

# ÉVALUATION DE LA CONTRIBUTION DU PROJET LIFE ANTHROPOFENS AUX SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES LIÉS AUX CYCLES DE L'EAU ET DE L'AZOTE

@M. HERAUDE, CEN

MÉMOIRE DE STAGE DE 3ÈME  
ANNÉE D'ÉCOLE D'INGÉNIEUR

**CAMILLE DÉCULTOT**

---

Dates : 2 avril 2024 - 27 septembre 2024

Tutorats : Adrien Berquer (CEN) et

Cristina Ribaldo (ENSEGID)

Structure d'accueil : Conservatoires d'Espaces Naturels  
des Hauts-de-France



LIFE 18NAT/FR/000906





## Résumé

Les tourbières sont des milieux regorgeant d'une biodiversité remarquable et fournissant de multiples fonctions éco-hydrologiques dont les Hommes bénéficient, sous la forme de services écosystémiques (SE). Ces milieux régressent au fur et à mesure du temps, avec pour principale cause, l'activité humaine (Cubizolle, 2019). Le programme LIFE Anthropofens vise à restaurer six habitats d'intérêt communautaire spécifiques aux milieux tourbeux sur 13 sites Natura2000 dans les Hauts-de-France et en Wallonie. Afin de mesurer les impacts effectifs du projet de restauration sur les sites et notamment sur les cycles de l'eau et de l'azote, une évaluation des services écosystémiques a été mise en place. La restauration devrait permettre l'augmentation de fourniture de certains services écosystémiques. Pour mesurer cela, la méthodologie d'évaluation appliquée se base sur les concepts de la MAES (Mapping and Assessing of ES ; Maes *et al.*, 2016) et de la CICES (Common International Classification of ES, Haines-Young and Potschin, 2013), qui ont permis la sélection de 17 SE, dont 6 services d'approvisionnement (SA), 8 de régulation (SR) et 3 culturels (SC). Grâce à l'approche de la matrice (Maes and Burkhard, 2017), 44 experts ont pu attribuer des notes sur la qualité de fourniture des 17 SE par unité d'habitats. Deux jeux de données ont pu être obtenus sur les qualités avant, puis après les travaux de restauration, grâce à la distinction des habitats initiaux (présents avant restauration) et habitats objectifs du projet. Les résultats à l'échelle du projet montrent une tendance à la hausse pour les SC et SR après projet. Les SA possèdent, eux, une tendance plus contrastée. La suite de l'étude montre, à l'aide d'une analyse en composantes principales (ACP) et d'un modèle linéaire généralisé (GLM), le lien fort entre les caractéristiques de physiognomie (ouvert ou boisé) et de vocation (naturel ou anthropisé) de l'habitat avec la fourniture des services. Un second GLM montre l'importance de la réalisation des travaux sur chaque site concernant la fourniture des SE, et d'ailleurs ce rapport montre les résultats des travaux du projet sur les SE ont également été analysés à l'échelle d'un des sites du projet. Enfin, cette étude montre l'efficacité de la méthode utilisée à collecter et traiter des données, ainsi qu'à permettre la discussion autour des SE fournis par les tourbières basses alcalines des Hauts-de-France et de Wallonie et de leur restauration. Plus globalement, l'évaluation des services écosystémiques permet l'appréciation de la résilience des milieux aux changements climatiques.

## Abstract

Fens are natural areas rich in biodiversity. They provide multiple eco-hydrological functions, that are beneficial to human society and can be presented as ecosystemic services (ES). However, human activities are damaging those systems (Cubizolle, 2019). The LIFE Anthropofens project is aiming to restore 6 typical peatland habitats of major interest to the European Union on 13 sites between regions Hauts de France and Wallonia. To measure the project's impacts on the sites and particularly on the water and nitrogen cycles, an evaluation of ES has been carried out. To do so, the methodology used is based on the notions of MAES (Mapping and Assessing of ES, Maes *et al.*, 2016) and CICES (Common International Classification of ES, Haines-Young and Potschin, 2013). Therefore, 17 ES, divided as 6 Provisioning, 8 Regulation and 3 Cultural services were selected for the study. Then, thanks to the matrix approach (Maes and Burkhard, 2017), experts graded the provisioning of ES by habitat unit. Two major sets of data were collected: one concerning the provisioning of ES before restoration, with the unit of « initial habitats » and the other one using the unit of « target habitats », which led to the provisioning after restoration. The results at the project scale presented a significant improvement for Cultural and Regulation services after restoration. The trend associated with Provisioning services is more contrasted. Then, a PCA and a generalized linear model (GLM) showed the link between the quality of services and both physiognomy and usage of the habitat. Another GLM illustrates the importance of the different sites and states of restoration in the provisioning of services. Results of restoration were, thereafter, studied at the scale of one of the project's sites. Finally, this study responds to the expectations of the LIFE Anthropofens and demonstrate the efficiency of the method used to collect data and to enhance assessment of ES provided by fens in both regions, and thereby discussion concerning their restoration. In the context of global warming, resilience of ecosystems can be assessed with this kind of study.





## Remerciements

Je remercie à mon tuteur Adrien Berquer, chargé d'études scientifiques LIFE Anthropofens et Docteur en écologie des communautés, pour son temps, sa disponibilité et sa patience. Merci également pour son accompagnement, son expertise sur de nombreux sujets (écologie, pédologie, statistiques...) qui m'a beaucoup apporté. Enfin, merci à lui, ainsi qu'à l'équipe du CEN, pour la confiance qui m'a été accordée pour mener à bien ce sujet.

Je remercie également à ma tutrice de l'ENSEGID, Cristina Ribaud, Maître de Conférences à l'École Nationale Supérieure d'Environnement, de Géosciences et d'Ingénierie du Développement durable (ENSEGID), pour l'encadrement de mon stage.

Merci à l'équipe du CEN Hauts-de-France qui m'a tout de suite intégrée. Merci également à eux pour l'aide et les conseils qui m'ont été apportés au cours du stage, pour m'avoir transmis les valeurs de l'association et pour m'avoir fait découvrir les beaux sites naturels des Hauts-de-France !

Merci également à Justine Capoulade pour son travail, qui m'a guidé tout au long du stage.

Enfin, un grand merci reconnaissant à tous les experts qui ont participé à cette étude et grâce à qui ce rapport a pu voir le jour.

Bonne lecture !

Camille Décultot



# Table des matières

|  |    |
|--|----|
| INTRODUCTION.....  | 12 |
| I. PRESENTATION DU CEN .....   | 13 |
| 1. HISTOIRE DU RESEAU DE CEN .....   | 13 |
| 2. FONCTIONNEMENT DES CONSERVATOIRES D'ESPACES NATURELS .....  | 13 |
| 3. MISSIONS REALISEES .....  | 14 |
| 4. DEVELOPPEMENT DURABLE ET RESPONSABILITE SOCIETALE AU CEN.....   | 14 |
| II. CONTEXTE DE L'ETUDE .....  | 15 |
| 1. LES TOURBIERES : CARACTERISATIONS, FORMATION, ENJEUX ET MENACES .....   | 15 |
| A. <i>Caractérisation pédologique</i> .....  | 15 |
| B. <i>La formation de tourbe : la turfigénèse</i> .....  | 15 |
| C. <i>Fonctionnement hydrodynamique des tourbières</i> .....   | 16 |
| D. <i>Types de tourbières et localisations</i> .....   | 16 |
| E. <i>Enjeux écologiques</i> .....   | 17 |
| F. <i>Fonctions éco-hydrologiques (cycles du carbone, de l'eau et biogéochimiques)</i> .....   | 19 |
| G. <i>Services écosystémiques fournis par les tourbières</i> .....   | 22 |
| H. <i>Menaces pesant sur les tourbières</i> .....  | 23 |
| 2. LE PROJET LIFE ANTHROPOFENS.....  | 24 |
| A. <i>Généralités</i> .....  | 24 |
| B. <i>Sites d'intervention</i> .....   | 25 |
| C. <i>Habitats d'intérêt communautaires (HIC)</i> .....  | 29 |
| D. <i>Missions et cadre de l'étude</i> .....   | 31 |
| 3. CADRE METHODOLOGIQUE DE L'ETUDE .....   | 32 |
| A. <i>Echelles des projets LIFE – Guide LIFE</i> .....   | 32 |
| B. <i>CICES</i> .....  | 32 |
| C. <i>Méthode de la MAES</i> .....   | 32 |
| D. <i>Rapport de méthodologie du LIFE Anthropofens</i> .....   | 33 |
| 4. HYPOTHESES ET ATTENDUS DE L'ETUDE .....   | 33 |
| III. MATERIEL ET METHODE .....   | 34 |
| 1. METHODE D'EVALUATION DES SE .....   | 34 |
| A. <i>Identification des services écosystémiques pertinents (CICES)</i> .....  | 34 |
| B. <i>Méthode de quantification des services écosystémiques et choix de l'échelle spatiale d'évaluation (méthode MAES et matrices)</i> ..... | 35 |
| C. <i>Remplissage des matrices à dire d'expert</i> .....   | 39 |
| D. <i>Pondération des notes et jeu de données final</i> .....  | 40 |
| 2. METHODES D'ANALYSES DE DONNEES .....  | 41 |
| A. <i>Analyse de la potentielle évolution des SE après restauration (spiderchart et test statistique)</i> .....                              | 41 |
| B. <i>Détermination des causes écologiques des potentielles évolutions des SE (Analyse en Composantes Principales)</i> .....                 | 42 |
| C. <i>Validation des relations entre variables (Modèles Linéaires Généralisés)</i> .....   | 43 |
| IV. RESULTATS .....  | 44 |
| 1. CONTRIBUTION DES TRAVAUX AUX SE A L'ECHELLE DU PROJET .....   | 44 |
| A. <i>Impact de la restauration sur les services – échelle du projet</i> .....   | 44 |
| B. <i>Facteurs écologiques impactant la fourniture des SE (ACP)</i> .....  | 48 |
| C. <i>Modélisation de la qualité des services écosystémiques par intégration des différentes variables de l'étude</i> .....                  | 58 |
| 2. CONTRIBUTION DES TRAVAUX AUX SE A L'ECHELLE D'UN SITE .....   | 59 |
| A. <i>Impact de la restauration sur les services – échelle d'un site</i> .....   | 59 |
| B. <i>Caractéristiques écologiques des habitats de la BVS_PR_B et fourniture des SE</i> .....  | 63 |

|   |    |
|---|----|
| C. Cartographies des qualités de fourniture des SE sur le site de la BVS_PR_B.....                                | 64 |
| VI. DISCUSSION .....  | 68 |
| 1. INTERPRETATION DES EVOLUTIONS DE QUALITE DE SE APRES RESTAURATION A L'ECHELLE DU PROJET .....                  | 68 |
| A. Les services d'approvisionnement .....   | 68 |
| B. Les services de régulation .....   | 69 |
| C. Les services culturels .....   | 71 |
| 2. INTERPRETATION DES GROUPES DE SERVICES ECOSYSTEMIQUES FONCTIONNELS ET INTERET ECOLOGIQUE A GRANDE ECHELLE..... | 71 |
| 3. INTERPRETATION A L'ECHELLE D'UN SITE .....   | 74 |
| 4. ENSEIGNEMENTS DE L'ETUDE .....   | 75 |
| A. Validation des attendus du projet .....  | 75 |
| B. Utilité d'une étude sur les services écosystémiques.....   | 75 |
| C. Gestion intégrée des sites .....   | 75 |
| D. Reproductibilité de l'étude .....  | 76 |
| 5. PRESENTATION ET COMPARAISON D'ETUDES SIMILAIRES SUR LES SE .....   | 76 |
| 6. LIMITES DE L'ETUDE.....  | 78 |
| A. Limites associées à la conception de la méthode.....   | 78 |
| B. Limites associées à l'évaluation par les experts .....   | 79 |
| C. Limites associées à la temporalité des travaux .....   | 83 |
| CONCLUSION .....  | 84 |
| BIBLIOGRAPHIE .....   | 85 |
| ANNEXES .....   | 89 |
| ANNEXE 1 : CLASSIFICATION ET INDICATEURS DES 17 SE .....  | 89 |
| ANNEXE 2 : TABLEAU DES COEFFICIENTS DU LMB.....   | 91 |
| ANNEXE 3 : TABLEAU DES COEFFICIENTS DU LMA.....   | 96 |
| ANNEXE 4 : RESULTATS DU SITE DES VALLEES DE LA SCARPE ET DE L'ESCAUT.....   | 98 |
| ANNEXE 5 : ABREVIATIONS .....   | 98 |

## Table des figures

|   |    |
|---|----|
| FIGURE 01 : CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE NON-SATUREE IDEALE EN FONCTION DE LA PROFONDEUR (MCCARTER ET AL., 2020) .....  | 16 |
| FIGURE 02 : EXEMPLES DE FLORE DES TOURBIERES .....  | 18 |
| FIGURE 03 : EXEMPLES DE FAUNE DES TOURBIERES .....  | 19 |
| FIGURE 04 : LE CYCLE DU CARBONE DANS LES TOURBIERES (MODIFIE D'APRES CUBIZOLLE, 2019) .....   | 20 |
| FIGURE 05 : LE CYCLE DE L'AZOTE DANS LES TOURBIERES (MODIFIE D'APRES CUBIZOLLE, 2019 ET RYDIN ET AL., 2013) .....   | 21 |
| FIGURE 06 : SCHEMA DU LIEN ENTRE LES ECOSYSTEMES, LES FONCTIONS ECOSYSTEMIQUES, LES SE ET LES BENEFICES TIRES (POTSCHIN ET HAYNES-YOUNG, 2011) .....                      | 22 |
| FIGURE 07 : LOGO DU PROJET LIFE ANTHROPOFENS .....  | 24 |
| FIGURE 08 : CARTOGRAPHIE DES SITES NATURA2000 FRANÇAIS ASSOCIES AU PROJET LIFE ANTHROPOFENS.....  | 27 |
| FIGURE 09A : PHOTOGRAPHIES DES SITES.....   | 28 |
| FIGURE 09B : PHOTOGRAPHIES DES SITES.....   | 29 |
| FIGURE 10 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE TOURBIERE ET DES HIC CARACTERISTIQUES, (MODIFIE DEPUIS LE SITE LIFE ANTHROPOFENS) .....                                      | 30 |
| FIGURE 11 : PHOTOGRAPHIES DES HABITATS CIBLES HIC .....   | 31 |
| FIGURE 12 : EXTRAIT DU TABLEAU ASSOCIANT CICES ET INDICATEURS : « ASSESSING », EXTRAIT DE MAES, ET AL., 2016, LA COULEUR DES POINTS CORRESPOND A LA QUALITE DU LABEL..... | 33 |
| FIGURE 13 : CARTOGRAPHIE DES HABITATS INITIAUX A BELLOY-SUR-SOMME, SITE DE LA BASSE VALLEE DE LA SOMME (FR2200355).....   | 37 |
| FIGURE 14 : LISTE DES HABITATS INITIAUX (H1 A H12) ET OBJECTIFS (H1 A H5 AVEC CODE HIC).....  | 37 |
| FIGURE 15 : SCHEMA DE LA METHODE DES MATRICES, MODIFIE DEPUIS BURKHARD AND MAES, 2017 .....   | 38 |
| FIGURE 16 : MATRICES EXEMPLES DU SITE DE LA BVS_PR_B.....   | 39 |
| FIGURE 17 : TABLEAU FINAL SANS PONDERATION, SANS LES NOMS ET ORGANISMES DE TRAVAIL DES EXPERTS (LES ABREVIATIONS SONT EN ANNEXE 5) .....                                  | 41 |
| FIGURE 18 : SPIDERCHART DE L'EVOLUTION DE LA QUALITE DE FOURNITURE DES SE APRES RESTAURATION POUR TOUS LES SITES DU LIFE .....  | 44 |
| FIGURE 19 : COMPARAISON DES NOTES DE QUALITES DES TYPES DE SE.....  | 45 |
| FIGURE 20 : BOXPLOTS DES NOTES DE QUALITES DE SA, SUR TOUS LES SITES DU LIFE .....  | 46 |
| FIGURE 21 : BOXPLOTS DES NOTES DE QUALITES DE SR, SUR TOUS LES SITES DU LIFE .....  | 46 |
| FIGURE 22 : BOXPLOTS DES NOTES DE QUALITES DE SC, SUR TOUS LES SITES DU LIFE .....  | 47 |
| FIGURE 23 : CERCLE DES CORRELATIONS DE L'ACP SUR LA VARIABLE HABITAT, ENTRE PARENTHESES SUR LES AXES, LE POURCENTAGE D'INERTIE DE L'AXE .....                             | 48 |
| FIGURE 24 : CARTE DE REPARTITION DES INDIVIDUS (SE) DE L'ACP SUR LA VARIABLE « HABITAT ».....   | 49 |
| FIGURE 25 : CARTE DE REPARTITION DES INDIVIDUS PAR CLUSTERS DE L'ACP SUR LA VARIABLE HABITAT.....   | 51 |
| FIGURE 26 : BOXPLOT DES NOTES CALCULEES PAR LE LMB ET SCATTERPLOT DES NOTES DES EXPERTS POUR LES SA (GRIS) EN FONCTION DES HABITATS INITIAUX .....                        | 53 |
| FIGURE 27 : BOXPLOT DES NOTES CALCULEES PAR LE LMB ET SCATTERPLOT DES NOTES DES EXPERTS POUR LES SR (GRIS) EN FONCTION DES HABITATS INITIAUX .....                        | 54 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURE 28 : BOXPLOT DES NOTES PREDITES PAR LE MODELE (BLEU) ET SCATTERPLOT DES NOTES REELLES DES SC (GRIS) EN FONCTION DES HABITATS INITIAUX .....                   | 55 |
| FIGURE 29 : GRILLE DE LA QUALITE DE FOURNITURE DE L'ENSEMBLE DES SERVICES EN FONCTION DE L'ENSEMBLE DES HABITATS ET REGROUPEMENT PAR CLUSTER DEFINIS PAR L'ACP ..... | 56 |
| FIGURE 30 : BOXPLOT DES NOTES CALCULEES PAR LE MODELE LMA ET SCATTERPLOT DES NOTES DES EXPERTS (POINTS) EN FONCTION DES SE .....                                     | 58 |
| FIGURE 31 : SPIDERCHART DE L'EVOLUTION DE LA QUALITE DE FOURNITURE DES SE APRES LES TRAVAUX DE RESTAURATION POUR TOUS LES SITES DU LIFE, POUR LA BVS_PR_B .....      | 59 |
| FIGURE 32 : COMPARAISON DES NOTES DE QUALITES DES TYPES DE SE, SITE BVS_PR_B.....  | 60 |
| FIGURE 33 : COMPARAISON DES NOTES DE QUALITES DES TYPES DE SA, SITE BVS_PR_B .....   | 61 |
| FIGURE 34 : COMPARAISON DES NOTES DE QUALITES DES TYPES DE SR, SITE BVS_PR_B.....  | 61 |
| FIGURE 35 : COMPARAISON DES NOTES DE QUALITES DES TYPES DE SC, SITE BVS_PR_B.....  | 62 |
| FIGURE 36 : CARTOGRAPHIE DES RESULTATS AVANT/APRES RESTAURATION DES SA SUR LE SITE DE LA BVS_PR_B .....  | 65 |
| FIGURE 37 : CARTOGRAPHIE DES RESULTATS AVANT/APRES RESTAURATION DES SR SUR LE SITE DE LA BVS_PR_B.....   | 66 |
| FIGURE 38 : CARTOGRAPHIE DES RESULTATS AVANT/APRES RESTAURATION DES SC SUR LE SITE DE LA BVS_PR_B.....   | 67 |
| FIGURE 39 : SE POTENTIELLEMENT LE PLUS RENDUS PAR LES ZONES HUMIDES REPANDUES DANS LA PRAIRIE DE LA SCARPE ET LA VALLEE DE L'ESCAUT (CAMPAGNE ET AL., 2016).....     | 77 |
| FIGURE 40 : FREQUENCE DES ORGANISMES DE TRAVAIL DU PANEL D'EXPERT .....  | 80 |
| FIGURE 41 : FREQUENCE DES SPECIALITES D'EXPERTISE DU PANEL D'EXPERT .....  | 80 |
| FIGURE 42 : REGRESSION LINEAIRE ENTRE LES NOTES DU SR08 .....  | 81 |
| FIGURE 43 : FREQUENCE DU TEMPS DE REMPLISSAGE DES MATRICES PAR LES EXPERTS.....  | 82 |
| FIGURE 44 : FREQUENCE DU LIEN DES EXPERTS AVEC LES SITES.....  | 82 |

## Table des tableaux

|  |    |
|--|----|
| TABLEAU 01 : CODES NATURA2000, ABREVIATIONS, LOCALITES ET LOCALISATIONS DES SITES DU PROJET LIFE .....   | 26 |
| TABLEAU 02 : SERVICES D'APPROVISIONNEMENT (SA) CHOISIS .....   | 34 |
| TABLEAU 03 : SERVICES DE REGULATION (SR) CHOISIS .....   | 35 |
| TABLEAU 04 : SERVICES CULTURELS (SC) CHOISIS .....   | 35 |
| TABLEAU 05 : SERVICES ECOSYSTEMIQUES D'APPROVISIONNEMENT SELON LA CLASSIFICATION CICES ET LES INDICATEURS D'EVALUATION ASSOCIES POUR L'ETUDE ..... | 36 |
| TABLEAU 06 : NOMBRE DE MATRICES RETOURNEES PAR SITES .....   | 40 |
| TABLEAU 07 : RESULTATS DES TESTS STATISTIQUES DE MANN-WHITNEY, A L'ECHELLE DU PROJET.....  | 47 |
| TABLEAU 08 : BILAN DES RESULTATS DE L'ACP .....  | 52 |
| TABLEAU 09 : RESULTATS DE L'ANOVA DU LMB POUR LES SA.....  | 52 |
| TABLEAU 10 : RESULTATS DE L'ANOVA DU LMB POUR LES SA.....  | 53 |
| TABLEAU 11 : RESULTATS DE L'ANOVA DU LMB POUR LES SC .....   | 55 |
| TABLEAU 12 : BILAN DES REGROUPEMENTS DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES ET DES HABITATS .....   | 57 |
| TABLEAU 13 : RESULTATS DE L'ANOVA DU LMA .....   | 58 |
| TABLEAU 14 : RESULTATS DES TESTS DE MANN-WHITNEY SUR LE SITE DE LA BVS_PR_B .....  | 63 |
| TABLEAU 15 : TABLEAU DES MOYENNES PONDEREES DES QUALITES DES SE PAR HABITATS DE LA BVS_PR_B .....  | 63 |
| TABLEAU 16 : BILAN DES REGROUPEMENTS DES SERVICES ECOSYSTEMIQUES ET DES HABITATS .....   | 72 |

## Introduction

Les tourbières sont des milieux regorgeant d'une biodiversité remarquable et fournissant de multiples fonctions éco-hydrologiques dont les Hommes bénéficient des avantages. En France métropolitaine, ces tourbières représentent 2 000 km<sup>2</sup> et dans le monde, environ 4 millions de km<sup>2</sup>. Cependant, les activités humaines détruisent 5 000 km<sup>2</sup> de tourbières chaque année, au travers de phénomènes de drainage, d'apport de substances polluantes et d'urbanisation (Cubizolle, 2019). C'est dans ce cadre que le programme LIFE Anthropofens s'est développé. Il vise à préserver et réhabiliter les tourbières alcalines (alimentées en eau par la nappe de craie) sur onze sites des Hauts-de-France et deux de Wallonie. Pour ce faire, des travaux de restauration écologique de 6 Habitats d'Intérêt Communautaire (HIC) sont programmés entre 2019 et 2025. L'ensemble des actions de restauration devraient permettre d'optimiser les fonctions éco-hydrologiques des tourbières et *in fine* d'optimiser les services écosystémiques fournis par ces milieux. Ainsi ce rapport s'évertue-t-il à répondre à la question : les changements d'habitats, dus aux travaux de restauration du LIFE Anthropofens, entraînent-ils une évolution de la fourniture des services écosystémiques (SE) liés aux cycles de l'eau et de l'azote des sites concernés ? L'attendu principal de cette étude est d'observer une hausse de fourniture des SE après restauration. Afin d'aller plus loin dans la réflexion, la présente étude émet trois hypothèses sur lesquelles reposent l'essentiel de l'étude. D'abord, les habitats conditionnent la fourniture des SE, puis, des groupes de services peuvent être formés et se rattacher à des typologies d'habitats et enfin, les paramètres les plus influents de l'étude sont les différents sites et l'état des travaux.

