 10 % surf. en plus)	+10	
			Stabilité (saisi par défaut, en Etat initiale)	0	
			Régression notable (+ 10 % surf. en moins)	-10	
Composition floristique	% de recouvrement des ligneux [de taille > 80 cm]	Placette	< 10 %	0	
			10-25%	-10	
			26-50%	-20	
			> 50%	-30	
	Présence d'espèces typiques (cf. liste)	Placette	> 60%	0	
			30 à 60%	-20	
			< 30 %	-30	
	Recouvrement d'espèces prairiales (cf. liste)	Placette	< 10 % (diffuses)	0	
			10-25 % (régulières)	-10	
			> 25% ("abondantes")	-20	
	Recouvrement d'espèces rudérales ou nitrophiles (cf. liste)	Placette	< 5 % (absentes ou ponctuelles)	0	
			5 à 15 % (présentes mais diffuses)	-15	
			> 15 % ("abondantes")	-30	
	Recouvrement des héliophytes hautes [<i>Phragmites australis</i> , <i>Sparganium erectum</i> , <i>Carex riparia</i> , <i>C. acutiformis</i> , <i>C. paniculata</i> , <i>Rumex hydrolapathum</i> , <i>Glyceria maxima</i> , <i>Typha</i> , <i>Schoenoplectus</i>]	Placette	< 10%	0	
			10 à 25%	-5	
25 à 50%			-10		
> 50%			-15		
Recouvrement des espèces exotiques envahissantes [<i>Symphytichum lanceolatum</i> , <i>Solidago</i> sp., <i>Crassula helmsii</i> , <i>Ludwigia grandiflora</i> , <i>Lindernia dubia</i> , <i>Cornus sericea</i> ...]	Placette	absentes	0		
		1 à 10 % (présentes mais ponctuelles)	-10		
		> 10% ("abondantes")	-20		
Altérations	Dégradations [Déjections animales; Piétinement ou retournement du sol; Tassement; Autres à préciser]	Placette	Pas d'atteintes	0	
			Ponctuelle ou < 5% de la surface	-5	
			Entre 5% et 10% de la surface	-10	
			> 10% de la surface	-20	
	Engorgement hydrique [Estimation pour l'époque et l'habitat] Une connaissance de l'engorgement du site à différentes périodes de l'année est nécessaire	Polygone	Cohérent avec l'époque et l'habitat	0	
			Deficit hydrique faible	-5	
			Deficit hydrique modéré	-10	
Deficit hydrique considérable, dynamique de l'habitat remise en cause	-20				
Sous total				0	
Note =				/100	

Figure S1: Grille d'évaluation de l'état de conservation de l'habitat 7210*, d'après Coulombel (2020).