Dans ce rapport, nous nous intéresserons d'abord à la structure coordinatrice du projet : le Conservatoire d'Espaces Naturels des Hauts-de-France. Puis, les systèmes tourbeux sont présentés, en s'intéressant à leur caractérisation, leur fonctionnement éco-hydrologique ainsi qu'aux enjeux qu'ils portent et les menaces pesant sur ces systèmes seront évoquées. La suite de l'étude s'attellera plus spécifiquement à vérifier les hypothèses et attendus. Ainsi nous nous intéresserons d'abord au matériel et à la méthodologie de l'étude, qui reprennent les résultats du travail de méthodologie réalisé en 2023 par J. Capoulade sur ce sujet (Capoulade, 2023). Dans ce cadre, la classification internationale des services écosystémiques (CICES, Haines-Young and Potschin, 2013), la méthode de Mapping and Assessing of ES (MAES, Maes *et al.*, 2016 ; Burkhard *et al.*, 2018) et l'approche de la matrice d'évaluation à dire d'experts des SE (Campagne *et al.*, 2016, Burkhard and Maes, 2017) seront utilisées. Une fois le jeu de données présenté, les résultats de fourniture des SE avant la restauration sont comparés à ceux d'après la restauration grâce au test de Mann-Whitney. Puis, grâce à une Analyse en Composantes Principale (ACP) et un clustering selon la méthode des K-means, une distinction de groupes de services favorisés dans les mêmes conditions environnementales est réalisée. Ces propos sont ensuite étudiés sous l'angle d'un modèle linéaire généralisé (GLM) permettant d'affiner la fourniture de chaque service par habitat du projet. Enfin, un second GLM justifie de l'influence de la fourniture des services en fonction de l'état de la restauration et des sites étudiés. Une fois ces résultats obtenus à l'échelle du projet, ils sont déclinés à l'échelle d'un site sélectionné : la basse vallée de la Somme de Pont-Rémy à Breilly (FR2200355). Enfin, les résultats sont discutés autour, d'abord, de plusieurs phases d'interprétation, puis de présentation des enseignements de l'étude, ensuite de comparaison à d'autres études sur les SE à diverses échelles et enfin, de définition des limites de la présente étude.



## I. Présentation du CEN

### 1. Histoire du réseau de CEN

Les Conservatoires d'Espaces Naturels (CEN) sont des associations à but non-lucratif, d'intérêt général, qui ont été créés dans le but de gérer et protéger les espaces naturels sur le territoire français. Les premières associations ont été fondées dans les années 1970 en Alsace, Provence et Lorraine. Par la suite, le réseau de CEN a continué de s'agrandir et en 1989, la fédération des Conservatoires d'espaces naturels a été créée. En 2009, l'action des Conservatoires a fait l'objet d'une reconnaissance spécifique dans l'article 24 de la loi n°2009-967 Grenelle I, datant du 5 août 2009. D'autre part, les conservatoires sont le sujet d'un article de loi du Code de l'Environnement (article L. 414-11 du Code de l'environnement, 12 juillet 2010) statuant l'importance des actions de ceux-ci envers la conservation des habitats naturels, de la faune et de la flore sauvage. En 2011, le décret (n°2011-1251) et arrêté ministériel du 7 octobre 2011 relatifs à l'agrément et aux conditions d'agrément des Conservatoires d'espaces naturels, permettent aux organismes aux fonctions similaires aux CEN, d'être agréés Conservatoires d'espaces naturels. Cette même année, le Fonds de dotation des Conservatoires d'espaces naturels a été créé afin de garantir la pérennité des propriétés confiées au CEN ainsi que leur vocation écologique. Aujourd'hui, ce sont 400 hectares qui sont détenus par le Fonds de dotation et gérés par les CEN. Ensuite, en 2012, les premiers conservatoires agréés ont vu le jour en Picardie, dans le Limousin et en Lorraine. En 2020, les conservatoires d'espaces naturels de Nouvelle-Aquitaine et de Normandie, des Hauts-de-France et d'Occitanie ont été fusionnés respectivement. Enfin en 2021, le réseau s'est agrandi avec les Conservatoires d'espaces naturels de Guyane et d'Ile de France.

En totalité, ce sont 23 conservatoires qui gèrent un réseau de 4 400 sites naturels, couvrant 300 000 hectares sur 4 750 communes (1 commune sur 7) sur l'ensemble du territoire français. De plus, les conservatoires représentent plus de 1 200 salariés et 8 500 adhérents et des milliers de bénévoles.

### 2. Fonctionnement des Conservatoires d'espaces naturels

Les actions des Conservatoires se basent sur la maîtrise foncière et d'usage, permettant d'assurer la préservation de milieux naturels et la gestion en partenariat avec les acteurs locaux. Cinq grandes missions régissent les activités des associations : « connaître », « protéger », « gérer », « valoriser » et « accompagner ». (i) Réalisée en partenariat avec l'Office français pour la biodiversité, les Conservatoires botaniques nationaux et bien d'autres, l'expertise scientifique et technique est la clé de la compréhension des milieux et donc de leur protection.) (ii) A l'échelle nationale, l'implication des Conservatoires dans des programmes liés à la mise en œuvre de politiques nationales et européennes de préservation de la nature est importante, cette implication se concrétise notamment au travers de projets LIFE, de l'élaboration de méthodes « Label bas-carbone », de l'animation de stratégies régionales d'espèces exotiques envahissantes, de plans nationaux d'actions en faveur des espèces menacées. Le réseau des CEN constitue le premier réseau de protection des milieux naturels en France. (iii) La gestion réalisée par le CEN vise à être consensuelle avec les propriétaires, les acteurs locaux, les acteurs socio-économiques et les usagers des sites. Les Conservatoires sont gestionnaires de 112 réserves naturelles, dont 37 réserves naturelles nationales et 75 réserves naturelles régionales. D'autre part, pour chaque site, une fois les enjeux identifiés, les objectifs sont définis et associés à des actions concrètes dans des plans de gestion des sites. (iv) La valorisation se décline autour de la sensibilisation de tous les publics et du développement d'outils de communication et de pédagogie. Des activités, interventions en milieux scolaires ainsi que des chantiers de bénévoles sont organisés régulièrement. Deux manifestations nationales peuvent être citées : Fréquence grenouille avec un grand nombre d'animation pour sensibiliser à la préservation des zones humides et les Chantiers d'automne afin de montrer les enjeux de gestion des sites naturels. (v) Enfin, la dernière valeur, « accompagner » consiste à accompagner

l'animation de politiques publiques relatives à la biodiversité, l'eau et l'agriculture, participant au développement durable des territoires.

### 3. Missions réalisées

J'ai effectué mon stage au Conservatoire d'Espaces Naturels des Hauts-de-France, au sein de l'équipe LIFE Anthropofens ([site LIFE Anthropofens](#)), à l'antenne de la Somme, située à Boves, au sud-Ouest d'Amiens.

En dehors des activités liées au sujet du présent stage, qui seront plus amplement détaillées par la suite, j'ai pu participer à plusieurs actions du CEN. En juin 2024, le CEN, et plus particulièrement l'équipe du LIFE Anthropofens, a organisé un évènement festif sur deux jours : le Festival des tourbières. Celui-ci consistait à réaliser un évènement festif autour des milieux tourbeux. Diverses activités en lien avec les tourbières se déroulaient, en parallèle de multiples stands, dont j'ai animé certains, ayant pour but de sensibiliser le public aux milieux tourbeux. Puis, toujours dans le cadre du projet LIFE Anthropofens, j'ai pu participer et présenter les résultats de cette étude au Colloque du Groupe d'Études des Tourbières, le 11/09/24 (Décultot *et al.*, 2024). J'ai également participé à deux actions de Capture-Marquage-Recapture de deux espèces : le Sténobothre nain (*Stenobothrus stigmaticus*) et la Dectique verrucivore (*Decticus verrucivorus*). J'ai également pu prendre part à une journée de réflexion autour du pâturage en tourbière, avec divers partenaires du LIFE Anthropofens et acteurs du territoire. Enfin, j'ai également eu l'occasion d'accompagner un terrain de prélèvement de carottes de tourbe.

### 4. Développement Durable et Responsabilité Sociétale au CEN

Au travers des cinq valeurs des Conservatoires d'Espaces Naturels, les notions de Développement Durable sont au cœur des actions menées dans le cadre de l'association. De fait, outre les diverses actions telles que le tri des déchets, le compostage, et une consommation responsable, le Conservatoire a vocation de préservation et gestion écologique des espaces naturels. Par exemple, avec la coordination du projet LIFE Anthropofens, il s'évertue à protéger et restaurer des tourbières et participe alors activement à la protection des milieux naturels. Une part importante de ses actions réside dans la sensibilisation du grand public à diverses thématiques environnementales, qui est très présente au travers, par exemple, de l'organisation de sortie nature, de l'installation de panneaux informatifs sur les sites naturels, de chantiers participatifs, etc.... En 2023, le CEN Hauts-de-France a réalisé un diagnostic Carbone : Décarbon'action (en lien avec l'ADEME). Les résultats montrent que la majorité du carbone émis provient de l'achat de biens et de service, surtout liés à l'achat de matériel pour les travaux et entretien des sites, puis les reste des émissions se concentrent autour des cheptels en pâturage, qui participent entre autres au maintien d'une certaine biodiversité sur les sites naturels, et des déplacements, notamment pour se rendre sur les sites. Le Conservatoire travaille à gérer plus durablement des ressources naturelles, notamment, grâce à la rédaction de plans de gestion.

Ensuite, le travail d'équipe est vraiment valorisé et nécessaire au bon fonctionnement du CEN, les compétences collectives sont donc très effectives. La masse salariale respecte, de plus, la parité.

Enfin, le cadre de ce stage répond notamment aux Objectifs du Développement Durable 15 : restaurer les écosystèmes terrestres, 13 : mesures pour lutter contre les changements climatiques et 6 : assurer une gestion durable des ressources en eau. Le projet LIFE Anthropofens visant à restaurer des tourbières alcalines, milieux qui stockent du carbone et participent aux cycles de l'eau et biogéochimiques, répond directement à ces objectifs.

## II. Contexte de l'étude

### 1. Les tourbières : caractérisations, formation, enjeux et menaces

#### A. Caractérisation pédologique

En pédologie, les histosols désignent un sol constitué de tourbe (Baize *et al.*, 2009). Ceux-ci sont des sols hydromorphes où le battement de la nappe reste proche de la surface. En profondeur, l'oxygène peu soluble dans l'eau se raréfie et des conditions anaérobies permanentes se mettent en place. Usuellement, dans des sols oxygénés, la communauté microbienne du sol transforme la matière organique en matière minérale. Or, les conditions anoxiques de la tourbière impliquent l'absence de cette communauté. Ainsi, les végétaux morts, composés de matière organique ne subissent pas de processus de minéralisation et pour les mêmes raisons, ne se décomposent pas (Cubizolle, 2019). Cette accumulation de matière non décomposée constitue la tourbe. La tourbe peut se définir de la sorte : il s'agit d'un matériau bio-hydro-géologique, non remanié, composé à la fois d'une phase liquide composée de la solution du sol et des éléments solubles particuliers transportés et d'une phase solide associant fibres végétales, substances humiques présentes et particules inorganiques minérales amorphes (*e.g.* : les hydroxydes de fer) (Cubizolle, 2019). Dans ce cas, on peut également définir le terme de tourbière tel qu'une zone humide caractérisée par des bilans hydriques assurant une saturation d'eau telle que les conditions anaérobies se développent et permettent l'accumulation de la tourbe et de fait la formation d'un histosol composé, à au moins 30%, de matière organique (Cubizolle, 2019).

Deux couches peuvent se différencier au sein de la tourbe. La première couche, dans laquelle des conditions aérobies peuvent se développer, du fait de la battance de la nappe d'eau. Peuvent alors se développer des phénomènes d'humification et de minéralisation de la matière organique. Cette couche de surface s'appelle l'acrotelme et possède une épaisseur de 5 à 20cm. En dessous de celle-ci se situe la zone du catotelme, en conditions infra-aquatique et anaérobies strictes (Cubizolle, 2019 ; Gobat *et al.*, 2010).

#### B. La formation de tourbe : la turfigénèse

En se basant sur les travaux de Gobat *et al.*, 2010, 4 étapes de la formation de tourbe peuvent être distinguées.

La première, d'une durée approximative de 1 à 10 ans correspond à l'étape principale de production primaire nette des végétaux grâce à la photosynthèse. Une partie de celle-ci évolue de manière « classique » et de manière assez rapide vers des processus de minéralisation et d'humification, produisant du CO<sub>2</sub>. Le reste participe à l'accroissement de la biomasse non décomposée. Puis, dans un second temps et sur une durée approximative de 10 à 100 ans, cette biomasse est accumulée à la surface de l'acrotelme et évolue avec les processus de minéralisation et d'humification ou continue de s'accumuler sous la forme de tourbe peu minéralisée dans l'acrotelme. Par la suite, sur une durée de 100 à 1 000 ans, cette tourbe devient partie intégrante du catotelme ou alors s'accumule sous forme de tourbe humifiée. Enfin cette tourbe continue à se stabiliser dans une durée de 1000 à 10 000 années.

Il est à noter que la végétation des tourbières conditionne la turfigénèse. En effet, certaines communautés de plantes résistent plus ou moins bien aux phénomènes d'humification et de minéralisation. Plusieurs auteurs caractérisent des différences de vitesse entre les espèces caractéristiques des tourbières (Gobat *et al.*, 2010). Ainsi, si les Sphaignes (*Sphagnum spp.*) sont les plus résistantes, les Roseaux (*Phragmites australis*) possèdent également cette qualité. A l'inverse, les autres bryophytes et les laïches semblent se dégrader bien plus rapidement. La turfigénèse est donc également une problématique de communauté de plante.

Dans des conditions optimales, les histosols ont une vitesse d'accumulation de 0,2 à 1,6 mm/an (Baize *et al.*, 2009). En termes d'âge, les tourbières de la basse vallée de la Somme ont commencé à se développer à l'Allerød, il y a environ 13 000 ans (Garcia *et al.*, 2024).

### C. Fonctionnement hydrodynamique des tourbières

Dans la littérature, il est indiqué que l'eau circule beaucoup moins vite dans les histosols que dans les autres types de sols (Cubizolle, 2019). En effet, le régime hydrodynamique de ces types de sols est particulier. La texture de la tourbe est telle qu'elle possède une grande porosité dans sa totalité, pouvant dépasser 90% dans les tourbes fibriques (Duranel, 2016). L'eau circule selon différentes contraintes dans l'ensemble de la masse tourbeuse. Dans les premiers centimètres, les pores possèdent des diamètres allant jusqu'à 1 millimètre, ce sont donc des macropores (Cubizolle, 2019). De fait, l'eau circule verticalement et latéralement aisément en surface. Plus en profondeur, les caractéristiques évoluent rapidement. La compaction de la tourbe combinée à son fractionnement dû aux processus d'humification participe à une diminution de la taille des pores (Cubizolle, 2019). Ces mêmes processus entraînent une diminution nette de la conductivité hydraulique non-saturée en profondeur. De fait, l'eau ne circule quasiment plus à partir de 15 centimètres (fig. 01 ; McCarter *et al.*, 2020).

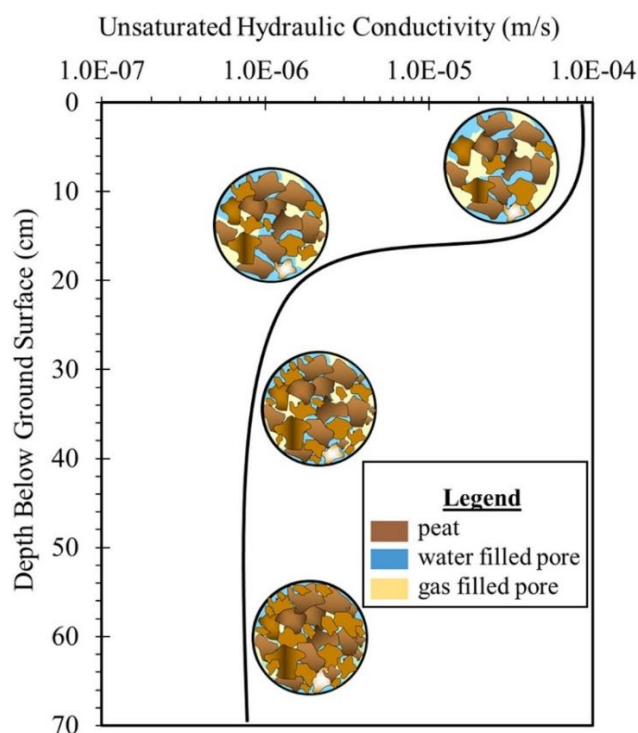


Figure 01 : Conductivité hydraulique non-saturée idéale en fonction de la profondeur (McCarter *et al.*, 2020)

Si l'eau ne circule quasiment plus en profondeur, elle y est toujours très présente, à la fois prise au piège dans les pores ainsi que fixée aux constituants du sol, en raison des forces d'attraction relatives à la tension superficielle à l'interface entre les particules solides et liquides (Cubizolle, 2019).

### D. Types de tourbières et localisations

Deux types majeurs de tourbières peut être différenciés à partir de leur intégration dans le système hydrologique local. Le premier concerne les tourbières nées des précipitations et de l'humidité atmosphérique

et définit alors les tourbières dites « ombrogènes ». Le second groupe caractérise les tourbières qui résultent d'un apport d'eau riche en éléments nutritifs, comme par ruissellement, débordement de rivières, de sources ou encore directement alimentée par les nappes. Ce type décrit les tourbières dites « minérogènes ». De ce groupe descend une sous-classification, en fonction de l'origine de l'eau ayant mené à la formation de la tourbière. Par exemple, il existe les tourbières minérogènes soligènes, résultant du ruissèlement qui alimente en eau un versant ou un fond de vallée. Pour un autre exemple, les tourbières minérogènes topogènes sont le résultat de l'affleurement de la nappe phréatique locale, également parfois qualifiées de phréatogènes (Cubizolle, 2019). A noter que ces dénominations peuvent être plus transversales, par exemple, les tourbières topogènes sont également « fluviogènes », car souvent sensibles aux crues.

Pour ce qui est de la répartition mondiale, la superficie totale s'élèverait entre 3,2 et 5 millions de km<sup>2</sup>. Il est estimé que 90% des tourbières se situe en zones boréales et subarctiques et 10% dans les zones intertropicales (Cubizolle, 2019). Pour citer quelques chiffres, trouvés dans la littérature la Fédération de Russie et le Canada sont les pays comportant le plus de surface de tourbières avec respectivement 1 390 000 km<sup>2</sup> et 1 235 000 km<sup>2</sup> soit 8% et 12% des deux territoires. Dans le classement, arrivent ensuite les Etats-Unis, l'Indonésie et le Congo (République démocratique du Congo et République du Congo) avec respectivement 625 001 km<sup>2</sup>, 206 950 km<sup>2</sup> et 148 000 km<sup>2</sup>. En ce qui concerne l'Europe, la surface des tourbières est estimée entre 500 000 et 600 000 km<sup>2</sup>, avec en tête de classement européen la Finlande, la Suède, la Norvège et la Biélorussie. La France métropolitaine comporte 2 000 km<sup>2</sup> de tourbière, le département d'outremer de la Guyane en comporte 8 000 km<sup>2</sup>, soit respectivement 0,3% et 3% des deux territoires (Joosten and Clarke, 2002 ; Cubizolle, 2019).

#### E. Enjeux écologiques

Les milieux tourbeux représentent un hot spot de biodiversité. Il est estimé que les tourbières accueillent 45% de mammifères menacés, vulnérables ou en danger, au même titre que 33% d'oiseau (Cubizolle, 2019). En ce qui concerne la flore, de nombreuses et diverses espèces sont présentes dans les tourbières, cependant peu sont inféodées. La première espèce caractéristique à citer sont les sphaignes (*Sphagnum*), principal matériel constitutif de la tourbe, mais se trouvent également dans les tourbières des macrophytes, comme le genre *Phragmites* ou *Typha* ; des plantes carnivores, comme celles du genre *Drosera* ; des arbres, comme le saule (*Salix*) ou le bouleau (*Betula*) ; des champignons ; des lichens, etc...

Pour citer quelques exemples de flore caractéristique (fig. 02) : la fougère à crête (*Dryopteris cristata*), *Scorpidium cossoni*, *Scorpidium scorpioides*, ou des espèces moins inféodées, comme : l'Orchis négligé (*Dactylorhiza praetermissa*), le Trèfle d'eau (*Menyanthes trifoliata*), la Potentille des marais (*Comarum palustre*), le Marisque (*Cladium mariscus*), le Liparis de Loesel (*Liparis loeselii*), l'Épipactis des marais (*Epipactis palustris*), la Gesse des marais (*Lathyrus palustris*), la Grande Douve (*Ranunculus lingua*), etc...





Figure 02 : Exemples de flore des tourbières : a) la fougère à crête ; b) *Scorpidium cossoni* ; c) *Scorpidium scorpioides* ; d) le Trèfle d'eau ; e) le Marisque ; f) le *Liparis de Loesel* sources : CEN : @A. Gazaix, @M.James, @N.Caron ; CBNBL : @F.Hendoux ; SMBSGLP : @B.Blondel

Pour ce qui est de la faune spécifique, les tourbières regorgent d'une biodiversité remarquable (fig. 03). Les habitats tourbeux abritent notamment de nombreuses espèces (généralement pas inféodées) d'oiseaux, comme le Butor étoilé (*Botaurus stellaris*), le Busard des roseaux (*Circus aeruginosus*), le Balbuzard pêcheur (*Pandion haliaetus*) ou encore le Blongios nain (*Ixobrychus minutus*). En ce qui concerne les reptiles et les batraciens, ces habitats sont favorables aux espèces telles que la Vipère péliade (*Vipera berus*), le lézard vivipare (*Zootoca vivipara*), la grenouille des champs (*Rana arvalis*) ou le Triton crêté (*Triturus cristatus*). Les tourbières fournissent un habitat également favorable à de multiples espèces d'Euarthropode, par exemple la Dolomede des marais (*Dolomedes fimbriatus*), l'Aeschne azurée (*Aeshnea caerulea*), la Leucorrhine douteuse (*Leucorrhinia dubia*), l'Azuré des mouillères (*Maculinea alcon*), le Fadet des tourbières (*Coenonympha tullia*), etc. Enfin, l'espèce notable du Vertigo des moulins (*Vertigo moulinsiana*) est caractéristique des mollusques en tourbières.



Figure 03 : Exemples de faune des tourbières : a) Blongios nain ; b) Vipère péliade ; c) Azuré des mouillères et d) Vertigo étroit ; sources : INPN : @J.Siblet, @J.C.de Massary, @P.Peyrache ; CEN : @D.Top

#### F. Fonctions éco-hydrologiques (cycles du carbone, de l'eau et biogéochimiques)

Un autre enjeu majeur des tourbières est le stockage de carbone. Comme expliqué précédemment, la tourbe se compose d'au moins 30% de matière organique, provenant de la très lente, voire inexistante décomposition de la matière organique contenue dans les végétaux. Il est assez difficile d'estimer précisément la quantité de carbone stockées par les tourbières, mais visiblement un chiffre moyen s'élèverait à 450 milliards de tonnes de carbone (Cubizolle, 2019). Il est établi que cela correspondrait à 20% du carbone stocké dans les sols de la planète et 60% du carbone stocké dans l'atmosphère (Joosten, 2016). Le cycle du carbone dans les tourbières constitue un réel enjeu. Détruire ou détériorer les tourbières engendrerait le relargage de l'ensemble du carbone qui y a pu être stocké.

Le « bilan carbone » des tourbières se décompose en plusieurs flux. Les flux d'entrées, principalement composés du stockage du carbone organique des plantes, assimilé par photosynthèse. Les flux de sortie sont le résultat de la nutrition des plantes dans l'acrotelme et de l'oxydation du méthane produit par les archées dans la zone anoxique du catotelme (Cubizolle, 2019). Ainsi, les tourbières sont-elles le siège de nombreux flux de carbone (fig. 04).

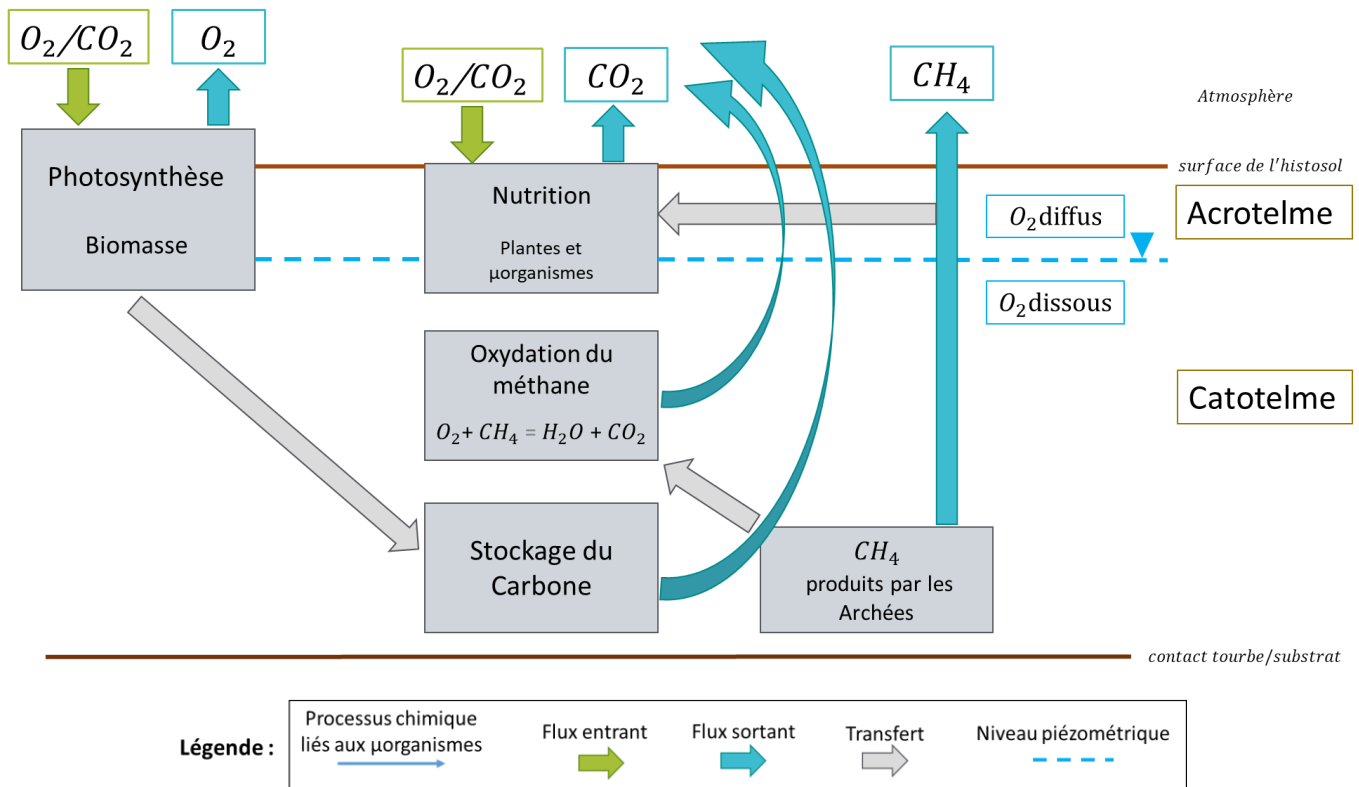


Figure 04 : Le cycle du carbone dans les tourbières (modifié d'après Cubizolle, 2019)

Le deuxième enjeu associé aux tourbières réside dans l'intégration du système tourbeux au cycle de l'eau. En raison de la multiplicité des types de tourbières, le schéma associé peut varier. Cependant, une fonction écosystémique des tourbières reste similaire : l'amortissement des crues. Plusieurs phénomènes permettent d'expliquer le ralentissement des flux d'eau : la pente associée aux tourbières est souvent faible, la végétation de surface assez dense et la porosité de surface importante. Le volume n'est pas significativement diminué mais l'onde de crue est retardée (Cubizolle, 2019). Une autre fonction attribuée aux tourbières se constitue de leur capacité à retenir l'eau. En effet, si les pores de la tourbe sont assez rapidement saturés lors d'épisodes pluvieux, la conductivité hydraulique diminuant verticalement, un stockage d'eau se réalise dans le catotelme. Les multiples pores de petites tailles de celui-ci piègent l'eau. Bien que sensible aux variations de nappe, la tourbière permet un continuum entre la nappe quasi-affleurante et le volume stocké dans la tourbière via le réseau de pores (Evans, *et al.*, 1999). Les fonctions hydrauliques des tourbières sont souvent représentées sous la forme d'une éponge. Wastiaux (2008) décrit cette appellation en rappelant que si les tourbières stockent de l'eau, elles ne peuvent pas la transmettre au milieu en raison de leur faible conductivité hydraulique. Ainsi, il est difficile d'imaginer avec le modèle actuel que les tourbières participent significativement à un soutien d'étiage. Dans la littérature se trouvent tout de même quelques cas de tourbières avec des suintements ou des fissurations du socle permettant un soutien d'étiage, mais reste, visiblement, marginal (Cubizolle, 2019). Même si cette fonction « d'éponge » ne semble pas appropriée pour les questions de restitution d'eau, les tourbières stockent énormément d'eau et jouent un rôle crucial dans le maintien des nappes de surface locales, ce sont donc des zones humides à enjeu majeur.

Une autre fonction présentée par les tourbières est la filtration des polluants. Plus largement, les tourbières prennent part aux cycles biogéochimiques de nombreux éléments. En effet, les tourbières, notamment du type minérogènes, sont le réceptacle d'eaux de diverses provenances (précipitation, ruissellement, nappes ...) et donc de qualités tout aussi diverses. Finalement, ce sont en grande partie les communautés végétales qui assimilent les polluants dans leurs cellules lors de leur croissance. Ainsi, les éléments tels que les produits



azotés, les composés sulfatés, les substances toxiques comme les polluants organiques et les métaux lourds, sont en partie stockés dans la végétation. Ces végétaux morts, dans des conditions optimales de la tourbière ne se décomposent que peu, donc les éléments assimilés ne sont pas libérés dans les eaux du bassin versant (Cubizolle, 2019 ; Price *et al.*, 2016). Le cycle de l'azote est tout-à-fait intéressant dans les tourbières (fig. 05). L'azote organique stocké dans la végétation est susceptible d'être transformé en ammonium ( $NH_4^+$ ) par l'action des organismes décomposeurs qui minéralisent cette matière organique. L'ammonium présent dans les sols est soit directement la source d'apports externes ou de cette transformation chimique. Un fois présent dans l'acrotelme, soit il migre vers le catotelme, soit il est nitrifié. De même le nitrate ( $NO_3^-$ ) provient soit de la précédente transformation ou alors directement d'apports extérieurs et peut alors migrer vers le catotelme. Une fois ces composés dans la partie inférieure du massif de tourbe, les bactéries méthanogènes transforment les nitrates en diazote ou en oxyde d'azote ( $N_2O$ ), qui est un gaz à effet de serre (Cubizolle, 2019). Le relargage de ce gaz est favorisé par la minéralisation de la tourbière, c'est-à-dire si les conditions sont aérobies sur une grande partie du massif tourbeux, et que donc la nappe n'affleure pas suffisamment proche du sol pour conserver la tourbe dans des conditions optimales (Joosten, *et al.*, 2016). En somme, le bilan de capacité de stockage des polluants et nutriments en excès n'est effectif que dans des conditions optimales de fonctionnement des tourbières. D'autre part, la structure de la végétation est telle que les tourbières peuvent stocker des sédiments et donc les nutriments et polluants stockés dans ceux-ci (Price *et al.*, 2016). La littérature semble indiquer d'autre part que l'augmentation en nutriment implique une diminution des Sphaignes constitutive de la tourbe. En effet, la compétition dans un tel milieu est plus difficile et les sphaignes avantagées par un milieu faible en nutriment tendent à se dégrader, menant de fait à la dégradation de la tourbe (Cubizolle, 2019). Ainsi, les tourbières permettent un stockage des polluants et nutriments de même que la filtration des eaux mais dans une limite directement liée à la conservation de la qualité de tourbe.

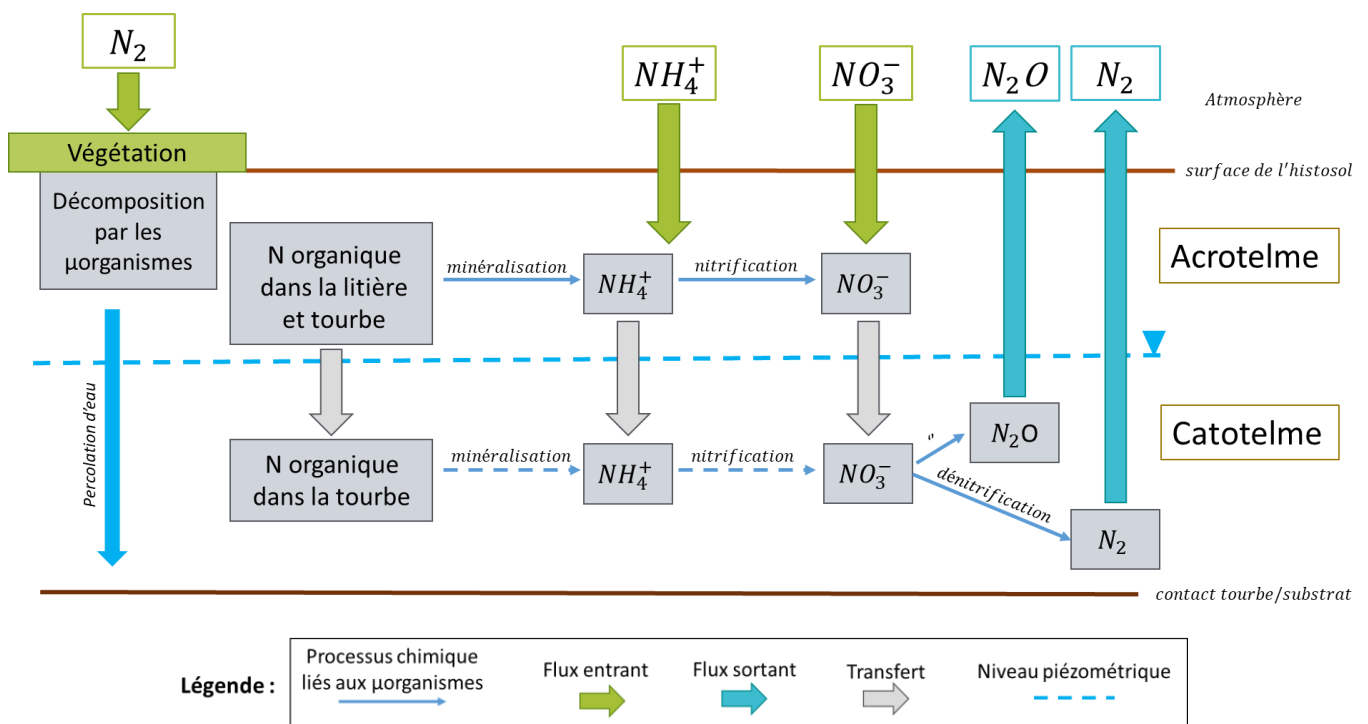


Figure 05 : Le cycle de l'azote dans les tourbières (modifié d'après Cubizolle, 2019 et Rydin *et al.*, 2013)

A la suite de la présentation de ces trois cycles (eau, carbone et azote) dans lesquels les tourbières jouent un rôle majeur. Il semble important de souligner que si les fonctions associées de stockage du carbone sont la conséquence d'une tourbière fonctionnelle et en bon état. Les cycles de l'eau et biogéochimiques

conditionnent directement ce bon état. Grâce à ces deux cycles précédents, dans le cas d'une tourbière en bon état, les fonctions permettant la filtration des nutriments et polluants, le stockage de carbone, ainsi que les retards de crues peuvent également être effectives.

L'ensemble de ces fonctions sont au cœur des préoccupations humaines actuelles. Finalement, les Hommes peuvent directement tirer avantages de tels milieux dans le cadre de lutte contre le changement climatique, ou contre les risques naturels. Cela fait appel à la notion de services écosystémiques.

### G. Services écosystémiques fournis par les tourbières

Les tourbières sont généralement présentées comme des milieux permettant la fourniture de nombreux services écosystémiques. La notion de service écosystémique (SE) pourrait se définir comme les bénéfices que les Hommes obtiennent des écosystèmes (MEA, 2005). Il s'agit d'un outil tout-à-fait adéquat pour sensibiliser sur l'importance de la préservation de la nature dans un large panel de domaines (Burkhard, *et al.*, 2018 ; Bonn *et al.*, 2016). En reliant les Hommes au milieu naturel par le biais d'avantages que peuvent être tirés des écosystèmes, ils peuvent influencer les politiques d'aménagement en faveur du développement durable et du bien-être humain. Plus spécifiquement, ils représentent une première approche de la valeur économique de tels écosystèmes. Le manque de prise en compte des valeurs économiques des écosystèmes est un facteur majeur dans la dégradation et la destruction des écosystèmes (MEA, 2005).

Le terme de service écosystémique est né dans les années 1970, dans le simple but de mettre en valeur le lien d'interdépendance entre la nature et les sociétés humaines (Gómez-Baggethun, *et al.*, 2010). Puis, cette notion a été l'objet d'un plus vaste intérêt lors de sa publication par le Millenium Ecosystem Assessment (MEA, 2005 ; Bonn *et al.*, 2016). Des études à grande échelle se mettent alors en place, comme le UK National Ecosystem Assessment (UKNEA, 2011), qui a mis en valeur la perte des écosystèmes et ses dangereuses conséquences sur l'ensemble du territoire du Royaume-Uni, notamment concernant les tourbières.

Des liens entre les fonctions écologiques des milieux et les services écologiques fournis par ceux-ci ont été établis (Potschin et Haynes-Young, 2011) (fig. 06).

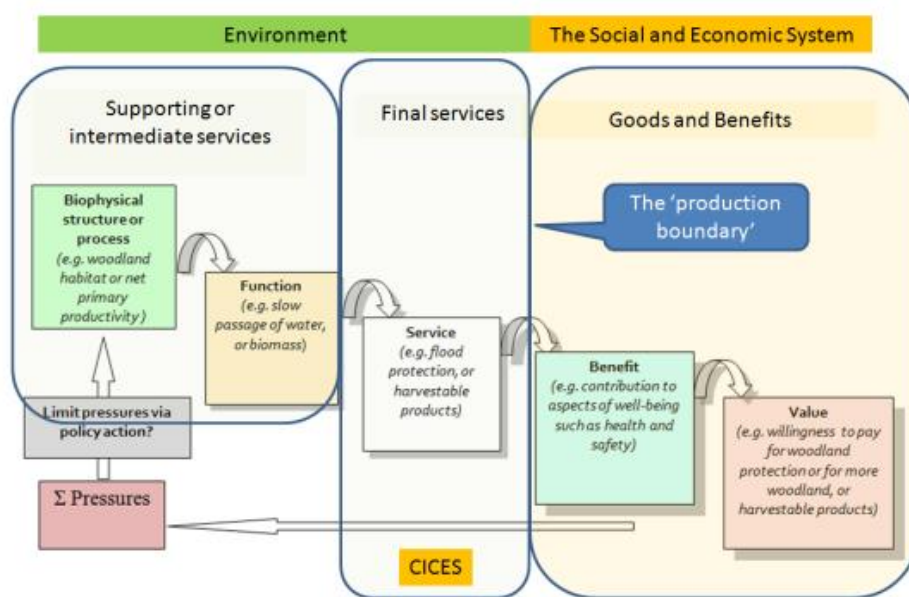


Figure 06 : Schéma du lien entre les écosystèmes, les fonctions écosystémiques, les SE et les bénéfices tirés (Potschin et Haynes-Young, 2011)

Ainsi, un premier panel de services écosystémiques, passés ou actuels et directement tiré des fonctions fournies par les tourbières peut être dressé (Bernard, 2016). Tout d'abord, trois services concernant la fourniture de biens aux Hommes. Le premier service concerne l'approvisionnement en fibre, par l'exploitation de la tourbe : utilisée par exemple pour filtrer des effluents de fosses septiques ou comme comburant énergétique, bien que ce ne soit plus le cas en France. Puis, l'approvisionnement en bois : les tourbières ont souvent été le siège de populiculture ou d'essais de plantation pour de la sylviculture intensive, menant malheureusement à leur destruction. Enfin les tourbières sont des sites favorables au pâturage extensif et à la fauche. Ces trois services sont le résultat des fonctions liées aux processus de turfigénèse et de la structure des habitats. Puis, de nombreux services sont liés au cycle de l'eau des tourbières, comme explicité plus tôt, les tourbières jouent un rôle dans la lutte contre les risques d'inondation, par la capacité de stockage superficiel, sa faible conductivité hydraulique et la rugosité de sa végétation. Certaines tourbières participent d'autre part au soutien d'étiage, même si ce service n'accorde pas la communauté scientifique (Wastiaux, 2008 ; Cubizolle, 2019). Il fait également appel aux fonctions inhérentes à la structure de l'histosol et de la structure des habitats. Ces mêmes fonctions permettent également la régulation de la qualité de l'eau transitant ou stockée par les tourbières. D'autre part, la capacité de stockage de carbone, participe directement à un service de régulation du climat mondial. En effet, si les tourbières représentent 3% des terres émergées, elles représentent également le double du carbone stocké dans les forêts, quand ces dernières représentent 30% des terres émergées (Joosten and Couwenberg, 2009). Enfin, les tourbières sont le siège de connaissances archéologique et de paléoécologique avec des valeurs historiques et scientifiques (Gearey and Fyfe, 2016). En effet, dans les tourbières, il est possible de retrouver des macro-restes de végétaux non-décomposés par les tourbières datant de plusieurs années, voir centaines et milliers d'années. Les tourbières de la Somme ayant commencé à se former il y a 13 000 ans, il s'agit d'une ressource fiable permettant de reconstituer les climats passés (Garcia *et al.*, 2024). Par ailleurs, ce même processus de turfigénèse et l'absence de corps décomposeurs ont permis de parfaitement conserver des items archéologiques conservés dans la tourbe.

#### H. Menaces pesant sur les tourbières

Différentes estimations du recul des tourbières existent, mais en moyenne, 5 000 km<sup>2</sup> de tourbières sont détruits chaque année dans le monde (Cubizolle, 2019), ce qui représente plus de deux fois la surface des tourbières en France métropolitaine.

Plusieurs menaces planent sur les écosystèmes tourbeux. Premièrement, la capacité de comburant des tourbières étant mondialement connue, l'inquiétude se fait sentir quant à la diminution des gisements pétroliers rentables économiquement parlant. En effet, par le passé, les tourbières étaient exploitées pour en extraire la tourbe et la faire brûler. Bien que la capacité calorifique des tourbes soit nettement inférieure à celle de la houille ou du charbon, elle est assez facile à exploiter (Cubizolle, 2019).

D'autres valorisations économiques des tourbières menacent ces écosystèmes. En effet, la mise en culture et la mise en pâturage dégradent les tourbières. Généralement, celle-ci s'accompagne de drainage, asséchant les tourbières et abaissant le niveau moyen de la nappe d'eau, ce qui engendre la dégradation de la tourbière par minéralisation (Cubizolle, 2019). D'autre part, l'abaissement du niveau d'eau, la minéralisation et la diminution de la capacité de stockage de l'eau tend à la subsidence des tourbières de quelques millimètres à centimètres par an (Price *et al.*, 2016). Cela induit la diminution des fonctions éco-hydrologiques fournies par les systèmes tourbeux et amène au relargage de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. D'autre part, les tourbières sont en partie le réceptacle des eaux de ruissellement. Le territoire picard se situe au cœur de plateaux de terres limoneuses extrêmement fertiles, les sols de la région sont donc profondément marqués par l'activité agricole et économique de la région (François, 2021). Ainsi, les ruissellements d'eau provenant des terres agricoles et

urbanisées sont souvent chargées de fertilisants, de métaux lourds et de polluants divers. De fait, les milieux tourbeux sont résilients mais montrent des limites, comme la compétitivité du milieu assez pauvre en nutriments entre les Sphaignes et les macrophytes, qui s'avère défavorable aux sphaignes dans un milieu chargé en nutriments (Cubizolle, 2019).

Enfin, la dernière principale menace des tourbières réside dans sa destruction en faveur de l'expansion urbaine. Quelques exemples peuvent être cités, comme les aéroports de Zurich (Suisse) et Kuala-Lumpur (Malaisie), construits tous les deux sur des tourbières. Ce qui pour ce dernier, a valu sa fermeture au pendant plusieurs jours à la suite de feux de tourbières en 1997 (Page *et al.*, 2002). Un autre exemple se présente dans les régions ventées d'Europe, comme en Ecosse ou en Irlande, où l'implantation d'éolienne affecte l'occupation des sols, non pas particulièrement avec les éoliennes à proprement parler, mais plus généralement avec la construction de réseau routier ou de chemin d'accès à proximité (Cubizolle, 2019).

Finalement, la préservation des tourbières est une problématique majeure pour plusieurs causes environnementales présentées précédemment : la faune et la flore exceptionnelles des tourbières ainsi que les fonctions liées aux différents cycles du carbone, de l'eau et biogéochimiques. Malheureusement, les changements climatiques associés aux activités humaines pourraient dégrader ces écosystèmes dans un futur proche. C'est alors dans ce cadre que le projet LIFE Anthropofens s'est développé.

## 2. Le projet LIFE Anthropofens

### A. Généralités

Le projet LIFE Anthropofens est un projet porté par le Conservatoire d'Espaces Naturels des Hauts-de-France concernant la restauration et l'amélioration de l'état de conservation de tourbières alimentées par les nappes situés dans des sites Natura2000 dans les Hauts-de-France et en Wallonie (fig. 07).



Figure 07 : Logo du projet LIFE Anthropofens

La dénomination LIFE signifie L'Instrument Financier pour l'Environnement et désigne un outil de soutien de projets de l'Union Européenne. Plus précisément dans le cadre de ce projet, il s'agit d'un LIFE Nature et Biodiversité, engageant des études de préservation et d'étude de la biodiversité en Europe. Le mot Anthropofens est le résultat de la fusion de deux mots : « Anthropocène », qui rappelle la proposition d'appellation de l'ère géologique actuelle, dans laquelle l'Homme occupe une place majeure ; et « Fens » le mot anglais désignant les tourbières alimentées par les nappes d'eau affleurantes. Plus particulièrement, ce programme s'intéresse aux tourbières alimentées par des nappes au contact d'un substrat crayeux. Il en résulte un approvisionnement en eau chargée en calcium. Ces tourbières sont alors qualifiées « d'alcalines ».

Trois objectifs sont associés au projet. Le premier est d'assurer la conservation des habitats de tourbières alcalines en optimisant le fonctionnement éco-hydrologique des complexes tourbeux. Le deuxième s'intéresse au développement de modes de gestion visant à l'amélioration de l'état de conservation de l'ensemble des habitats des tourbières alcalines. Enfin, le dernier objectif concerne la mise en réseau des principaux acteurs des tourbières alcalines des Hauts-de-France et de Belgique. Le projet LIFE s'attèle à répondre aux multiples

enjeux associés aux tourbières présentés précédemment. Assez concrètement, ces objectifs se déclinent en actions sur sites, comme celles concernant la protection de la ressource en eau : « Favoriser l'épuration de l'eau avant son entrée dans les zones tourbeuses en permettant le développement de végétations héliophytes », qui se traduit en des travaux de reprofilage de berges, de creusement de fossé en bordure de site, d'installation de radeaux d'héliophytes flottants. Ou encore l'objectif « Maintenir des niveaux d'eaux suffisants pendant une durée adaptée », se présente comme des travaux de désenvasement de sources, d'installation d'infrastructure de régulation des niveaux d'eau (batardeaux, seuils), de suppression des réseaux de drainage et de reprofilage de berge de cours d'eau. Pour ce qui concerne la préservation et la restauration des habitats, les travaux sur sites vont se concentrer sur de l'étrépage (suppression de la couche dégradée de tourbe en surface), du débroussaillage, des abattages d'arbres pour rouvrir le milieu.

De nombreux partenaires sont associés à ce projet. Les partenaires bénéficiaires du projet sont le Département de l'Oise, le Conservatoire Botanique National de Bailleul, le Conservatoire du Littoral, délégation Manche Mer du Nord, Natagora, le Parc Naturel Régional Scarpe-Escaut, le Syndicat Mixte Baie de Somme Grand Littoral Picard, le Syndicat mixte Oise-Aronde et le Conservatoire d'Espaces Naturels des Hauts-de-France, ainsi que la Fédération d'Espaces Naturels. Les partenaires financiers sont le programme LIFE de l'Union Européenne, l'agence de l'eau Artois-Picardie, l'agence de l'eau Seine-Normandie, l'Office Français de la biodiversité, le conseil départemental de l'Oise et la fondation Coca-Cola. Enfin les partenaires institutionnels sont les conseils départementaux de l'Aisne, de la Somme, la DREAL Hauts-de-France, la région Hauts-de-France et l'EPTB Somme-Ameva.