Figure S2: Résultats des modèles de concentration en nitrates et hydrogénocarbonates en fonction du temps.

```
> summary(lm(Resultat.de.l.analyse~date,nitratesGZFU))
Call:
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = nitratesGZFU)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.8811 -0.8781 -0.1214  1.0824  3.4957

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.493e+01  2.118e+00  11.771 5.62e-09 ***
date         6.672e-09  1.650e-09   4.045 0.00106 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.75 on 15 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared:  0.5217, Adjusted R-squared:  0.4898
F-statistic: 16.36 on 1 and 15 DF, p-value: 0.001058

> summary(lm(Resultat.de.l.analyse~date,nitratesGYXL))
Call:
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = nitratesGYXL)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-5.4046 -2.9697 -0.3936  1.0707  8.3771

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -2.752e+01  6.433e+00  -4.278  0.0013 **
date         3.016e-08  4.999e-09   6.034 8.5e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 4.275 on 11 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared:  0.768, Adjusted R-squared:  0.7469
F-statistic: 36.41 on 1 and 11 DF, p-value: 8.499e-05

> summary(lm(Resultat.de.l.analyse~date,nitratesGZFV))
Call:
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = nitratesGZFV)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.5563 -0.6771  0.3723  1.1080  2.3154

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.425e+01  1.518e+00  22.566 5.45e-13 ***
date        -6.935e-10  1.233e-09  -0.563  0.582
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.434 on 15 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared:  0.02066, Adjusted R-squared: -0.04463
F-statistic: 0.3164 on 1 and 15 DF, p-value: 0.5821

> summary(lm(Resultat.de.l.analyse~date,nitratesFXBB))
Call:
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = nitratesFXBB)

Residuals:
    88283    88717    89249    89779
-0.6835  0.2897  0.9617 -0.5679

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -2.692e+01  7.195e+00  -3.742  0.0646 .
date         2.247e-08  4.603e-09   4.881 0.0395 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.9483 on 2 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared:  0.9226, Adjusted R-squared:  0.8839
F-statistic: 23.83 on 1 and 2 DF, p-value: 0.0395

> summary(lm(Resultat.de.l.analyse~date,nitratesFWYD))
Call:
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = nitratesFWYD)
```

```

Residuals:
  Min       1Q   Median       3Q      Max
-12.242  -3.548  -1.087   2.831  15.091

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 2.188e+01  3.629e+00  6.030 4.37e-08 ***
date        -4.389e-09  2.618e-09  -1.677  0.0974 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 5.59 on 83 degrees of freedom
(23 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared:  0.03276,    Adjusted R-squared:  0.02111
F-statistic: 2.811 on 1 and 83 DF,  p-value: 0.09737

> summary(lm(Resultat.de.l.analyse~date,nitratesCFNN))

Call:
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = nitratesCFNN)

Residuals:
  Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.5531 -1.5859 -0.6067  0.5734 14.7181

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -4.549e+00  7.421e+00  -0.613  0.545
date         6.391e-09  5.084e-09   1.257  0.219

Residual standard error: 3.248 on 29 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared:  0.05168,    Adjusted R-squared:  0.01897
F-statistic: 1.58 on 1 and 29 DF,  p-value: 0.2188

> summary(lm(Resultat.de.l.analyse~date,nitratesCBYN))

Call:
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = nitratesCBYN)

Residuals:
  Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.44598 -0.05351 -0.03660 -0.01824  0.45884

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 4.557e-01  1.301e-01  3.502 0.000815 ***
date         6.210e-11  9.422e-11  0.659 0.512040
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1946 on 69 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared:  0.006256,    Adjusted R-squared:  -0.008146
F-statistic: 0.4344 on 1 and 69 DF,  p-value: 0.512

> summary(lm(Resultat.de.l.analyse~date,nitratesCEQS))

Call:
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = nitratesCEQS)

Residuals:
  Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.35756  0.00006  0.01774  0.03374  0.25574

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 5.270e-01  6.685e-02  7.883 5.51e-08 ***
date        -4.978e-11  6.083e-11  -0.818  0.422
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1208 on 23 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared:  0.02829,    Adjusted R-squared:  -0.01396
F-statistic: 0.6697 on 1 and 23 DF,  p-value: 0.4216

> summary(lm(Resultat.de.l.analyse~date,nitratesBPVD))

Call:
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = nitratesBPVD)

Residuals:
  Min       1Q   Median       3Q      Max
-22.4608 -4.4592 -0.6835  4.3823 13.3984

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 3.289e+01  1.749e+00 18.800 < 2e-16 ***
date         1.693e-08  2.051e-09  8.255 2.36e-12 ***

```

```

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 6.081 on 81 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared:  0.4569, Adjusted R-squared:  0.4502
F-statistic: 68.15 on 1 and 81 DF, p-value: 2.359e-12

```

```
> summary(lm(Resultat.de.l.analyse~date,HcarbGZFU))
```

```

Call:
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = HcarbGZFU)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-11.374  -4.111  -1.706   1.559  16.250

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.785e+02  9.824e+00  38.53 4.35e-13 ***
date        -2.574e-09  7.349e-09   -0.35  0.733
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.207 on 11 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared:  0.01103, Adjusted R-squared:  -0.07888
F-statistic: 0.1226 on 1 and 11 DF, p-value: 0.7328

```

```
> summary(lm(Resultat.de.l.analyse~date,HcarbGYXL))
```

```

Call:
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = HcarbGYXL)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-11.6932  -4.4467   0.2903   3.6974  10.7411

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.896e+02  1.185e+01  32.879 7.99e-10 ***
date        -3.179e-09  8.880e-09   -0.358  0.73
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.001 on 8 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared:  0.01577, Adjusted R-squared:  -0.1073
F-statistic: 0.1282 on 1 and 8 DF, p-value: 0.7296