Ce projet dure 5 ans, de 2019 à 2025, a un budget de 18,7 millions d'euros et concerne 13 sites du réseau Natura2000. Concrètement, il vise à améliorer et restaurer 480 hectares de tourbières entre les Hauts-de-France et la Wallonie ([site LIFE Anthropofens](#))

## B. Sites d'intervention

Parmi les treize sites du projet, deux sont en Wallonie et onze sont répartis dans les Hauts-de-France (fig. 08). Six de ces sites sont situés dans le département de la Somme, deux sont dans le département du Pas-de-Calais, un dans le département du Nord, un dans l'Oise, un dans l'Aisne (fig. 09a et b). Dans ces treize sites de nombreuses localités sont de fait concernées, les sites Natura2000 sont donc divisés en plusieurs entités. Au cours du rapport des abréviations pour les sites seront utilisées (tab. 01).

| Nom site Natura 2000  | Abréviation | Code N.2000 | Entités   | Localisation  |
|---|-------------|-------------|---|---------------|
| <b>Les Marais de la Souche</b>  | MS          | FR2200390   | Marais Saint-Boétien - PIERREPONT                                     | Aisne         |
|   |             |             | Marais Nivart - LIESSE-NOTRE-DAME                                     |               |
|   |             |             | Grand Marais LIESSE-NOTRE-DAME  |               |
| <b>La Forêts de Raismes / Saint Amand / Wallers et Marchiennes et plaine alluviale de la Scarpe</b> | SCARPE      | FR3100507   | Tourbière de VRED<br>Tourbière de MARCHIENNES<br>Marais de SONNEVILLE | Nord          |
| <b>Les marais de Sacy</b>   | SACY        | FR2200378   | Sacy-le-Grand   | Oise          |
|   |             |             | Monceaux  |               |
| <b>Les Prairies et Marais Tourbeux de la Basse Vallée de l'Authie</b>                               | PMTBVA      | FR3100492   | Marais du Haut-Pont - DOURIEZ   | Pas-de-Calais |
|   |             |             | Marais de ROUSSENT  |               |
| <b>Les marais de Balançon</b>   | BALAN       | FR3110083   | Marais de Villiers - SAINT-JOSSE                                      | Pas-de-Calais |
| <b>Les Marais de la Moyenne Somme entre Amiens et Corbie</b>  | MMS_A_C     | FR2200356   | Grand marais de la queue à BLANGY-TRONVILLE                           | Somme         |
| <b>Les Tourbières et Marais de l'Avre</b>   | TMA         | FR2200359   | Marais de Génonville - MOREUIL  | Somme         |
|   |             |             | Marais de HAILLES   |               |
|   |             |             | Marais communal de THEZY-GLIMONT                                      |               |
|   |             |             | RNN de l'Etang Saint-Ladre - BOVES                                    |               |
| <b>Moyenne Vallée de la Somme</b>   | MVS         | FR2200357   | Eclusier-Vaux<br>Frise<br>Morcourt                                    | Somme         |
| <b>La Basse Vallée de la Somme de Pont-Rémy à Breilly</b>   | BVS_PR_B    | FR2200355   | Marais des communes - LONG  | Somme         |
|   |             |             | Marais de BELLOY-SUR-SOMME  |               |
|   |             |             | Marais de la CHAUSSEE   |               |
|   |             |             | Marais de TIRANCOURT  |               |
| <b>Les Marais et Monts de Mareuil-Caubert</b>   | MMMC        | FR2200354   | Marais des Quarante MAREUIL-CAUBERT                                   | Somme         |
|   |             |             | Marais Duno - BRAY-LES-MAREUIL  |               |
|   |             |             | Marais communal d'EAUCOURT-SUR-SOMME                                  |               |
|   |             |             | Marais d'EPAGNE-EPAGNETTE<br>Marais communaux de MAREUIL-CAUBERT      |               |
| <b>Les Marais Arrière Littoraux Picards</b>   | MALP        | FR2200347   | Marais de la belle Nonnette - Vallée du Pendé - VILLERS-SUR-AUTHIE    | Somme         |
|   |             |             | Marais de la Maye - REGNIERE-ECLUSE - RUE                             |               |
|   |             |             | Prés de l'Etang - RUE   |               |
| <b>Bassin de la semois de Etalle à Tintigny</b>   | BSET        | BE34056     | La Plate dessous les Monts  | Wallonie      |
| <b>Marais de la Haute-Semois et Bois de Heinsch</b>   | MHS&BH      | BE34057     | Fouches   | Wallonie      |
|   |             |             | Heinsch   |               |
|   |             |             | Petit-Viver   |               |
|   |             |             | Sampont   |               |

Tableau 01 : Codes Natura2000, abréviations, localités et localisations des sites du projet LIFE



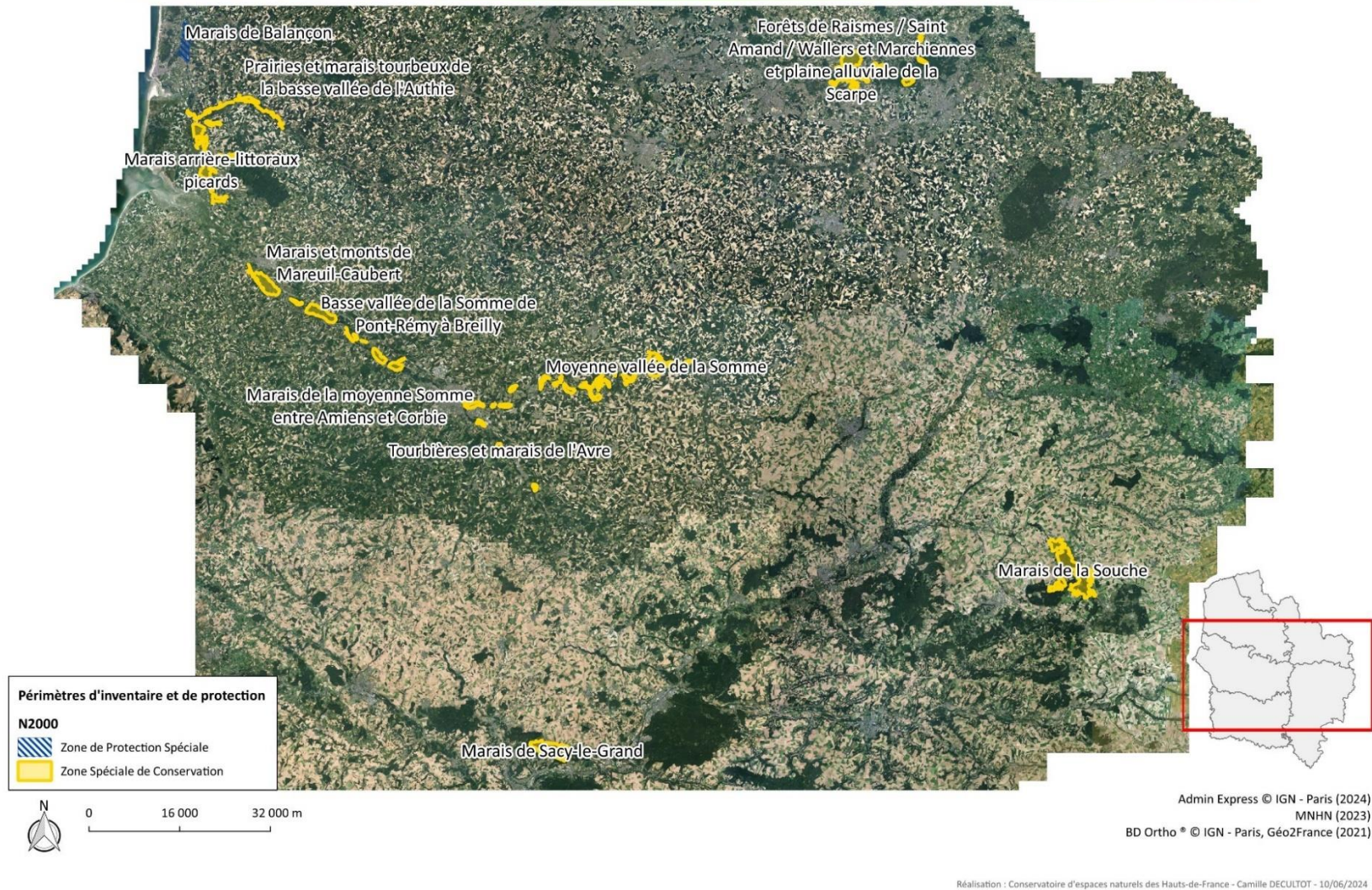


Figure 08 : Cartographie des sites Natura2000 français associés au projet LIFE Anthropofens



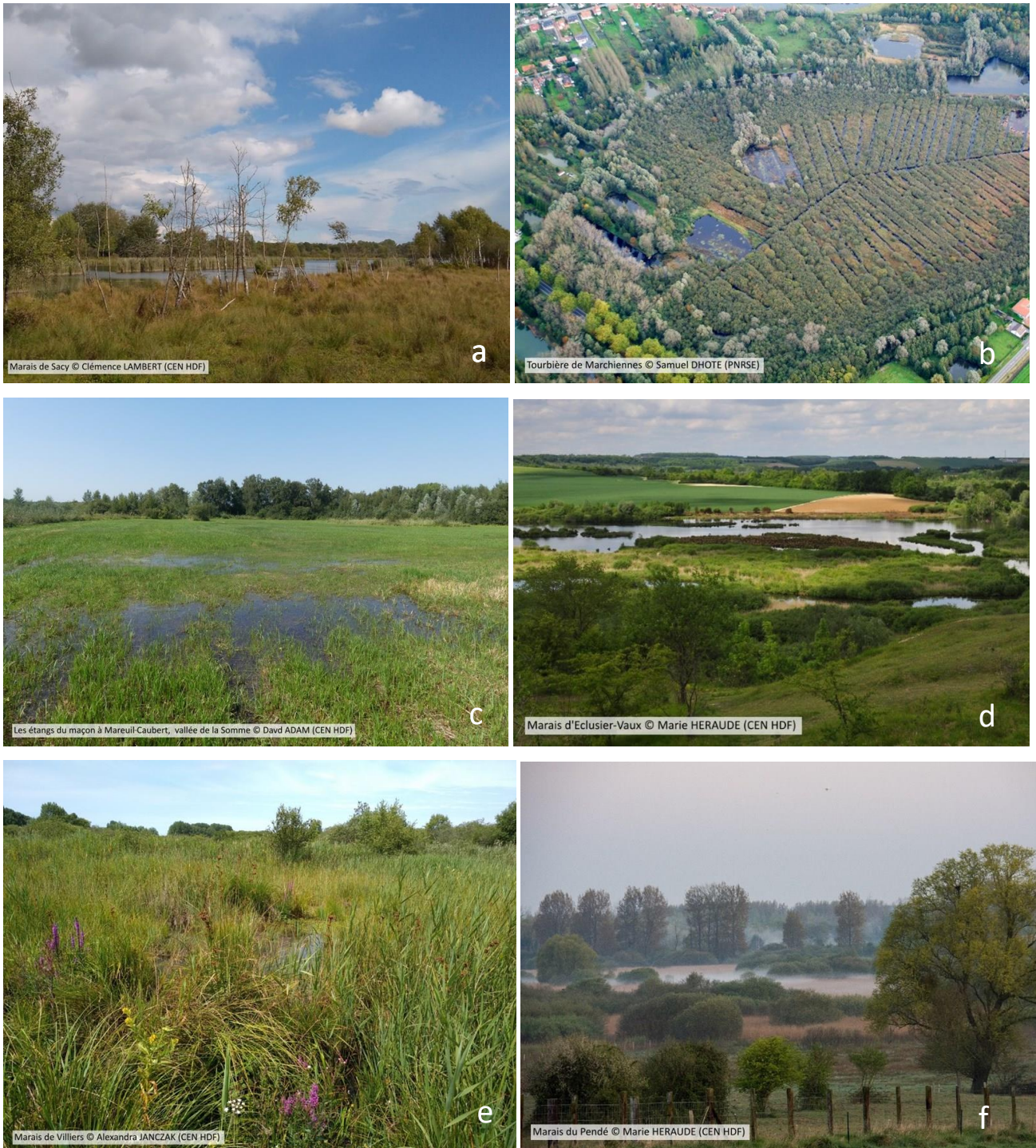


Figure 09a : Photographies des sites a) Marais de Sacy ; b) Tourbières de Marchiennes ; c) Étangs de mareuil-Caubert ; d) Marais d'Éclusier-Vaux ; e) Marais de Villiers ; f) Marais du Pendé ; sources : CEN : @C. Lambert, @D. Adam, @M. Héraude, @A. Janczak et PNRSE : @S. Dhote





Figure 09b : Photographies des sites g) Marais de Douriez ; h) Marais de Fouches ; i) Marais de la Souche ; j) Marais de Génonville ; sources : CEN : @M. Drouglazet, @A. Messean, @M. James et Natagora

### C. Habitats d'intérêt communautaires (HIC)

Le principe de la restauration passe par des travaux visant à remettre en place des habitats tourbeux. Six Habitats d'Intérêt Communautaires (HIC) sont donc la cible des travaux du LIFE (fig. 10).

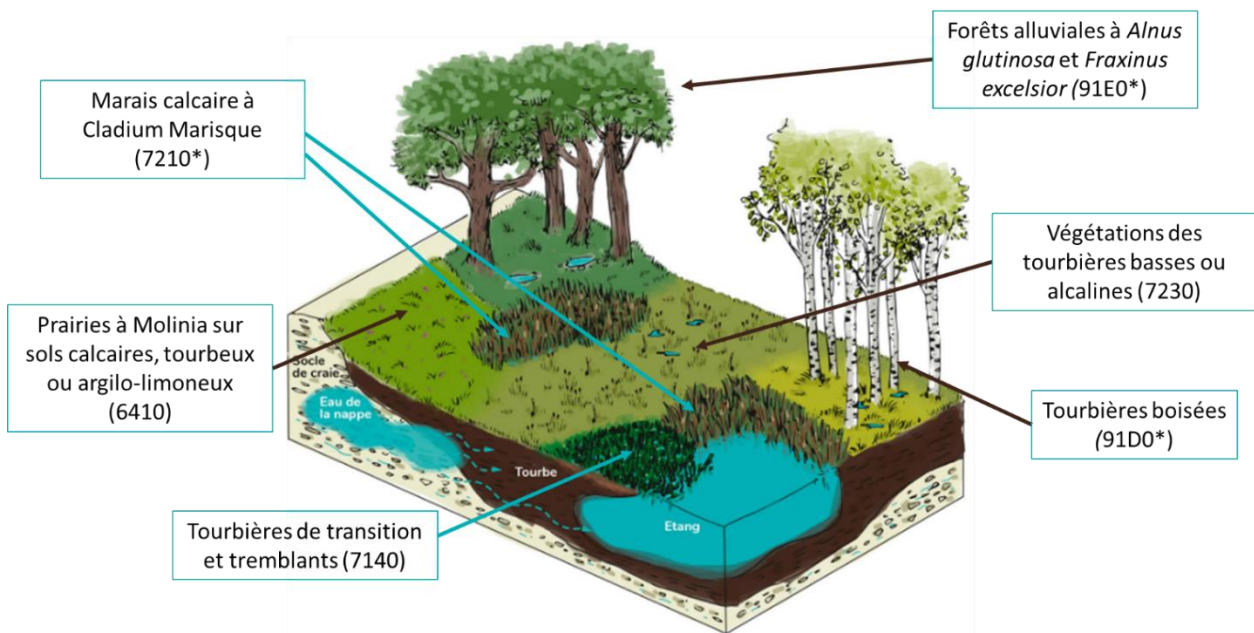


Figure 10 : Représentation schématique d'une tourbière et des HIC caractéristiques, (modifié depuis le [site LIFE Anthropofens](#))

Le premier habitat correspond au code 91E0\*, Forêts alluviales à *Alnus glutinosa* et *Fraxinus excelsior*. Il s'agit d'un habitat se formant à la périphérie des tourbières actives. L'eau étant un facteur limitant au vieillissement et à la croissance des arbres, les arbres morts finissent par tomber et ouvrir le milieu. Cet habitat présente les strates arborées, arbustives et herbacées (François *et al.*, 2012) (fig. 11). Le projet prévoit de restaurer 31 hectares de cet habitat.

Le deuxième habitat est le Marais calcaire à Marisque (7210\*), caractérisé par une faible diversité spécifique, une importante densité de Marisque et d'une forte densité (François *et al.*, 2012) (fig. 10). Le projet prévoit de restaurer 96 hectares de cet habitat.

Le troisième se dénomme Prairies à Molinie bleue sur sols calcaires, tourbeux ou argilo-limoneux (6410). Il se définit comme un habitat agro-pastoral de limite de tourbière, ne présentant que la strate herbacée et il s'agit de l'habitat le moins humide des six cibles (François *et al.*, 2012) (fig. 11). Le projet prévoit de restaurer 56 hectares de cet habitat.

Le quatrième habitat correspond aux Tourbières de transition et tremblants (7140). Cet habitat est pionnier et indique une dynamique turfignone active à l'interface entre des milieux aquatiques et terrestres. Il s'agit d'un radeau flottant plus ou moins en contact avec le fond du plan d'eau (François *et al.*, 2012) (fig. 11). Le projet prévoit de restaurer 21 hectares de cet habitat.

Le cinquième habitat s'appelle : Végétations des tourbières basses ou alcalines (7230). Cet habitat est présent au centre de la tourbière et est constamment gorgé d'eau (François *et al.*, 2012) (fig. 11). Le projet prévoit de restaurer 276 hectares de cet habitat.

Le dernier habitat est le 91D0\*, correspondant aux Tourbières boisées. Sur les sites du LIFE Anthropofens, il se présente sous la forme d'une Aulnaie-bétulaie à sphaignes. L'intérêt écologique de cet habitat, comme le 91D0\*, réside dans son vieillissement (François *et al.*, 2012) (fig. 11). Le projet prévoit de restaurer 3 ha de cet habitat.





Figure 11 : Photographies des habitats cibles HIC a) 91E0\* ; b) 7210\* ; c) 6410 ; d) 7230 ; e) 7230 ; f) 91D0\* ; source : CEN : @J. Lebrun, @G. Meire, @M. James

#### D. Missions et cadre de l'étude

Les fonctions présentées par les tourbières prennent finalement la forme de services écosystémiques et doivent être considérés dans cette restauration. De fait, il semble pertinent de regarder leur évolution après les travaux, afin de s'assurer de la bonne évolution des milieux. Comme précisé plus tôt les fonctions liées aux cycles de l'eau et de l'azote sont à la fois à l'origine de services mais également gage du bon fonctionnement des écosystèmes tourbeux. Tandis que les fonctions liées au cycle du carbone se présentent comme des conséquences du bon état de l'écosystème. Regarder l'évolution plus spécifique des services écosystémiques liés aux cycles de l'eau et de l'azote, permet donc de prendre du recul sur l'efficacité à long terme de la restauration sur les systèmes tourbeux.

Les projets LIFE répondent à plusieurs directives de l'Union Européenne. Notamment, l'Union Européenne fixe dans une de ses stratégies en faveur de la biodiversité de 2011 : « les projets LIFE Nature doivent inclure des actions pour évaluer l'impact du projet sur les écosystèmes et leurs services ». Ainsi, le projet LIFE Anthropofens qui fixe ses objectifs autour d'actions, rattache l'objet de ce rapport aux actions dites « D » qui concernent le suivi de l'impact des actions du projet. Plus particulièrement, cette analyse se rapporte aux actions D.5.1 qui concernent l'évaluation de l'impact du projet sur les services écosystémiques (SE) et plus précisément de l'évaluation de la contribution aux services liés au cycle de l'eau et de l'azote.

### 3. Cadre méthodologique de l'étude

#### A. Echelles des projets LIFE – Guide LIFE

Dans le but de donner un cadre d'application aux directives européennes concernant l'évaluation des services écosystémiques, un guide de cette évaluation a été produit par l'Europe. Il la divise en 3 étapes.

Tout d'abord, l'identification des écosystèmes pertinents et leur état. Puis, la sélection et la quantification des services écosystémiques pertinents. Et enfin, la normalisation des valeurs d'indicateurs et inclusion dans la matrice (Guide LIFE).

L'état des écosystèmes fait référence aux habitats présents avant travaux puis aux habitats objectifs, la pertinence des écosystèmes fait appel aux zones de travaux, puisqu'il s'agit de comparer l'état après restauration à l'état initial. Le choix des services écosystémiques se réalise grâce à une classification internationale : CICES et la pertinence du choix des SE s'effectue dans le cadre de la problématique posée. La méthode de quantification indiquée est celle de la MAES. Puis la normalisation fait appel à des notions de définition d'échelle, les indicateurs sont des proxys d'évaluation des SE et la matrice est un outil de notation. L'ensemble des notions évoquées ici sont explicitées dans la suite du rapport.

#### B. CICES

Les services écosystémiques font l'objet d'une classification internationale, appelée CICES (Common International Classification of Ecosystem Services, (Haines-Young and Potschin, 2013)). Cette classification vise à regrouper les services par groupes. La distinction la plus forte entre les services se présente sous la forme de « sections ». Il existe trois sections : (i) les services fournissant du matériel et de l'énergie : les services écosystémiques d'Approvisionnement (SA), (ii) l'utilité des écosystèmes à réguler l'environnement autour des personnes : les services de Régulation, enfin (iii) les services non-matériels, intellectuels et symboliques : les services culturels. Par la suite, les services se regroupent en « division », « groupe » et enfin en « classe ». Chacun d'entre eux se décline en une clause écologique présentant une utilité aux Hommes.

#### C. Méthode de la MAES

Le Guide LIFE fait appel à la méthode de la MAES, pour « Mapping and Assessment of Ecosystem Services » (Maes *et al.*, 2016 ; Burkhard *et al.*, 2018) comme méthode d'évaluation des SE. Il s'agit de la plus utilisée en Europe. L'objectif de cette méthode est double : « mapping » pour cartographier et délimiter spatialement les points de fourniture des services écosystémiques et « assessing » : évaluer les services au travers d'une traduction de faits scientifiques en données transmissibles au grand public, aux élus politiques, etc... La MAES donne un cadre de travail commun aux études des services écosystémiques, en associant des proxys d'évaluation de SE, s'appelant indicateurs, à la classification CICES (Maes *et al.*, 2016). Ainsi, évaluer un de ces indicateurs, revient à évaluer un service écosystémique, ce qui permet d'appréhender la notion de service écosystémique de manière plus concrète. Ces indicateurs diffèrent d'un type d'écosystème à un autre, ainsi, les auteurs de cette méthode fournissent ceux-ci pour 12 écosystèmes appartenant à trois grands types : les écosystèmes d'eau douce, marins et terrestres, dans ces derniers se trouvent les zones humides, parmi lesquelles se comptent les tourbières (Maes *et al.*, 2016). Les indicateurs qu'ils fournissent sont associés à des labels de qualité décrivant la disponibilité des données au niveau européen et la possibilité de transmettre ces informations lors des processus de conception des politiques publiques (Maes, *et al.*, 2016) (fig. 12).

| Division | Group               | Class   | Lakes   | Rivers | Ground water | Wetlands   |
|----------|---------------------|---|---|--------|--------------|--|
| flows    |                     | Buffering and attenuation of mass flows       | ● Sediment retention  |        | evolution    | ● Sediment retention   |
|          | Liquid flows        | Hydrological cycle and water flow maintenance |   |        |              |  |
|          |                     | Flood protection                              | ● Holding capacity flood risk maps<br>● Conservation of river and lakes banks |        |              | ● Water holding capacity of soils<br>● Floodplains areas (and record of annual floods)<br>● Area of wetlands located in flood risk zones<br>● Conservation status of riparian wetlands |
|          | Gaseous / air flows | Storm protection                              |   |        |              | ● Conservation status of wetlands  |
|          |                     | Ventilation and transpiration                 |   |        |              |  |

Figure 12 : Extrait du tableau associant CICES et indicateurs : « assessing », extrait de Maes, et al., 2016, la couleur des points correspond à la qualité du label

Par exemple, l'évaluation des services écosystémiques concernant la lutte contre les risques d'inondation (« flood protection » dans la colonne « Class »), passe notamment par l'examen de la présence, ou de l'absence, de ces zones humides en zones à risques d'inondation (« Area of wetlands located in flood risk zones »). Bien qu'évaluer l'ensemble des indicateurs permettrait une étude précise et complexe, ceux-ci ne sont pas toujours adaptés à l'échelle de l'étude et à la problématique posée. Afin de faciliter ce choix, le guide LIFE décrit la réflexion nécessaire au choix des indicateurs. Cette réflexion se présente au travers du questionnement : « Existe-t-il des indicateurs disponibles pour mesurer les services écosystémiques et ai-je les ressources/moyens/capacités nécessaires pour ces mesures ? ». Puis, le guide décline ce questionnement en quatre critères desquels dépendent le choix des indicateurs : d'abord, l'objectif de l'étude, puis, la disponibilité des données, ensuite, le type de mesures associé aux indicateurs et enfin, des ressources disponibles pour cette évaluation.

#### D. Rapport de méthodologie du LIFE Anthropofens

La conception de la méthodologie présentée dans ce rapport est le fruit du travail de stage de master2 de Justine Capoulade, qui s'est déroulé en 2023. Le rapport associé à celui-ci est la base de travail de la méthode du présent rapport. D'autre part, les sites de la moyenne-vallée de la Somme et des marais de Sacy ont été évalués en 2023, afin de tester la méthodologie. Les résultats de ces sites consignés et analysés dans ce rapport proviennent des matrices obtenues en 2023 (Capoulade, 2023).

#### 4. Hypothèses et attendus de l'étude

La problématique motivant cette étude est : la restauration d'habitats associés aux tourbières, entraîne-t-elle une évolution de la fourniture des services écosystémiques liés aux cycles de l'eau et de l'azote des sites concernés ?

Plusieurs hypothèses viennent structurer la réflexion. D'abord, le changement d'habitats pour les HIC devrait changer les caractéristiques du milieu, comme la qualité du sol, la physionomie de la végétation et dans le cadre des fonctions éco-hydrologique des tourbières, favoriser, entre autres, les services de régulations liés aux cycles de l'eau et de l'azote et culturels. Les services d'approvisionnement sont plus difficiles à anticiper, mais une amélioration est tout de même à attendre. Ainsi, l'attendu principal de cette étude est l'observation de la hausse de fourniture de ces services écosystémiques. Les caractéristiques physiques et fonctionnelles



des habitats HIC sont à l'origine des questionnements sur l'évolution des services. Ainsi, l'étude se fonde sur l'hypothèse selon laquelle la fourniture des services est conditionnée par les habitats. Enfin, certains services possèdent des implications similaires, par exemple les services SR07 et SR08 concernant les services de régulation des climats mondiaux et locaux. Ainsi, la deuxième l'hypothèse soutient que des groupes fonctionnels de services peuvent être définis et, en lien avec la précédente hypothèse, s'accordent avec des typologies d'habitat. Enfin, après diverses réflexions sur les variables les plus influentes sur la qualité des services, la dernière hypothèse de l'étude repose sur les influences majeures (i) de la réalisation (ou non) des travaux de restauration et (ii) du site étudié.

### III. Matériel et méthode

#### 1. Méthode d'évaluation des SE

##### A. Identification des services écosystémiques pertinents (CICES)

Dans le cadre de cette étude, l'intérêt est surtout porté sur services liés aux cycles de l'eau et de l'azote dans les trois types (approvisionnement, régulation et culturels). Ainsi, en accord avec le rapport de méthodologie réalisé sur le sujet de l'étude en 2023 par Justine Capoulade, 17 services ont été sélectionnés : 6 SA, 8SR et 3SC parmi la classification CICES (Haines-Young and Potschin, 2013).

Pour les services d'approvisionnement, ceux qui ont été choisis traitent soit du prélèvement de biomasse animale ou végétale dans le milieu, soit de l'approvisionnement en eau. Ces services, entrent de manière directe dans la thématique des deux cycles étudiés (tab. 02).

Pour les services de régulation, les services choisis concernent : la lutte contre les risques naturels liés au cycle de l'eau, le maintien de la qualité des sols et de l'eau, la participation des sites au maintien de la biodiversité, et donc des habitats et la régulation des climats à l'échelle locale et mondiale. L'ensemble de ces services ont une approche directe des deux cycles étudiés (tab. 03).

Enfin pour les services culturels, seuls trois ont été choisis. A première vue, aucun d'entre eux n'a de rapport direct avec les cycles de l'eau et de l'azote, mais favorisent la volonté de préservation et d'entretien des sites, sièges du déroulement des cycles de l'eau et de l'azote, c'est donc un lien plutôt indirect (tab. 04).

| Groupe                                  | Code | Classe et définition   |      |  |  |
|---|------|--|------|--|--|
| Biomasse<br>comme denrée<br>alimentaire | SA01 | L'habitat est : une <b>source de nourriture pour l'homme, d'origine animale élevée</b>                     |      |  |  |
|   | SA02 | L'habitat est : une <b>source de nourriture pour l'homme, d'origine animale sauvage</b>                    |      |  |  |
|   | SA03 | L'habitat est : une <b>source de nourriture pour l'homme, d'origine végétale sauvage</b>                   |      |  |  |
| Biomasse<br>comme matériau              | SA04 | L'habitat est : une <b>source de matériaux pour l'homme</b> , pour l'énergie, le bois d'œuvre, litière ... |      |  |  |
|   |      | Eau  | SA05 | L'habitat : <b>alimente un stock d'eau potable</b>                                       |  |
|   |      |  | SA06 | L'habitat : <b>alimente un stock d'eau non potable</b> (irrigation, refroidissement,...) |  |

Tableau 02 : Services d'approvisionnement (SA) choisis

| Groupe  | Code | Classe et définition  |  |
|---|------|---|--|
| Régulation des débits et prévention des risques naturels  | SR01 | L'habitat : <b>régule le cycle hydrologique et les débits et à maintenir l'écoulement d'eau</b> (comprenant les inondations et les crues)   |  |
|   | SR02 | L'habitat : <b>atténue les mouvements de masses en stoppant le flux de sédiments</b> (glissement de terrain, ruissellements...)   |  |
| Régulation de la qualité des sols   | SR03 | L'habitat : assure la <b>formation, le développement des sols et le maintien de la matière organique</b> dans les sols par les processus <b>d'altération, de décomposition et de fixation de nutriments</b> |  |
|   | SR04 | L'habitat : effectue <b>de la bio-remédiation</b> (microorganismes, algues, plantes et animaux)   |  |
| Traitement des déchets ou substances toxiques d'origines anthropiques par les espèces végétales et animales | SR05 | Maintenance du cycle de vie, protection de l'habitat et du pool génétique   | L'habitat : <b>participe à la protection de la biodiversité</b> (régulation du pool génétique et la diversité)       |
|   |      | Régulation de l'état chimique de l'eau  | L'habitat : assure le <b>bon état chimique des eaux douces par les espèces végétales et animales</b>                 |
|   | SR07 | Régulation de la composition atmosphérique et conditions climatiques  | L'habitat : participe à <b>réguler le climat mondial par la réduction des concentrations de gaz à effet de serre</b> |
|   |      | SR08  | L'habitat : participe à <b>réguler la température et l'humidité à une échelle locale</b>                             |

Tableau 03 : Services de régulation (SR) choisis

| Groupe  | Code | Classe et définition   |
|---|------|--|
| Interactions intellectuelles et représentatives avec l'environnement naturel  | SC01 | L'habitat : possède <b>des systèmes vivants qui motivent les recherches scientifiques ou l'éducation</b> |
|   | SC02 | L'habitat : possède <b>des systèmes vivants qui ont des valeurs de legs</b>                              |
| Autres caractéristiques biotiques qui ont une valeur non relative à son usage | SC03 | L'habitat : possède <b>des systèmes vivants qui ont une valeur d'existence</b>                           |

Tableau 04 : Services culturels (SC) choisis

## B. Méthode de quantification des services écosystémiques et choix de l'échelle spatiale d'évaluation (méthode MAES et matrices)

L'application des critères annoncés dans le cadre de cette étude a permis de définir plusieurs indicateurs par services choisis (tab. 05). L'ensemble de ces indicateurs sont détaillés en [annexe 1](#).

| Section           | Division  | Groupe                            | Code | Classe et définition   | Indicateurs  |
|-------------------|-----------|-----------------------------------|------|--|--|
| Approvisionnement | Nutrition | Biomasse comme denrée alimentaire | SA01 | L'habitat est : une <b>source de nourriture pour l'homme, d'origine animale élevée</b>                     | <b>Données paturage</b> : type et nombre de bêtes, surface associée  |
|                   |           |                                   | SA02 | L'habitat est : une <b>source de nourriture pour l'homme, d'origine animale sauvage</b>                    | <b>Données de chasse</b> : Nombre de Huttes de chasse, espèces pouvant être chassées<br><b>Données de pêche</b> : Espèces pêchées                                |
|                   |           |                                   | SA03 | L'habitat est : une <b>source de nourriture pour l'homme, d'origine végétale sauvage</b>                   | <b>Données espèces cueillies</b> : Cueillette possible, champignons comestibles, foin  |
|                   |           | Biomasse comme matériau           | SA04 | L'habitat est : une <b>source de matériaux pour l'homme</b> , pour l'énergie, le bois d'œuvre, litière ... | <b>Données de travaux</b> : Matière végétale exportée  |
|                   |           | Eau                               | SA05 | L'habitat : <b>alimente un stock d'eau potable</b>   | <b>Données AEP</b> : Quantité d'eau prélevée et localisation des aires d'alimentation  |
|                   |           |                                   | SA06 | L'habitat : <b>alimente un stock d'eau non potable</b> (irrigation, refroidissement,...)                   | <b>Données agriculture et industrie</b> : Quantité d'eau prélevable à fin d'irrigation, de consommation domestique et ou d'utilisation industrielle/ énergétique |

Tableau 05 : Services écosystémiques d'approvisionnement selon la classification CICES et les indicateurs d'évaluation associés pour l'étude

Une fois les indicateurs déterminés, l'évaluation des services écosystémiques requiert la définition d'une échelle spatiale d'évaluation. Cette étude a pour objectif de déterminer l'impact des travaux de restauration sur les services écosystémiques. Ainsi, il apparaît logique de se concentrer sur l'évaluation des services écosystémiques associés spatialement aux polygones de travaux. Dans les études à grandes échelles, l'unité spatiale à évaluer est l'occupation du sol (Campagne et Roche, 2021). Ces données, croisées aux indicateurs permet de procéder à l'évaluation de la qualité des services du territoire. Or, la présente étude se place à l'échelle du site naturel, il semble alors peu pertinent de raisonner en termes d'occupation du sol. L'échelle de cette information ne s'avère pas assez précise pour les résultats souhaités et son utilisation engendrerait la perte de qualité d'information. Afin de vraiment répondre à la problématique de l'impact de la restauration d'habitats, une comparaison à un état initial s'avère nécessaire. Ainsi, l'unité spatiale d'évaluation qui semble la plus adaptée est l'habitat, d'abord initial (avant travaux), puis objectif (après travaux). Dans le cadre des actions du projet LIFE Anthropofens, le Conservatoire Botanique National de Bailleul (CBNBL) a effectué un suivi phytosociologique à l'échelle des complexes de végétation avant les travaux de restauration. Grâce à ces données et à la documentation de François *et al.* (2012), ces informations ont été traduites en classes phytosociologiques, discernées comme habitats. Les données sont alors disponibles pour tous les sites et cartographiables (fig. 13).





Figure 13 : Cartographie des habitats initiaux à Belloy-sur-Somme, site de la Basse vallée de la Somme (FR2200355)

Sur la totalité des sites du LIFE Anthropofens, ce sont 12 habitats initiaux déterminés par le CBNBL et 6 habitats objectifs qui peuvent être listés pour l'ensemble des sites du projet LIFE Anthropofens (fig. 14). En raison de la faible superficie de restauration de l'habitat H6 (Tourbières boisées, 91D0\*), et des faibles actions entreprises, le but étant de laisser cet habitat vieillir, il n'apparaît pas dans l'étude. Ainsi, ce sont 5 HIC qui seront analysés dans cette étude.

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>h1</b> : Forêt de feuillus caducifoliés sur sol non-marécageux</li> <li>• <b>h2</b> : Forêt et fourrés sur sols marécageux</li> <li>• <b>h3</b> : Fourrés arbustifs non-marécageux</li> <li>• <b>h4</b> : Fourrés mésophiles à oligotrophiles des sols humides à secs</li> <li>• <b>h5</b> : Mégaphorbiaie</li> <li>• <b>h6</b> : Prairie hygrophile brièvement à longuement inondée</li> <li>• <b>h7</b> : Roselière et grandes cariçaias</li> <li>• <b>h8</b> : Ilots végétalisés</li> <li>• <b>h9</b> : Forêt caducifoliées riveraines de l'Europe tempérée</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>h10</b> : Forêt et fourrés riverains à bois tendre</li> <li>• <b>h11</b> : Forêt galeries à Salix alba et Populus alba</li> <li>• <b>h12</b> : Peupleraie plantée</li> <li>• <b>H1</b> : Forêts alluviales à Aulne glutineux et Frêne élevé (91E0*)</li> <li>• <b>H2</b> : Marais calcaires à Marisque (7210*)</li> <li>• <b>H3</b> : Prairies humides calcaires à Molinie bleue (6410)</li> <li>• <b>H4</b> : Tourbières de transition (7140)</li> <li>• <b>H5</b> : Tourbières basses alcalines (7230)</li> </ul> |
|---|---|

Figure 14 : Liste des habitats initiaux (h1 à h12) et objectifs (H1 à H5 avec code HIC).

Dans le reste du rapport les termes « Habitats objectifs », « Habitats cibles », « HIC » se réfèrent aux six habitats objectifs de la restauration, qui sont donc la cible des travaux mais peuvent déjà être présents sur site

avant les actions de restauration. A l'inverse les « Habitats initiaux » sont uniquement présents avant la restauration (sur les polygones de travaux étudiés ici).

Ainsi, afin d'évaluer les évolutions potentielles de fourniture de services écosystémiques avant, puis après les travaux, il apparaît pertinent de croiser les informations des indicateurs avec les habitats d'avant travaux, puis de recommencer avec les habitats objectifs du projet et enfin de comparer ces deux résultats. La construction d'un outil d'évaluation croisant ces deux informations et permettant la collecte de données d'évaluation est nécessaire. Les auteurs de la méthode proposent l'approche de la matrice (Burkhard and Maes, 2017). Il s'agit d'un tableau comportant dans les colonnes, les services évalués et dans les lignes, les habitats évalués. Les cases du tableau doivent être remplies par des notes allant de 0 à 5 et reflétant la fourniture du service par l'habitat concerné, au travers des indicateurs fournis (fig. 15).

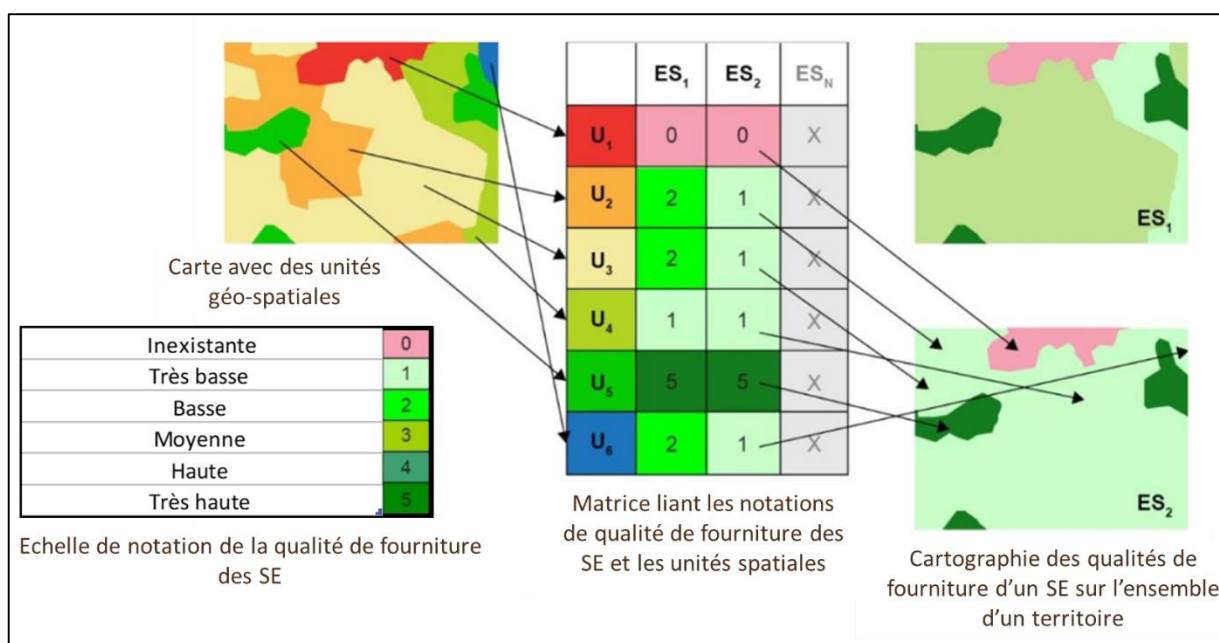


Figure 15 : Schéma de la méthode des matrices, modifié depuis Burkhard and Maes, 2017

Le concept de cet outil réside dans le simple fait de créer une matrice dans laquelle l'évaluateur peut juger de la fourniture des 17 services choisis pour tous les habitats existants sur le site Natura2000 qu'il étudie. Par exemple, pour le site de la basse vallée de la Somme de Pont-Rémy à Breilly (FR22003555), la matrice d'évaluation avant travaux possède une dimension de 6 × 17, correspondant 17 SE à évaluer pour 6 habitats présents sur les trois sites des travaux : Long, Belloy-sur-Somme et la Chaussée-Tirancourt (département de la Somme). La matrice d'après travaux mesure : 3 × 17, car 3 HIC différents sont restaurés sur le site (fig. 16).

| AVANT TRAVAUX  |    | Code | SA01  | SA02 | SA03 | SA04 | SA05 | SA06 | SR01 | SR02 | SR03 | SR04 | SR05 | SR06 | SR07 | SR08 | SC01 | SC02 | SC03 |
|--|----|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Habitats initiaux  |    | Code | IC /3 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Forêts de feuillus caducifoliés sur sol non-marécageux         | h1 |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Forêts et fourrés sur sols marécageux                          | h2 |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Fourrés mésotrophiles à oligotrophiles des sols humides à secs | h4 |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Mégaphorbiaies   | h5 |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Roselières et grandes cariçaies hygrophiles                    | h7 |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Végétations des tourbières basses ou alcalines                 | H5 |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

| APRES TRAVAUX  |    | Code | SA01  | SA02 | SA03 | SA04 | SA05 | SA06 | SR01 | SR02 | SR03 | SR04 | SR05 | SR06 | SR07 | SR08 | SC01 | SC02 | SC03 |
|--|----|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Habitats objectifs   |    | Code | IC /3 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Prairies à Molinia sur sols calcaires, tourbeux ou argilo-limoneux | H3 |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Tourbières de transition et tremblants                             | H4 |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Végétations des tourbières basses ou alcalines                     | H5 |      |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |

Figure 16 : Matrices exemples du site de la BVS\_PR\_B

Ainsi, 26 matrices ont été créées pour les 13 sites, comprenant systématiquement une matrice d'évaluation des habitats initiaux (avant restauration) et une matrice d'évaluation des habitats cibles (après restauration).

Chaque case de la matrice doit être remplie par une note qualifiant la fourniture du service, évaluée grâce aux indicateurs et selon une échelle allant de 0 à 5. La note 0 étant « cet habitat ne fournit pas ce SE » et 5 étant « cet habitat fournit ce SE avec une très bonne qualité ».

### C. Remplissage des matrices à dires d'expert

Comme présenté précédemment, la méthode de collecte de données par la matrice nécessite un évaluateur. Les auteurs de la méthode, Burkhard et Maes (2017), proposent la collecte de données au travers d'une approche participative, faisant appel à des experts, citant par exemple des citoyens habitants à proximité des sites, avec des connaissances en écologie, des spécialistes de l'environnement... En somme, la collecte de données serait réalisée par un panel d'expert remplissant le même outil, à savoir la matrice. La méthode d'évaluation à dire d'expert a été comparée à une méthode d'évaluation par proxys quantitatifs et modèles biophysique et les deux types de résultats se sont trouvés positivement corrélés. Ceci confirme la pertinence de cette approche (Roche and Campagne, 2019). D'autres types de collecte de données sont également détaillés par les auteurs, mais le projet LIFE Anthropofens, bien que porté par le Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France, fait appel à de nombreux partenaires. Il a paru alors aisé de mettre en œuvre une sollicitation d'experts grâce à ces contacts. Il convient de définir le terme d'expert dans cette étude : il s'agit d'évaluateurs connaissant un ou plusieurs sites du projet et ayant des connaissances éco-hydrologiques et générales sur les tourbières. L'objectif un panel de 10 à 15 experts a été fixé en accord avec la littérature sur le sujet (Campagne *et al.*, 2017 et Campagne and Roche, 2018). Ainsi, plus de 150 experts ont été contactés par différents moyens (en interne, par mail, via le site internet du LIFE Anthropofens, via les réseaux du CEN...) et invités à participer à cette étude. Dans le temps imparti, 44 d'entre eux ont pu remplir les matrices sur l'ensemble des 13 sites (tab. 06). Finalement, le jeu de données se compose de 95 matrices. En raison des manques de données sur les sites belges, le site BE34057 (Marais de la Haute-Semois et Bois de Heinsch) se divise en plusieurs sites de « Fouches », « Heinsch », « Petit-Vivier » et « Sampont ».

| Site          | MS | SCARPE | SACY | PMTBVA | BALAN | MMS_A_C | TMA | MVS | BVS_PR_B | MMMM | MALP | FOUCHES | HEINSCH | PETIT-VIVIER | SAMPONT | BSET |
|---------------|----|--------|------|--------|-------|---------|-----|-----|----------|------|------|---------|---------|--------------|---------|------|
| Nb de matrice | 3  | 5      | 9    | 6      | 4     | 6       | 8   | 12  | 15       | 8    | 10   | 2       | 2       | 1            | 2       | 2    |

Tableau 06 : Nombre de matrices retournées par sites (les acronymes des sites sont sur le tab. 01)

Afin que l'ensemble des experts possède un support commun d'évaluation, notamment considérant des domaines d'expertises variés, des dossiers cartographiques ont été montés pour chaque site Natura2000. En raison de la disponibilité des données, seuls les 11 sites français, ont bénéficié de la réalisation d'un dossier. Ceux-ci comportent des cartographies des habitats initiaux et cibles des travaux, des travaux hydrauliques et d'exportation de biomasse, géologiques, pédologiques, hydrographiques, des captages d'eau, des remontées de nappe, des suivis physico-chimiques de la conductivité et de la concentration en nitrate, des indices floristiques d'engorgement et des niveaux trophiques, du pâturage et des huttes de chasse. Également, des relevés floristiques et faunistiques, la liste des zonages de protection et le détail des pratiques associées au site (pêche et chasse) se trouvent détaillés dans le dossier. L'objectif de ce dernier était de couvrir un socle de connaissances commun pour les évaluateurs, et ce, pour l'ensemble des indicateurs des services évalués. Cependant, le remplissage de la matrice repose surtout sur les connaissances des experts. Justement, afin de permettre aux experts d'exprimer leur confiance dans leurs notations, des cases spécifiques ont été ajoutées dans la matrice où ils inscrivent un indice de confiance dans la note, sur une échelle allant de 1 à 3 par service et par habitat (cellules grisées sur la fig. 16 matrice). L'indice de confiance 1 étant « Je ne sais pas et je n'ai pas pris connaissances des documents » et 3 étant « Je suis confiant dans ma réponse et j'ai pris connaissance des documents ».

Afin que tous les experts participant à l'étude aient les mêmes informations et comprennent le contexte de l'étude ainsi que la méthode de remplissage des matrices, une réunion en Visio et présentiel a été animée le 11 juin 2024. Puis, un webinar a été réalisé pour que les experts puissent remplir les matrices quand ils le souhaitent et selon leurs propres contraintes d'emploi du temps.

#### D. Pondération des notes et jeu de données final

De manière à rendre équitable le poids des notations dans les résultats finaux en fonction de la confiance des experts dans leur réponse, les notes attribuées au croisement d'un habitat et d'un service ont été dupliquées par le nombre donné par la multiplication des indices de confiance associé à l'habitat et au service évalué. Par exemple, je donne la note de 1/5 à la fourniture du service SA03 par l'habitat h2. J'estime ma confiance dans ma compréhension des indicateurs de ce service, et du service en général, à 2/3, de plus, ma bonne connaissance de l'habitat h2 me fait estimer mon indice de confiance de l'habitat à 3/3. Ainsi, ma réponse de 1/5 pour la fourniture du service SA03 pour l'habitat h2 apparaîtra  $2 \times 3 = 6$  fois dans le jeu de données final. Cette pondération permet de donner plus de poids aux réponses des experts assurés de leur réponse, par rapport à d'autres experts pour qui certains services sortent peut-être de leur domaine d'expertise.

Ainsi, le jeu de données initial s'élevait à 13 617 notes associées chacune à un service pour un habitat dans le cadre d'un site Natura2000, après pondération, ce nombre vaut 76 704. En plus du remplissage des matrices, les experts ont eu un questionnaire de profil s'intéressant à leur nom, leur fonction, l'organisme dans lequel ils travaillent, leur domaine de spécialité, leur échelle de spécialité, leur lien avec le site (visites fréquentes, peu fréquentes...) ainsi que le temps passé à remplir les matrices. Le tableau final comprend donc 15 observations pour 76 704 lignes (fig. 17).



| HAB_Code | SE_Code | Note | HAB_IC | SE_IC | Travaux | SE_TYPE | FCT                     | SPE                 | LIEN_SITE | ECH        | TEMPS | SITE    |
|----------|---------|------|--------|-------|---------|---------|-------------------------|---------------------|-----------|------------|-------|---------|
| h2       | SA01    | 0    | 3      | 3     | AVANT   | Approv. | COORD. LIFE             | GEN                 | 2         | REG        | 0.50  | MALP    |
| h2       | SA01    | 0    | 2      | 3     | AVANT   | Approv. | CMNatura2000            | GEST. MILIEUX AQUA. | 4         | PMP        | 0.50  | MALP    |
| h2       | SA01    | 0    | 2      | 2     | AVANT   | Approv. | CES                     | FAUNE PISCI.        | 3         | DEP 80     | 1.00  | MALP    |
| h2       | SA01    | 0    | NA     | NA    | AVANT   | Approv. | Directeur Environnement | GEN.                | 3         | LOC        | 0.50  | MALP    |
| h2       | SA01    | 2    | 3      | 3     | AVANT   | Approv. | CES                     | ECOLOGIE            | 3         | EURO OCEAN | 1.00  | MMMC    |
| h2       | SA01    | 3    | 3      | 3     | AVANT   | Approv. | CES                     | FAUNE ET FLORE      | 4         | DEP 80     | 1.50  | MMMC    |
| h2       | SA01    | 1    | 2      | 2     | AVANT   | Approv. | CES                     | TOURB.              | 3         | LOC        | 1.00  | MMMC    |
| h2       | SA01    | 3    | 2      | 2     | AVANT   | Approv. | RESP. COMM              | GEN                 | 3         | REG        | 0.50  | MMMC    |
| h2       | SA01    | 2    | 2      | 3     | AVANT   | Approv. | CMS                     | FLORE               | 3         | REG        | 0.50  | MMMC    |
| h2       | SA01    | 1    | 2      | 2     | AVANT   | Approv. | CPNatura2000            | DD                  | 2         | DEP 80     | 0.75  | MMMC    |
| h2       | SA01    | 0    | 3      | 3     | AVANT   | Approv. | COORD. LIFE             | GEN                 | 2         | REG        | 1.50  | MMMC    |
| h2       | SA01    | 0    | 2      | 2     | AVANT   | Approv. | CB                      | FAUNE ET FLORE      | 4         | LOC        | 3.00  | MMMC    |
| h2       | SA01    | 0    | 3      | 3     | AVANT   | Approv. | CES                     | ECOLOGIE            | 4         | EURO OCEAN | 0.70  | MMS_A_C |
| h2       | SA01    | 1    | 2      | 3     | AVANT   | Approv. | CMRAMSAR                | GEN                 | 3         | DEP 80     | 0.75  | MMS_A_C |
| h2       | SA01    | 1    | 2      | 2     | AVANT   | Approv. | RESP. COMM              | GEN                 | 2         | HDF        | 0.50  | MMS_A_C |
| h2       | SA01    | 1    | 2      | 3     | AVANT   | Approv. | CMS                     | FLORE               | 3         | REG        | 0.50  | MMS_A_C |
| h2       | SA01    | 0    | 3      | 3     | AVANT   | Approv. | RD                      | GEN                 | 4         | DEP 80     | 0.50  | MMS_A_C |
| h2       | SA01    | 0    | 2      | 2     | AVANT   | Approv. | CES                     | FAUNE PISCI.        | 2         | DEP 80     | 0.70  | MMS_A_C |
| h2       | SA01    | 1    | 3      | 3     | AVANT   | Approv. | CES                     | ECOLOGIE            | 3         | EURO OCEAN | 0.70  | MS      |
| h2       | SA01    | 1    | 2      | 2     | AVANT   | Approv. | RESP. COMM              | GEN                 | 3         | REG        | 0.75  | MS      |
| h2       | SA01    | 0    | 3      | 3     | AVANT   | Approv. | CES                     | FAUNE ET FLORE      | 3         | DEP02      | 1.50  | MS      |

Figure 17 : Tableau final sans pondération, sans les noms et organismes de travail des experts (les abréviations sont en [annexe 5](#))

Il est arrivé, comme dans la figure observée, que certains experts oublient de remplir les indices de confiance. Cela se traduit par un « NA » dans le tableau. Afin de ne pas pénaliser ces réponses dans le système pondération, leur IC a systématiquement été remplacé par 1/3.