```

```
> summary(lm(Resultat.de.l.analyse~date,HcarbGZFV))
```

```

Call:
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = HcarbGZFV)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-7.2751  -5.1963   0.6903   4.0677   7.0539

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.690e+02  9.598e+00  38.44 2.71e-11 ***
date         1.977e-09  7.064e-09   0.28  0.786
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 5.811 on 9 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared:  0.008626, Adjusted R-squared:  -0.1015
F-statistic: 0.07831 on 1 and 9 DF, p-value: 0.7859

```

```
> summary(lm(Resultat.de.l.analyse~date,HcarbFXBB))
```

```

Call:
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = HcarbFXBB)

Residuals:
    88277    88708    89240    89770
-1.5569  0.3755  2.7176 -1.5362

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  4.043e+02  1.882e+01  21.477  0.00216 **
date        -2.261e-08  1.204e-08  -1.877  0.20129
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 2.481 on 2 degrees of freedom

```

```

(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared: 0.6379, Adjusted R-squared: 0.4569
F-statistic: 3.524 on 1 and 2 DF, p-value: 0.2013

> summary(lm(Resulat.de.l.analyse~date,HcarbFWYD))

Call:
lm(formula = Resulat.de.l.analyse ~ date, data = HcarbFWYD)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-103.659  -3.053   0.224   5.637  26.678

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 2.892e+02  8.676e+00  33.338  <2e-16 ***
date        1.134e-08  6.242e-09   1.817  0.0728 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 12.94 on 83 degrees of freedom
(23 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared: 0.03828, Adjusted R-squared: 0.02669
F-statistic: 3.303 on 1 and 83 DF, p-value: 0.07275

> summary(lm(Resulat.de.l.analyse~date,HcarbCFNN))

Call:
lm(formula = Resulat.de.l.analyse ~ date, data = HcarbCFNN)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
 -89.476 -26.267   3.198  29.561 113.094

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 2.158e+02  8.421e+01   2.563  0.0151 *
date        8.999e-08  5.820e-08   1.546  0.1316
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 43.08 on 33 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared: 0.06756, Adjusted R-squared: 0.0393
F-statistic: 2.391 on 1 and 33 DF, p-value: 0.1316

> summary(lm(Resulat.de.l.analyse~date,HcarbCBYN))

Call:
lm(formula = Resulat.de.l.analyse ~ date, data = HcarbCBYN)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
 -19.363  -4.962   1.960   4.421  16.082

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 4.126e+02  5.271e+00  78.266  < 2e-16 ***
date        1.490e-08  3.737e-09   3.987 0.000199 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 6.926 on 55 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared: 0.2242, Adjusted R-squared: 0.2101
F-statistic: 15.9 on 1 and 55 DF, p-value: 0.0001991

> summary(lm(Resulat.de.l.analyse~date,HcarbCEQS))

Call:
lm(formula = Resulat.de.l.analyse ~ date, data = HcarbCEQS)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
 -24.2014  -3.5567  -0.5276   3.4459  13.5556

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 3.494e+02  6.376e+00  54.791  <2e-16 ***
date       -6.700e-09  5.327e-09  -1.258  0.225
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 8.516 on 18 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared: 0.0808, Adjusted R-squared: 0.02974
F-statistic: 1.582 on 1 and 18 DF, p-value: 0.2245

> summary(lm(Resulat.de.l.analyse~date,HcarbBPVD))

Call:

```

```
lm(formula = Resultat.de.l.analyse ~ date, data = HcarbBPVD)
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-18.9492  -3.5392  -0.1933   4.1198  14.4600

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.971e+02  5.260e+00  56.486  <2e-16 ***
date         7.829e-10  5.169e-09   0.151   0.881
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.409 on 17 degrees of freedom
(22 observations effacées parce que manquantes)
Multiple R-squared:  0.001347,    Adjusted R-squared:  -0.0574
F-statistic: 0.02294 on 1 and 17 DF,  p-value: 0.8814
```



LIFE18NAT/FR/000906



Le LIFE Anthropofens est mis en œuvre par :



Avec la participation financière de :