Il y a au total 54246 données « Avant » et 22 456 données « Après » les travaux.

Plusieurs variables décrivent ce jeu de données. D’abord la variable « Habitat » composée des 17 niveaux de valeurs de chaque habitat initial et objectif du projet, puis la variable « SE », qui décrit quel service est analysé et compte également 17 niveaux correspondant aux 17 SE. Ensuite, la variable « Note », allant des valeurs de 0 à 5, suivi de la variable « Travaux », composée de deux niveaux : « Avant » et « Après ». Enfin, les deux dernières variables importantes sont « Nom », qui représente le nom des 44 experts qui ont rempli les 95 matrices, et « Site », qui définit le site évalué dans la matrice. Par la suite, la variable « SE », différencie tous les SE d’approvisionnement, de ceux de régulation et des culturels. Les principales variables utilisées dans cette étude ont été présentées, le jeu de données se compose encore d’autres variables comme la fonction exercée par les experts, la spécialité, le lien avec le site la durée de remplissage et l’échelle d’expertise, mais celles-ci ne sont que peu usitées dans l’étude à proprement parler.

## 2. Méthodes d’analyses de données

### A. Analyse de la potentielle évolution des SE après restauration (spiderchart et test statistique)

Dans le but de comparer les résultats avant travaux à ceux obtenus après travaux, des échantillons contenant les résultats avant et après travaux ont été séparés, à l’échelle du site ainsi qu’à l’échelle du projet.

Dans l’optique de construire des spidercharts, des échantillons ont été formés par service écosystémique et par état d’avancement des travaux (tous habitats confondus). Une fois cela réalisé, les moyennes de chaque échantillon ont été calculées et ont alors permis la réalisation de ce spiderchart

Comme vu dans les paragraphes précédents les matrices n'ont pas la même taille avant et après les travaux, avec bien souvent moins d'habitats cibles que d'initiaux. La plupart du temps, plusieurs habitats initiaux donnent un même habitat cible. De fait, les échantillons ne sont pas de la même taille et il n'y a pas systématiquement de couple avant/après pour tous les habitats initiaux. Pour cette raison le test des rangs de Mann Whitney non-paramétrique et non apparié a été réalisé pour comparer les deux situations. Les analyses ont été effectuées sur R (*R Core Team*), version 4.4.0 et l'ensemble des graphiques avec le package « ggplot2 » (Whickham and Chang, 2014).

## B. Détermination des causes écologiques des potentielles évolutions des SE (Analyse en Composantes Principales)

Les hypothèses de l'étude prévoient qu'en effet, des différences soient observables avant et après restauration, et que cela soit engendré par la disparition des habitats initiaux au profit des habitats restaurés. Cela implique que les habitats initiaux n'ont pas les mêmes capacités de fourniture des mêmes services que les cibles. Ainsi, afin de comprendre cet effet, l'étude s'est intéressée plus particulièrement aux caractéristiques écologiques des habitats. Il a fallu déterminer quelle caractéristique avait le plus d'impact sur ces fournitures de services. L'outil de traitement de données le plus adapté pour analyser cette problématique est l'Analyse en Composante Principale. L'ACP transforme des variables corrélées *e.g.* les différents niveaux d'habitats h1 à h12 et H1 à H5 contenus dans la variable Habitat, en nouvelles variables décorréliées. En effet, en positionnant la variable « Habitat » comme variable principale de la notation des SE (moyenne des notes attribuées aux services par habitats, tous sites et autres paramètres confondus) dans l'ACP, il est possible d'obtenir une répartition de tous les SE en fonction de deux axes, définis par l'ACP et caractérisés par les propriétés intrinsèques des habitats. L'objectif de l'application de cette méthode est de vérifier l'hypothèse selon laquelle certains paramètres des habitats conditionnent la fourniture des services. Afin d'intégrer l'ensemble des caractéristiques des habitats à la fois initiaux et cibles, seules les données avant travaux ont été utilisées dans la suite de cette analyse. L'avantage présenté par cette filtration des données est que l'ACP ne sera pas perturbée par une éventuelle augmentation de fourniture, après restauration, de la qualité des habitats cibles déjà présents avant la restauration. Cela permet de se concentrer sur un seul niveau d'information.

L'ACP fournit un cercle des corrélations sur lesquels se répartissent les 17 niveaux de la variable « Habitat ». Leur répartition dans le cercle permet de déterminer deux sens concrets des axes définis par l'ACP. Une fois cette étape réalisée, la carte des individus, ici les SE, qui s'ensuit se divise en quatre parties à déterminer et devient plus facile à lire. Les services écosystémiques se répartissent sur les mêmes deux axes déterminés précédemment. Leur position par rapport aux axes détermine la caractéristique écologique conditionnant leur fourniture. D'autre part, l'inertie des axes renseignera quant à l'importance des caractéristiques écologiques dans la répartition des services.

Une fois cette lecture réalisée, afin de déterminer l'émergence de groupes de services sur la carte des individus, la méthode des K-means a été utilisée. Cette méthode d'apprentissage non-supervisée permet un partitionnement des données. Un nombre K de groupes va être fixé et la méthode va tenter de minimiser la distance (somme des carrés des distances) d'un point à la moyenne des points du groupe. Le choix du nombre K conditionne la réalisation de l'algorithme, ainsi il est d'abord estimé à partir des résultats de la carte des individus. Puis, la méthode de graphique dite « du coude » (Elbow method) a été appliquée, en traçant un graphique de la somme des carrés des distances intra groupes (variance intra-groupe), en fonction du nombre de cluster K, allant de 1 à 10. De manière générale, ce graphique produit une tendance de la forme de la décroissance exponentielle. Ainsi la valeur de K sélectionnée correspond à celle pour laquelle la courbe forme

« un coude » et commence à former une ligne droite. Evidemment, les résultats des K-means ont été analysés avant de sélectionner définitivement le nombre K=5.

La bibliothèque utilisée pour réaliser cette ACP est « FactoMineR » (Husson, *et al.*, 2006).

### C. Validation des relations entre variables (Modèles Linéaires Généralisés)

En statistiques, les modèles linéaires généralisés sont utilisés dans le but d'étudier la dépendance d'une variable par rapport à une ou plusieurs autres variables explicatives. Les hypothèses définies au début de l'étude concernent la qualité de fourniture des services, ce qui correspond donc aux notes des experts, soit la variable « Note ». Celle-ci est semi-quantitative avec des valeurs entières comprises entre 0 et 5, donc la variable est discrète. Également, la distribution des valeurs des notes n'étant pas normale, ceci indique l'utilisation d'un modèle de la famille de Poisson. La construction de deux modèles distincts répondant chacun aux hypothèses émises au début de l'étude permet de vérifier l'acuité de ces dernières.

La première hypothèse étudiée concerne l'évolution de la fourniture des services après les travaux. A première vue, les travaux possèdent un impact sur l'évolution potentielle des notes pour chaque SE. Il semble également pertinent de considérer l'interaction de ces deux dernières variables explicatives. Par ailleurs, l'ajout des variables explicatives « Sites » et « Noms » semble opportun parce que la mosaïque d'habitats avant travaux est très variable d'un site à l'autre, ainsi que l'échelle interne de notation des experts. Au contraire, intuitivement la variable Habitat semble nécessaire à ce modèle. Après quelques premiers tests peu concluants, il est apparu un souci de co-variabilité trop importante entre les variables Travaux et Habitat, puisque de fait, les habitats initiaux n'apparaissent qu'avant les travaux. Ainsi, combiner les variables Habitats et Travaux engendrait une sur-explication des données et la variable Habitat a été écartée. Voici donc le modèle linéaire généralisé de la famille Poisson explorant cette première hypothèse :

$$LMA \leftarrow Note = \alpha + \beta_1 \times Travaux + \beta_2 \times SE + \beta_3 \times SE : Travaux + \beta_4 \times Site + \beta_5 \times Nom$$

avec  $\alpha$  l'ordonnée à l'origine et  $\beta_i$  la valeur de pente.

Le modèle a été sélectionné parmi d'autres, à l'aide d'une sélection de modèle basée sur le BIC (critère le moins conservatif). Cela a permis de sélectionner le modèle le plus parcimonieux. Ainsi, le modèle LMA est le modèle présentant le meilleur BIC. Enfin, afin de s'assurer de la pertinence de l'ensemble des variables et de l'interaction entre les variables Travaux et SE, un « dredge » selon le BIC a été réalisé. Une « Backward selection », qui consiste, à partir du modèle choisi, à éliminer graduellement les variables explicatives, afin de trouver le meilleur équilibre des différents paramètres permet de confirmer la sélection du LMA. Enfin, en suivant les démarches de vérification citées par Zuur *et al.* (2009), les conditions d'application des modèles linéaires ont été respectés.

Le deuxième modèle répond à l'hypothèse de l'étude selon laquelle les habitats conditionnent la fourniture des services. Pour explorer cette piste, les deux variables Habitat et SE ont été mises en interaction pour expliquer la variable Note. Les mêmes étapes de sélection du modèle le plus parcimonieux que précédemment ont été réalisées. Voici l'expression du modèle :

$$LMB \leftarrow Note = \alpha + \beta_1 \times Habitat + \beta_2 \times SE + \beta_3 \times Habitat : SE$$

avec  $\alpha$  l'ordonnée à l'origine et  $\beta_i$  la valeur de pente.

Les conditions d'application des modèles linéaires généralisés sont également respectées. La bibliothèque utilisée pour réaliser les modèles linéaires est « MuMin » (Bartoń, 2010).

## IV. Résultats

### 1. Contribution des travaux aux SE à l'échelle du projet

#### A. Impact de la restauration sur les services – échelle du projet

Un premier élément de réponse aux questions posées dans cette étude peut être fourni par l'étude des notes moyennes attribuées par les experts avant et après les travaux de restauration (fig. 18).

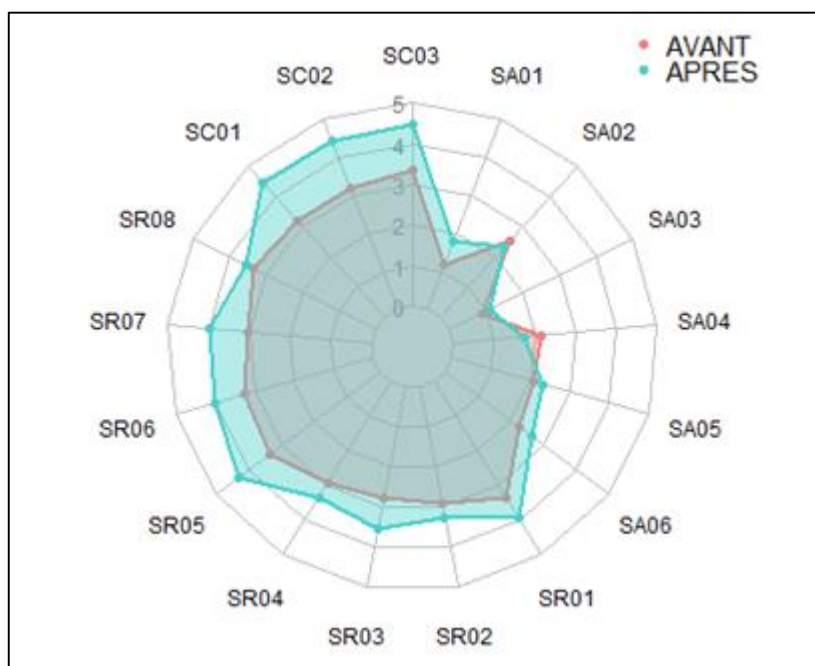


Figure 18 : Spiderchart de l'évolution de la qualité de fourniture des SE après restauration pour tous les sites du LIFE.

Ce graphique montre que les sites du projet fournissent davantage de services culturels (SC01, SC02 et SC03) après les travaux de restauration. De même, les services de régulation (SR) paraissent globalement en hausse de fourniture après les travaux. Cependant, les services d'approvisionnement ne semblent pas montrer de tendance générale particulière, avec à première vue, à la fois des hausses, comme des baisses de fourniture. Il est donc tout-à-fait pertinent d'aller explorer ces différences plus précisément (fig. 19).



Tous les sites du LIFE - avec p-value du test de Mann-Whitney, N= 95

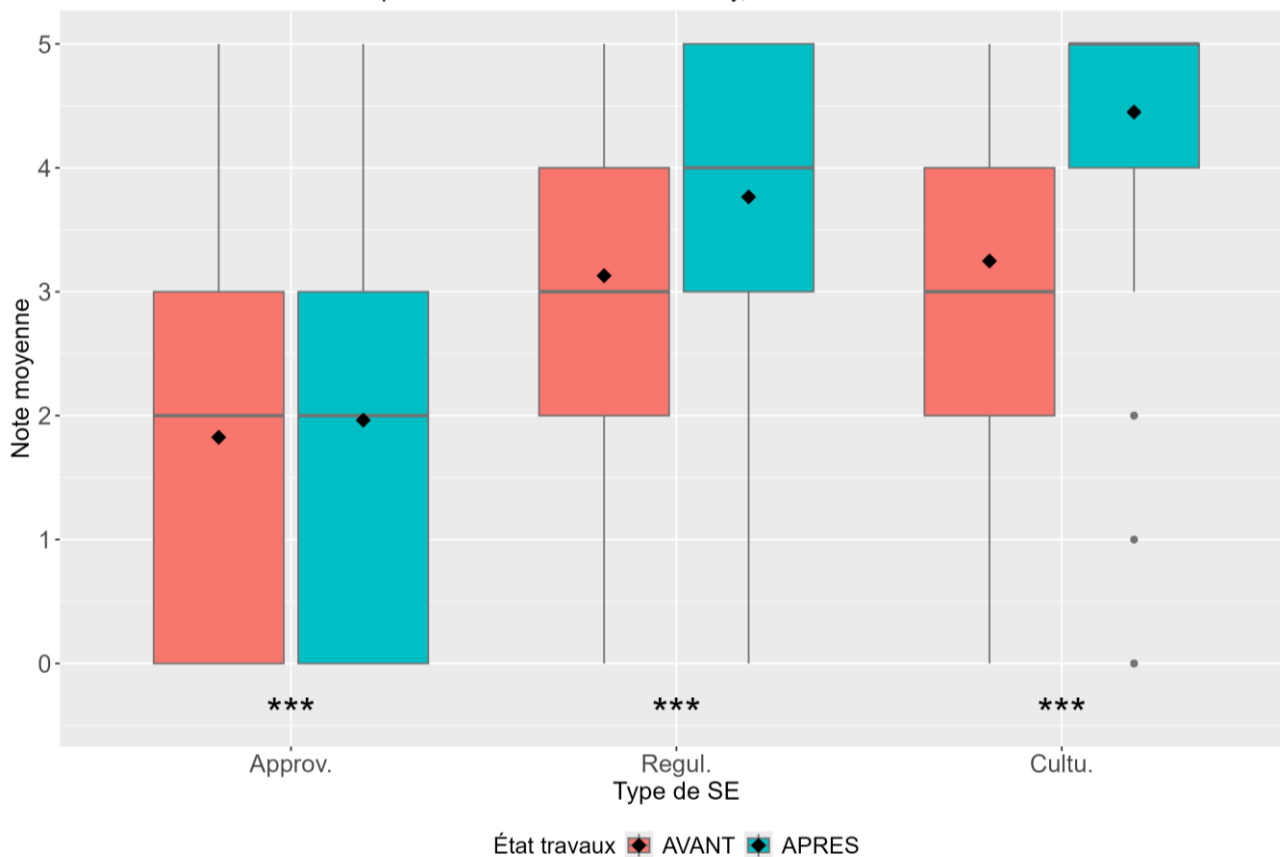


Figure 19 : Comparaison des notes de qualités des types de SE (les étoiles et leur nombre symbolisent l'importance de la significativité, le trait est la médiane et le losange la moyenne)

Les étoiles représentant la significativité de la différence entre les échantillons avant/après indiquent que ces différences sont significatives pour chaque type de SE (Approvisionnement, Régulation et Culturel). Cette différence se présente dans les trois cas comme un gain de fourniture de qualité après les travaux, au vu des losanges représentant les moyennes des échantillons. Il est à noter que, bien que les moyennes des deux échantillons correspondant aux services d'approvisionnement avant et après semblent montrer une évolution vers le gain de fourniture de ces services, les panels des deux échantillons sont assez similaires. A l'inverse, une nette tendance vers la hausse est observable pour les deux autres types de services : pour les services de régulation 50% des notes sont comprises entre 2/5 et 4/5 avant les travaux, tandis que 50% des notes après travaux pour les SR se concentrent entre 3/5 et 5/5, manifestant une hausse des qualités selon les experts. Enfin, les services culturels montrent que 50% des notes sont entre 2/5 et 4/5 avant travaux et 50% des réponses après travaux sont très hautes, entre 4/5 et 5/5.

Afin de mieux comprendre l'évolution des services après les travaux, la significativité d'évolution de chaque service, a été étudiée plus en détail pour chaque service (fig. 20, 21 et 22). Le détail des tests statistiques est consigné (tab. 07).

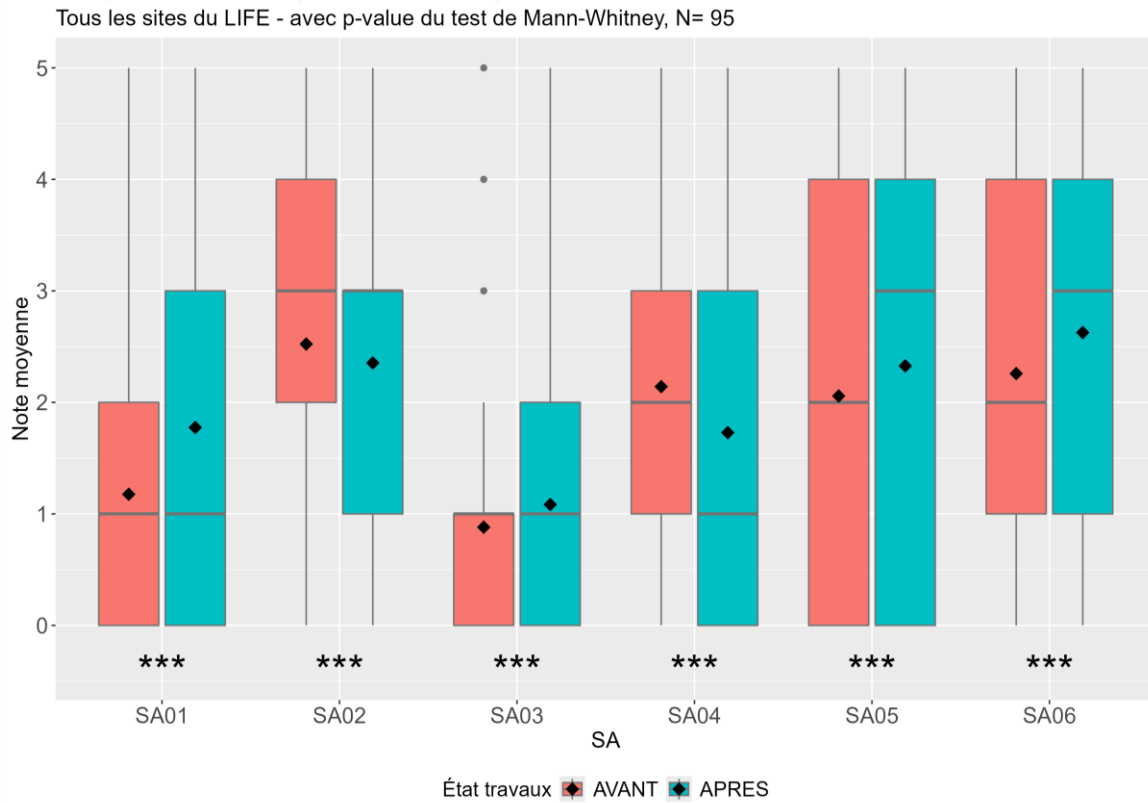


Figure 20 : Boxplots des notes de qualités de SA, sur tous les sites du LIFE (les étoiles et leur nombre symbolisent l'importance de la significativité, le trait est la médiane et le losange la moyenne)

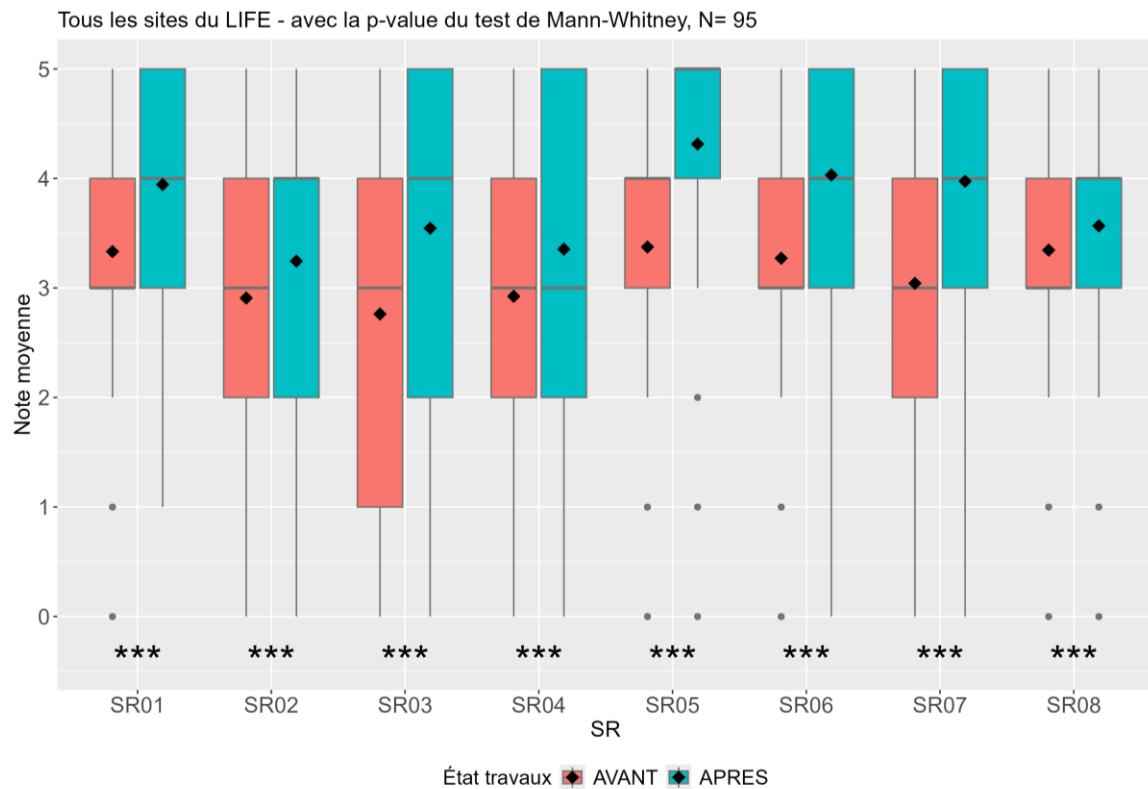


Figure 21 : Boxplots des notes de qualités de SR, sur tous les sites du LIFE (les étoiles et leur nombre symbolisent l'importance de la significativité, le trait est la médiane et le losange la moyenne)

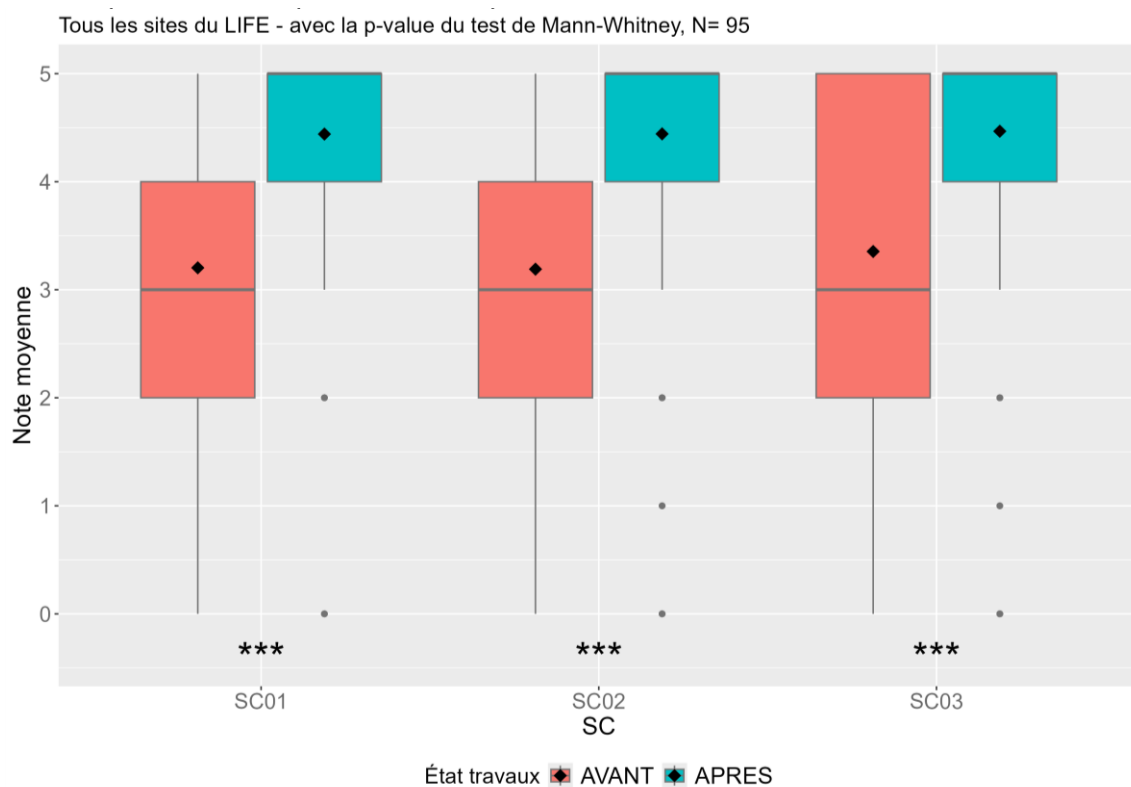


Figure 22 : Boxplots des notes de qualités de SC, sur tous les sites du LIFE (les étoiles et leur nombre symbolisent l'importance de la significativité, le trait est la médiane et le losange la moyenne)

| Echantillons AV/AP | Résultat du test (W) | p-value   | df    |
|--------------------|----------------------|-----------|-------|
| SA                 | 80732687             | 5.486e-08 | 27228 |
| SR                 | 173758125            | < 2.2e-16 | 36030 |
| SC                 | 26446227             | < 2.2e-16 | 12946 |
| SA01               | 3097810              | < 2.2e-16 | 5055  |
| SA02               | 2316046              | 0.0001432 | 4867  |
| SA03               | 2297595              | 0.0001509 | 4530  |
| SA04               | 1983849              | < 2.2e-16 | 4719  |
| SA05               | 1789819              | 3.183e-05 | 3965  |
| SA06               | 1954329              | 4.719e-10 | 4087  |
| SR01               | 3008216              | < 2.2e-16 | 4687  |
| SR02               | 2295353              | 3.021e-15 | 4691  |
| SR03               | 2432793              | < 2.2e-16 | 4271  |
| SR04               | 1928871              | < 2.2e-16 | 3963  |
| SR05               | 3786242              | < 2.2e-16 | 4965  |
| SR06               | 2807387              | < 2.2e-16 | 4466  |
| SR07               | 3378527              | < 2.2e-16 | 4759  |
| SR08               | 2353075              | 8.852e-11 | 4521  |
| SC01               | 3399537              | < 2.2e-16 | 4609  |
| SC02               | 2706579              | < 2.2e-16 | 4129  |
| SC03               | 2734452              | < 2.2e-16 | 4206  |

Tableau 07 : Résultats des tests statistiques de Mann-Whitney, à l'échelle du projet

Selon le test Mann-Whitney, l'entièreté des SE connaît une différence significative après restauration, qu'il s'agisse d'amélioration ou de dégradation de la qualité du SE. Plus concrètement, comme déterminé précédemment, tous les SE de régulation et culturels voient leur qualité s'améliorer après restauration. Pour rappel, les SE de régulation concernent la régulation des débits et la prévention des risques naturels (SR01 et SR02), la qualité du sol (SR03), le traitement des déchets et/ou substances toxiques d'origine anthropique (SR04), la participation à la protection de la biodiversité (SR05), la régulation des états chimiques des eaux (SR06) et la régulation de la composition atmosphérique (SR07 et SR08). De même, les services culturels traitent de la motivation à la recherche et à l'éducation (SC01), de la volonté de lègue aux génération futures (SC02) et de la possession de valeur d'existence du site (SC03). Pour les services d'approvisionnement, seuls les SA01, SA03, SA05 et SA06 connaissent cette même amélioration significative. Ces derniers concernent respectivement la fourniture de biomasse d'origine animale élevée et végétale sauvage comme denrées alimentaires (SA01 et SA03) et la fourniture d'eau dans un cadre potable et non-potable (SA05 et SA06). Les deux services d'approvisionnement restant (SA02 et SA04) connaissent, eux, une dégradation significative de leur qualité. Ceux-ci concernent la fourniture de biomasse d'origine animale sauvage (SA02) et de biomasse comme source de matériaux pour l'homme (SA04).

A la lumière de ces données, il semble intéressant de s'interroger sur l'origine de ces différences de notations. Dans la méthodologie, il est demandé aux experts d'évaluer la qualité de fourniture des SE pour chaque habitat concerné par les travaux de chaque site. Il est alors pertinent de se questionner en premier lieu sur l'impact de la variable Habitat et de ses propriétés écologiques sur la fourniture des SE.

### B. Facteurs écologiques impactant la fourniture des SE (ACP)

L'ACP réalisée sur les données avant travaux permet d'obtenir le cercle des corrélations de la variable habitat (fig. 23).

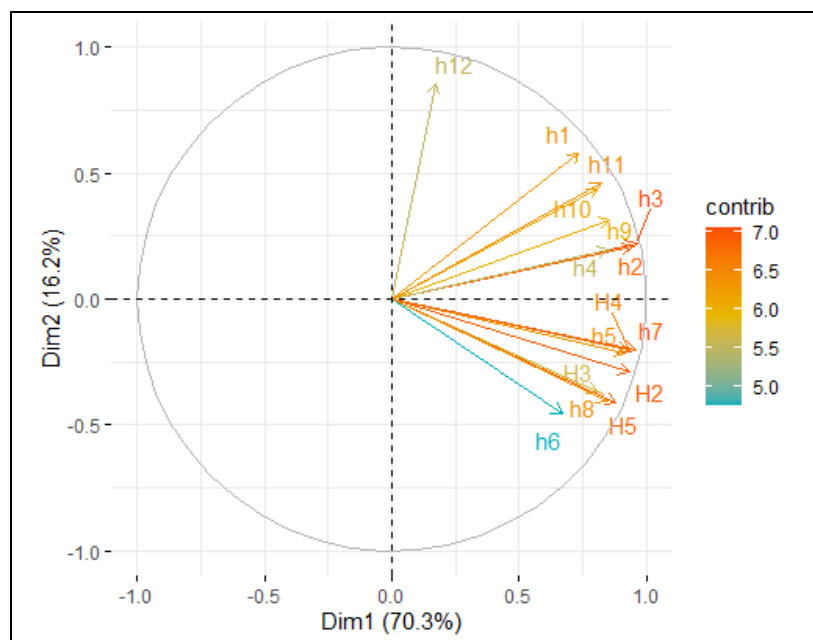


Figure 23 : Cercle des corrélations de l'ACP sur la variable Habitat, entre parenthèses sur les axes, le pourcentage d'inertie de l'axe (hX : habtiat initial ; HX : HIC)

La totalité des niveaux de la variable Habitat se répartissent dans la moitié droite du cercle. Cela signifie que l'axe 1 représente une caractéristique commune à l'ensemble des habitats, qui réside très probablement dans le fait que tous ces milieux sont non-urbanisés et naturels. En effet, se retrouvent, à droite : les milieux naturels

et à gauche : des milieux végétalisés sous influence anthropique, tels de que des cultures ou des vergers par exemple. En ce qui concerne le second axe vertical, une répartition des habitats entre le haut et le bas du cercle est visible. En effet, les habitats h9 à h12 et h1 ainsi que h2 à h4, se définissent par divers types de forêts et fourrés et se situent dans la partie supérieure du cercle. A l'inverse, l'ensemble des habitats cibles ouverts du projet et les habitats initiaux ouverts h5 à h8 se regroupent sur la partie inférieure du cercle des corrélations. Ainsi, la position de la donnée sur l'axe vertical caractérise la caractéristique de physionomie de la végétation avec le caractère ouvert ou fermé du milieu.

Les valeurs négatives de l'axe 1 définissent donc des milieux anthropiques, tandis que les positives désignent des habitats naturels. De même, pour l'axe 2, les valeurs positives symbolisent des habitats fermés, tandis que les habitats ouverts sont caractérisés par des valeurs négatives de l'axe 2. Ainsi, quatre quarts d'observation de la carte peuvent être définis. En haut et à gauche se situent les habitats plutôt anthropisés et fermés, tandis qu'en haut à droite se situent les habitats naturels et fermés. Enfin en bas et à gauche se situent les habitats anthropisés ouverts et en bas à droite, les habitats naturels et ouverts. Afin de constater une éventuelle conséquence de ces paramètres sur la fourniture des services, il est nécessaire de s'intéresser à la carte des individus évalués (ici les SE) de cette même ACP (fig. 24).

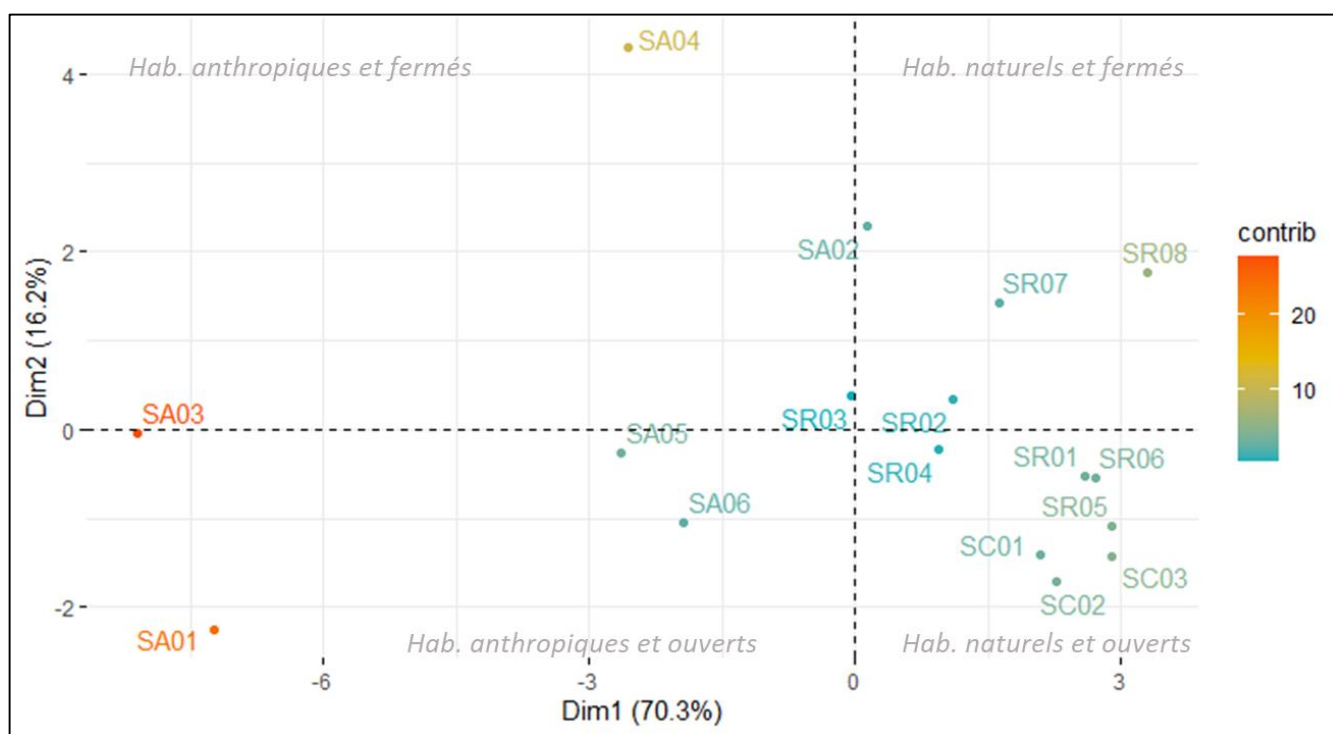


Figure 24 : Carte de répartition des individus (SE) de l'ACP sur la variable « Habitat »

Cette carte offre une première vision de l'influence des caractéristiques écologiques principales déterminées par l'ACP sur les SE, selon leurs spécificités. Ainsi, dans la partie horizontale négative, se retrouvent quasiment tous les services d'approvisionnement, à l'exception du SA02 se situant proche de la valeur nulle de l'axe 1. Ainsi, si l'axe 1 discrimine l'ensemble des services d'approvisionnement sur sa partie négative, ils se répartissent plus largement sur les parties négatives et positives de l'axe 2. Les SA04 et SA02 se situent sur la partie positive de l'axe 2. A l'inverse, les SA01, SA05 et SA06 se situent sur la partie inférieure de la deuxième dimension de l'ACP. Enfin le SA03 se situe sur la valeur nulle de l'axe 2. L'ensemble de ces informations et de celles déterminées grâce au cercle de corrélation permet de définir les faits suivants : la fourniture du SA04, concernant la fourniture de source de matériaux (exportation de biomasse), semble être conditionné par la présence d'habitats anthropiques et fermés. Avec la même réflexion, la fourniture des services SA01, SA05 et



SA06 portant sur la fourniture de nourriture pour l'homme d'origine animale élevée, seraient donc sous l'influence de la présence d'habitats anthropiques et ouverts. Les services SA02 et SA03 ont des positions plus ambivalentes, celle du SA03 concernant la fourniture de nourriture d'origine végétale sauvage (par ex. le foin), semble signifier que ce service n'est fourni que par des milieux anthropiques, ouverts ou fermés. Le SA02, concernant la fourniture de nourriture d'origine animale sauvage, lui, paraît s'associer aux milieux fermés anthropiques ou naturels. En reproduisant le même type d'analyse du graphique pour les services de régulation, la totalité de ceux-ci se placent sur la partie positive de l'axe 1, avec le SR03 situé sur l'axe vertical, à la limite entre les valeurs positives et négatives de cet axe. Les différences entre les huit services de régulation sont définies par leur position sur l'axe 2. Les SR01, SR04, SR05 et SR06 sont tous positionnés sur la partie négative de l'axe, tandis que les autres services : SR02, SR03, SR07 et SR08 se placent sur la partie positive. De même que précédemment, il semblerait que le premier groupe de service de régulation SR01, SR04, SR05 et SR06 concerne respectivement la régulation du cycle hydrologique, la réalisation de bio-remédiation, la protection de la biodiversité et le bon état chimique des masses d'eau soit conditionné par la présence de milieux naturels ouverts. A l'inverse, les SR02, SR03, SR07 et SR08 caractérisant respectivement la lutte contre l'érosion hydrique, la formation et le maintien de matière organique dans les sols et la régulation du climat à l'échelle mondiale et locale, semblent favorisés par des habitats naturels fermés. Enfin les trois services culturels se situent tous les trois dans la partie positive de l'axe 1 et négative de l'axe 2. Cela signifie que ces trois services, fournissant respectivement des motivations des recherches scientifiques ou d'éducation, des valeurs de legs et des valeurs d'existence, sont favorisés par la présence d'habitats naturels et ouverts. Il faut noter que les services se rassemblant autour du croisement des axes sont moins sensibles à la discrimination par les axes que les services les plus éloignés de ceux-ci. Par exemple, les services SR02, SR03 et SR04 ont des positions laissant penser que leur fourniture est peu sensible aux deux facteurs de détermination des axes définis précédemment.

Il semble assez clair que certains des services écosystémiques semblent avoir des positions assez proches et pourraient même prétendre à faire partie d'un même groupe de service. Ainsi, avec la méthode des K-means, des groupes de services ont été distingués (fig. 25).

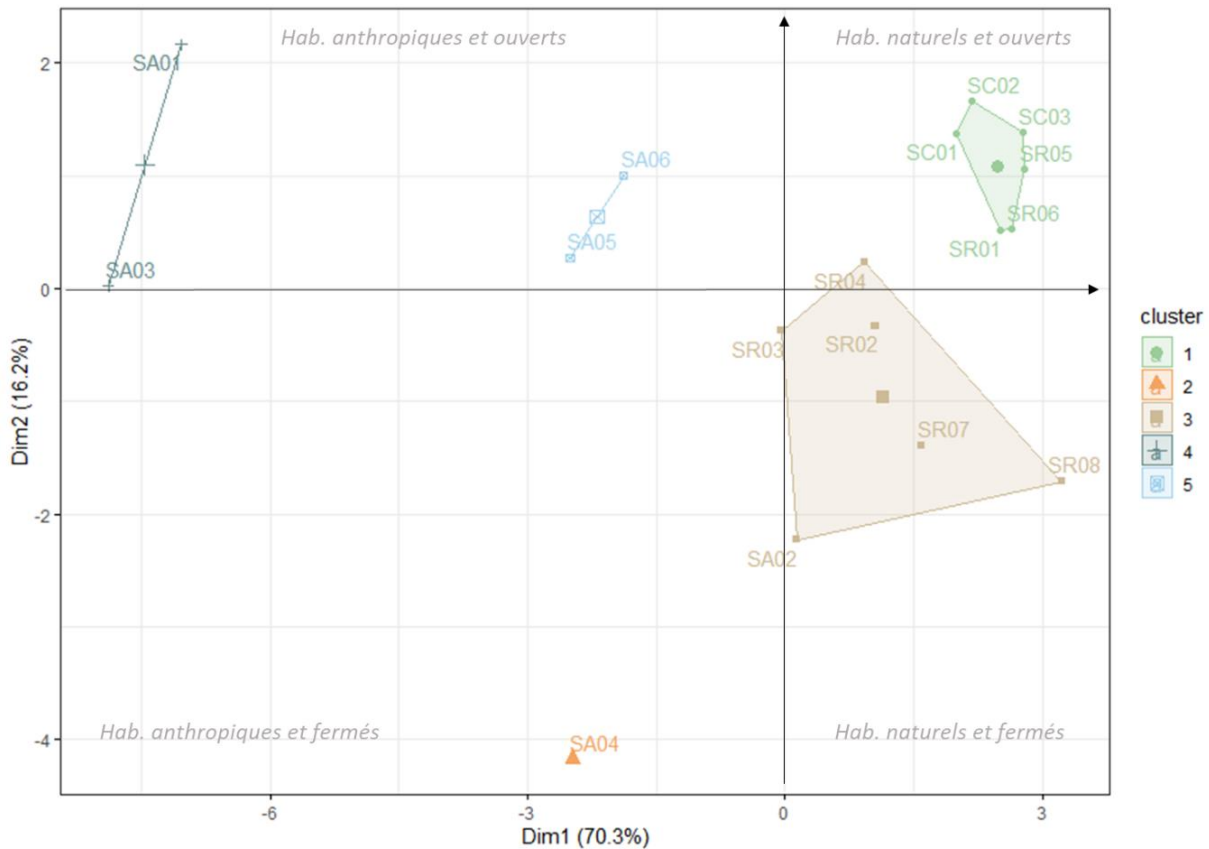


Figure 25 : Carte de répartition des individus par clusters de l'ACP sur la variable Habitat

Ainsi, 5 groupes de services peuvent être identifiés, avec un ratio de la variance intergroupe (somme des carrés de la distance du point (SE) au centroïde des clusters) sur la variance totale (la somme des carrés de la distance du point au centroïde des clusters totaux) de 83,8%, impliquant que la variance intragroupe est minimisée, quand la variance intergroupe est maximisée avec une valeur de 214,4. Ceci indique la fiabilité de ces groupements (tab.08).

| N° du groupe | SE du groupe                         | Variance intragroupe             | Type d'habitats              | Définition des SE du groupe (resp.)   |
|--------------|--------------------------------------|----------------------------------|------------------------------|---|
| 1            | SR01, SR05, SR06, SC01, SC02 et SC03 | 8,3 (3,2% de la variance totale) | Habitats naturels ouverts    | Régulation du cycle hydrologique ;<br>Protection de la biodiversité ;<br>Participation au bon état chimique de l'eau ;<br>Motivation à la recherche et l'éducation ;<br>Possession de valeurs de legs ;<br>Possession de valeur d'existence |
| 2            | SA04                                 | 0 (0% de la variance totale)     | Habitats anthropiques fermés | Source de matériaux   |
| 3            | SR02, SR03, SR04, SR07, SR08, SA02   | 24 (9,4% de la variance totale)  | Habitats naturels fermés     | Atténuation des mouvements de masse ; Formation de sol ; Bio remédiation ; Régulation du climat mondial ; Régulation du climat  |

|   |            |                                  |                               |   |
|---|------------|----------------------------------|-------------------------------|---|
|   |            |                                  |                               | local ; Source de nourriture d'origine animale sauvage            |
| 4 | SA01, SA03 | 8,2 (3,2% de la variance totale) | Habitats anthropiques ouverts | Source de nourriture d'origine animale élevée et végétale sauvage |
| 5 | SA05, SA06 | 1 (0,4% de la variance totale)   | Habitats anthropiques ouverts | Alimentation d'un stock d'eau potable et non-potable              |

Tableau 08 : Bilan des résultats de l'ACP

Finalement, ces résultats montrent que le type d'habitat présent conditionne la qualité de fourniture de service, ce qui va dans le sens de l'hypothèse initialement formulée. Afin de continuer à explorer cette piste, la réalisation d'un modèle linéaire simulant les notes de qualité de fourniture des SE en fonction des habitats et des divers SE s'impose. Le modèle utilisé a été présenté dans la partie III.C, il s'agit du LMB, appliqué à chaque type de service.

Avec ce modèle, environ 22% de résidus sont expliqués pour les SC, 13% pour les SR et 24% pour les SC (tab. 09). Les résultats détaillés du modèle sont en [annexe 2](#). Le modèle a pu être superposé aux résultats des experts (fig. 26).

|          | D. freedom (Df) | Resid. Df | Variance  | Resid. Var | Pr(Chi)  |
|----------|-----------------|-----------|-----------|------------|----------|
| NULL     | NA              | 19109     | NA        | 32677,06   | NA       |
| SE (SA)  | 5               | 19104     | 4203,6622 | 28473,4    | 0,00E+00 |
| HAB      | 16              | 19088     | 379,5982  | 28093,8    | 6,81E-71 |
| SE : HAB | 80              | 19008     | 2445,8519 | 25647,95   | 0,00E+00 |

Tableau 09 : résultats de l'anova du LMB pour les SA

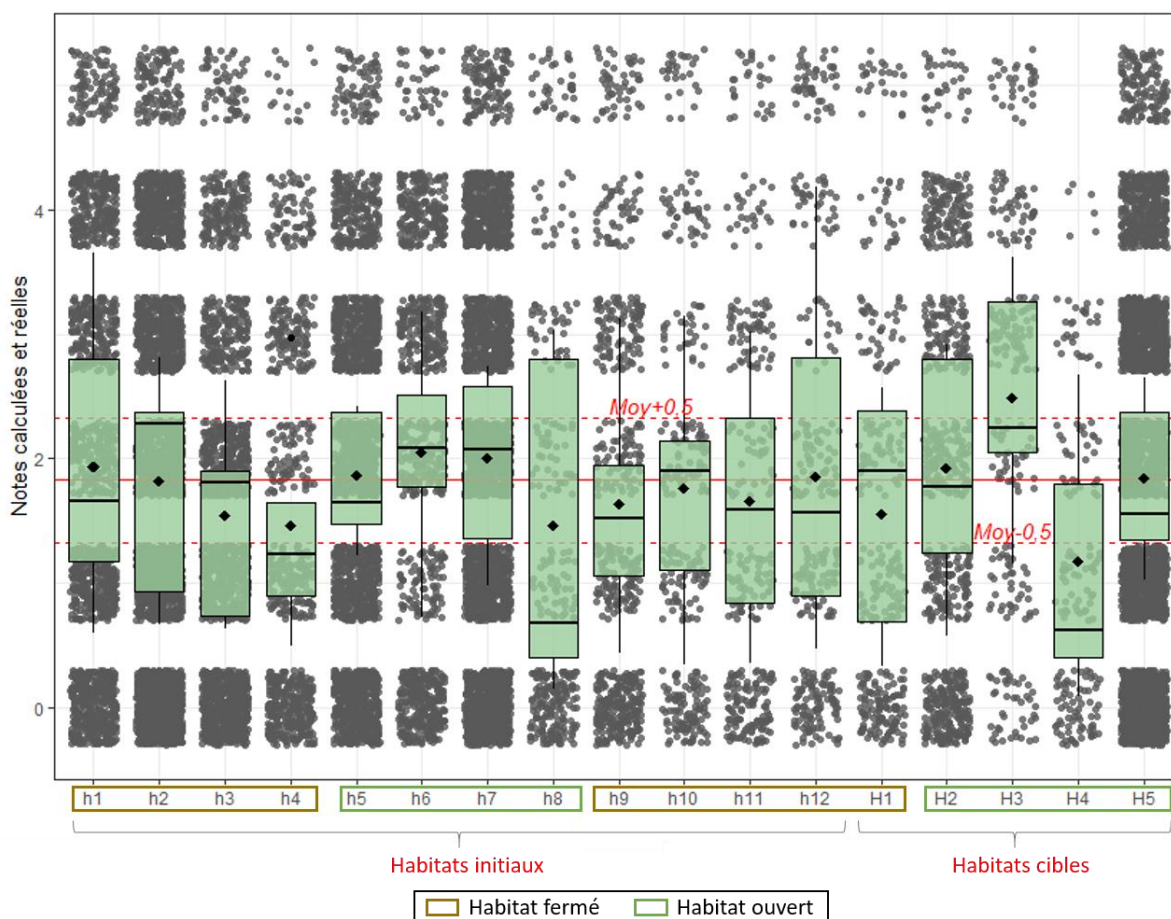


Figure 26 : Boxplot des notes calculées par le LMB et scatterplot des notes des experts pour les SA (gris) en fonction des habitats initiaux (le trait représente la médiane et le losange, la moyenne)

La première observation graphique qui peut être faite est que quasiment l'ensemble des notes par habitats du modèle ont une moyenne autour de la valeur moyenne des SA de 1,8, à 0,5 près pour presque tous. Ensuite, les boxplots semblent bien résumer les points correspondants aux notes des experts. En s'intéressant aux résultats en eux-mêmes, plusieurs catégories d'habitats peuvent être distinguées vis-à-vis de la fourniture de SA. Les habitats dont la moyenne est comprise entre la moyenne des notes (1,8) et la moyenne de notes +0,5 (2,3), qui concerne les habitats : h1, h5, h6, h7, h12, H2 et H5. Cette large catégorie contient donc des habitats initiaux et cibles, ainsi que ouverts et fermés. Ceux dont la moyenne est comprise entre 1,8 et 1,3, comprend les habitats initiaux : h2, h3, h4, h8, h9, h10, h11 et H1. Pour ces derniers, tous, sauf le h8 (ilots de macrophytes en milieu aquatique) sont des habitats fermés. Une troisième catégorie contenant uniquement l'habitat cible H3 (prairie à molinie sur sols calcaire, tourbeux ou argilo-limoneux), avec une moyenne supérieure à 2,3 pour être distinguée. Enfin la dernière catégorie comprend uniquement le HIC H4 (tourbière de transition), dont la moyenne est inférieure à 1,3.

Le LMB a également été appliqué sur les SR, selon la même procédure (tab. 10 et fig. 27)

|          | D. freedom (Df) | Resid. Df | Variance  | Resid. Var | Pr(Chi)   |
|----------|-----------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| NULL     | NA              | 25494     | NA        | 17829,59   | NA        |
| SE (SR)  | 7               | 25487     | 407,6888  | 17421,9    | 5,35E-84  |
| HAB      | 16              | 25471     | 1022,7876 | 16399,11   | 1,48E-207 |
| SE : HAB | 112             | 25359     | 827,5763  | 15571,53   | 1,50E-109 |

Tableau 10 : résultats de l'anova du LMB pour les SA

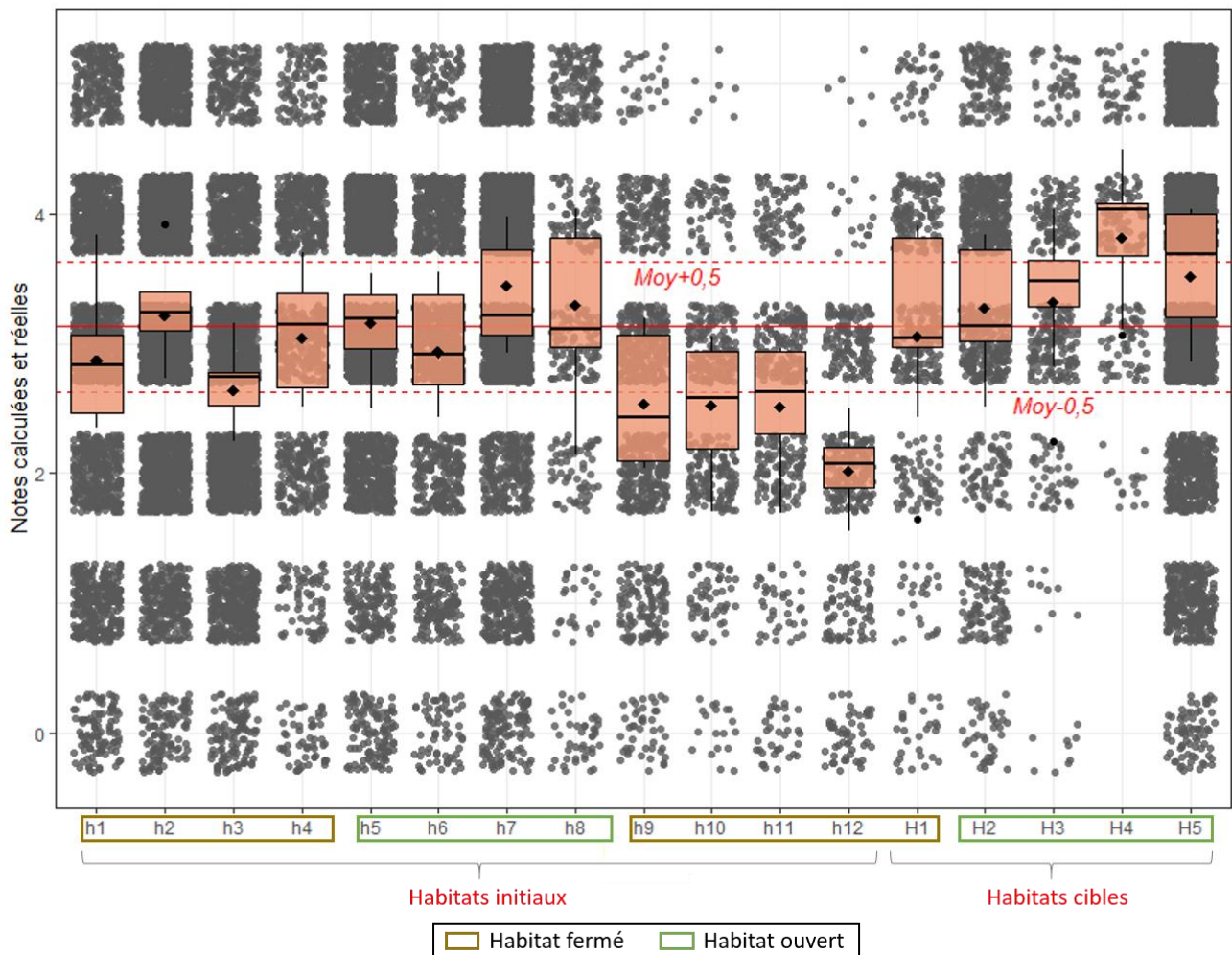


Figure 27 : Boxplot des notes calculées par le LMB et scatterplot des notes des experts pour les SR (gris) en fonction des habitats initiaux (le trait représente la médiane et le losange, la moyenne)

En ce qui concerne les services de régulation, les notes s’ajustent autour de la valeur 3,1, ce qui est cohérent avec les moyennes des SR vue dans la partie IV.A.1. (fig. 21, « avant »). De même, quatre catégories peuvent être différenciées parmi les habitats. D’abord, les habitats dont la moyenne des notes des SR est comprise entre 3,1 et 3,6. Celle-ci concerne les habitats : h2, h5, h7, h8, H2, H3 et H5, qui sont tous, sauf le h2, des habitats ouverts. Respectivement, ces habitats correspondent à : forêt et fourrés sur sols marécageux, mégaphorbiaie, roselière et grande cariçaies, îlots végétalisés en milieu aquatique, marais calcaire à Marisque (7210), prairie à Molinie sur sols calcaire, tourbeux ou argilo-marneux (6410) et végétation de tourbière basse ou alcaline (7230). Les habitats se situant en dessous de la valeur 3,1 et au-dessus de 2,6, sont les habitats h1, h3, h4, h6 et H1. Ces derniers sont tous des habitats boisés et correspondent respectivement à : forêt de feuillus caducifoliées sur sols non-marécageux, fourrés arbustifs non-marécageux, fourrés mésophiles à oligotrophiles des sols humides à secs, prairie hygrophile brièvement à longuement inondée, forêt alluviale (91E0\*). La troisième catégorie se compose de l’habitat cible H4 : tourbière de transition (7140), avec une moyenne supérieure à 3,6. Enfin la dernière catégorie se compose de 4 habitats boisés dont la moyenne est inférieure à 2,6 : h9, h10, h11 et h12, correspondant respectivement à : forêt caducifoliée de l’Europe tempérée, forêt et fourrés riverains, saulaie et peupleraie et peupleraie plantée.

Enfin, la même procédure a été appliquée sur les services culturels (tab. 11 et fig. 28).



|          | D. freedom (Df) | Resid. Df | Variance  | Resid. Var | Pr(Chi)   |
|----------|-----------------|-----------|-----------|------------|-----------|
| NULL     | NA              | 9178      | NA        | 6367,487   | NA        |
| SE (SC)  | 2               | 9176      | 15,27621  | 6352,211   | 4,82E-04  |
| HAB      | 16              | 9160      | 1434,7523 | 4917,458   | 5,49E-296 |
| SE : HAB | 32              | 9128      | 58,82543  | 4858,633   | 2,65E-03  |

Tableau 11 : résultats de l'anova du LMB pour les SC

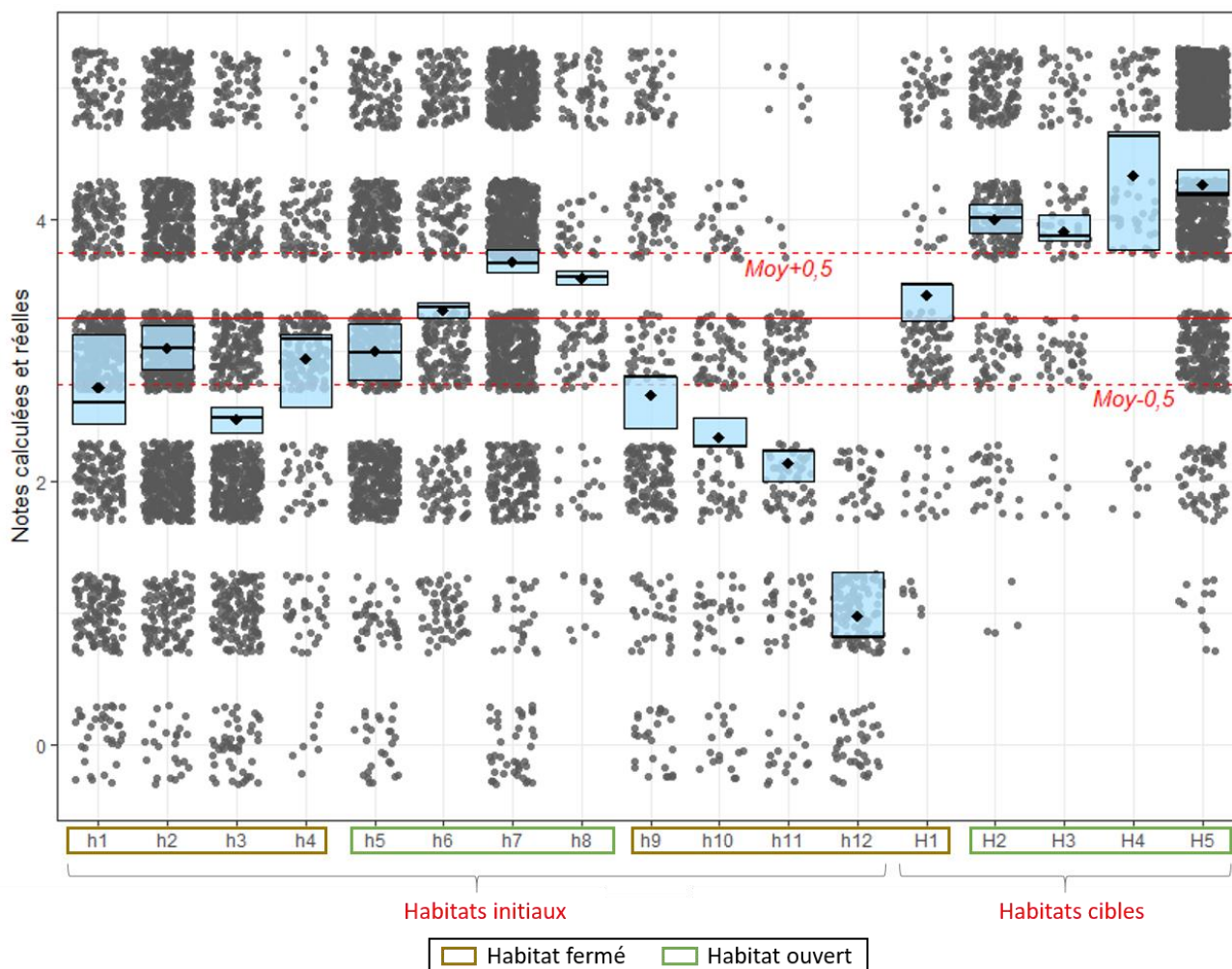


Figure 28 : Boxplot des Notes prédites par le modèle (bleu) et scatterplot des Notes réelles des SC (gris) en fonction des habitats initiaux (le trait dans les boxplots représente la médiane et le losange, la moyenne)

Enfin pour les services culturels, les moyennes sont assez variables. Dans la partie IV.1.A, les moyennes pour chaque SC (avant les travaux) s'élevaient entre 3 et 3,5 et la moyenne des notes associées aux services culturels (avant travaux) s'élève à 3,2. Ici encore, quatre catégories semblent distinctes, avec le même caractère de distinction que pour les autres types de services. La première catégorie se constitue de h6, h7, h8 et H2, tous des habitats ouverts, avec des moyennes comprises entre 3,2 et 3,7. Ce groupe d'habitat correspond respectivement à : prairie hygrophile brièvement à longuement inondée, roselière et grande cariçaies, îlots végétalisés en milieu aquatique et marais calcaire à Marisque (7210). La deuxième catégorie se compose de h2, h4 et h5, avec des moyennes comprises entre 3,2 et 2,7. Respectivement, ce groupe correspond à forêt et fourrés sur sols marécageux, fourrés mésophiles à oligotrophiles des sols humides à secs et mégaphorbiaie. La troisième catégorie, portant sur le critère des moyennes supérieures à 3,7, se constitue de H2, H3, H4 et H5, soit les codes habitats respectifs correspondants : 7210, 6410, 7140 et 7230, qui sont tous les habitats cibles

ouverts. Enfin, la dernière catégorie avec des moyennes inférieures à la moyenne générale -0,5, se compose d'habitats boisés uniquement : h1, h3, h9, h10, h11 et h12, correspondant respectivement à : forêt de feuillus caducifoliées sur sols non-marécageux, fourrés arbustifs non-marécageux, forêt caducifoliée de l'Europe tempérée, forêt et fourrés riverains, saulaie et peupleraie et peupleraie plantée.

De manière globale, l'ensemble de ces graphiques montre donc une cohérence entre les prédictions et les résultats réels de l'étude. En effet, en tenant compte de la quantité de réponses (nombre de points gris), les réponses du modèle (boxplots) suivent assez fidèlement la répartition des points de l'étude.

Avec l'ensemble de ces analyses assez générales sur les habitats, il semble pertinent de regarder plus en détail la qualité de fourniture de chaque service, engendrée par chaque habitat. Et, dans la continuité du tableau 08 précédent, quels habitats sont les plus efficaces dans le rendement de quels services écosystémiques. Grâce au modèle des notations (LMB), réalisé en fonction des variables Habitats et SE, il est possible d'obtenir les qualités de fourniture des SE (avant les travaux) pour chaque habitat, en lien avec l'ACP précédemment réalisée (fig. 29).

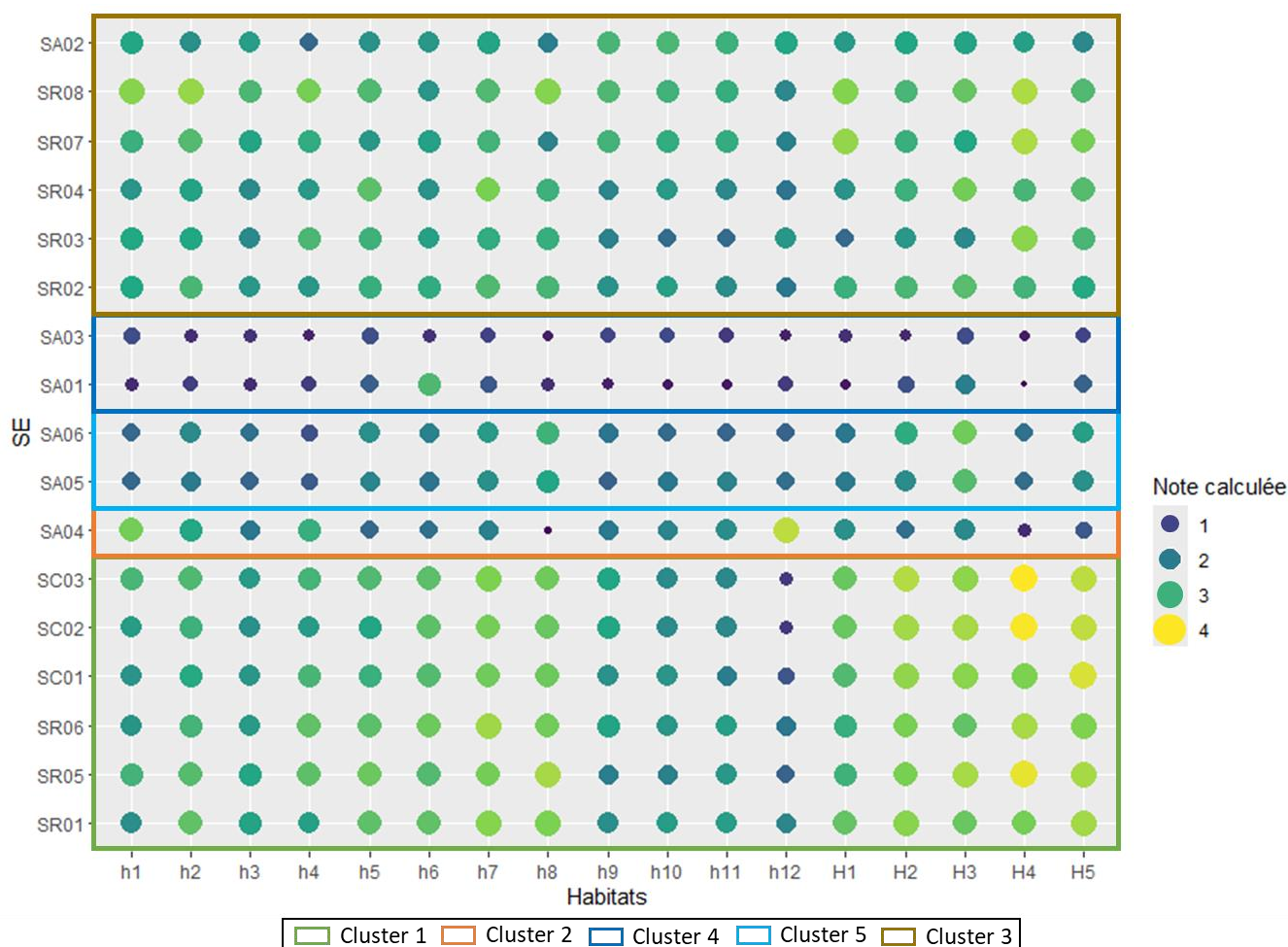


Figure 29 : Grille de la qualité de fourniture de l'ensemble des services en fonction de l'ensemble des habitats et regroupement par cluster définis par l'ACP

Sur cette figure, les services sont répartis par clusters déterminés lors de l'ACP. Les points de taille importante et en vert clair tirant sur le jaune marquent l'importance de la fourniture du SE par l'habitat. En revanche, les points de petite taille allant du vert foncé au violet montrent une faible qualité de fourniture du SE par l'habitat. Le cluster 1 se compose des trois SC et des SR01, SR05 et SR06 et semble avoir une qualité de

fourniture hétérogène pour l'ensemble des habitats. Par exemple, pour ces 6 SE, les HIC, et notamment, l'habitat H4 fournissent le service avec une grande qualité. A l'inverse, l'habitat h12 ne fournit pas du tout ou avec une très faible qualité l'ensemble des 6 services. Ainsi, la qualité de fourniture des 6 SE de ce premier cluster est conditionnée par : les 6 habitats cibles (et particulièrement les H2, H3, H4 et H5, milieux ouverts) et les h5, h6, h7 et h8 qui représentent la totalité des habitats ouverts initiaux. La qualité de ce cluster n'est pas assurée, ou de manière très médiocre par les habitats boisés h9 à h12, les autres habitats boisés restent plus nuancés quant à la qualité de fourniture de ces SE, avec une qualité médiocre à moyenne. Dans le tableau des résultats de l'ACP, ce cluster était caractérisé par des habitats naturels et ouverts. Cela confirme tout-à-fait la grille présentée par le modèle. Cette analyse permettra ainsi d'affiner les résultats déjà obtenus sur les clusters. Dans la suite de l'analyse des clusters, le cluster 2 composé uniquement du SA04 semble être fourni en majorité par le h12 et le h1, qui sont tous les deux des habitats boisés, l'un naturel, l'autre anthropique. Le cluster 4 ne connaît pas une grande qualité de fourniture de la part des habitats impliqués dans le LIFE (initiaux et cibles). Le SA01 concernant le pâturage est favorisé dans les habitats naturels ouverts h5, h6, h7, H3 et H5, tandis que la fourniture du SA03 ne semble favorisé par aucun habitat. Pour ce qui est du cluster 5, composé des SA05 et SA06 qui concernent tous les deux la restitution d'eau potable et non-potable par le milieu, semble être fourni principalement par les habitats h8, H2 et H3, qui sont tous des habitats naturels ouverts. Enfin, le dernier cluster (3) caractérisé par les services SA02, SR02, SR03, SR04, SR07 et SR08 a une fourniture commune assez moyenne pour l'ensemble des habitats considérés par le LIFE. Il y a tout de même une meilleure qualité de SE fournie par les HIC que par les habitats cibles, même si les habitats initiaux restent tout de même source des SE, le seul habitat fournissant l'ensemble des services évalués de manière médiocre est le h12 : peupleraie plantée (à part le service de fourniture de biomasse, bien fourni par cet habitat).

Le tableau bilan 12 résume l'ensemble des données évoquées dans cette partie.

| N° du groupe | SE du groupe                         | Type d'habitats associé (ACP) | Habitats fournissant les services du groupe |
|--------------|--------------------------------------|-------------------------------|---|
| 1            | SR01, SR05, SR06, SC01, SC02 et SC03 | Hab. naturels ouverts         | H2, H3, H4, H5, h7 et h8                    |
| 2            | SA04                                 | Hab. anthropiques fermés      | h1, h2, h4 et h12                           |
| 3            | SA05, SA06                           | Hab. anthropiques ouverts     | H3 et h8                                    |
| 4            | SA01, SA03                           | Hab. anthropiques ouverts     | H3 et h6                                    |
| 5            | SR02, SR03, SR04, SR07, SR08, SA02   | Hab. naturels fermés          | Tous habitats du projet                     |

Tableau 12 : Bilan des regroupements des services écosystémiques et des habitats

Le tableau 12 résume l'interaction entre habitats et fourniture de SE qui est à l'origine de l'hypothèse établie en amont de la conception de la méthode, selon laquelle les services écosystémiques peuvent être évalués en fonction des habitats, d'où la création de matrices telles que présentées en partie III.1.C. Grâce à ces résultats 5 groupes de services écosystémiques ont pu être distingués et leur fourniture être associée à des habitats particuliers. Cependant, la question initialement posée dans cette étude repose sur la potentielle évolution de cette qualité de fourniture des SE après restauration des habitats cibles. Bien que, la variable Note ait été expliquée par l'interaction entre les variable Habitat et SE, il semble pertinent d'aller explorer d'autres variables explicatives d'évolution. En effet, la significativité des réponses avant/après a été analysée pour l'ensemble des sites du LIFE, dans la partie IV.1.A, et montre une évolution. Le modèle utilisé dans la partie précédente est tout-à-fait pertinent, mais n'englobe pas l'ensemble des descripteurs nécessaires à la compréhension des évolutions de SE observés dans l'étude. Ainsi, un nouveau modèle doit être analysé afin de valider à la fois les attendus et les hypothèses de l'étude.



C. Modélisation de la qualité des services écosystémiques par intégration des différentes variables de l'étude

Afin de comprendre les attributions de notes par les experts, une modélisation apparaît comme le meilleur outil. Pour rappel, voici le modèle (LMA) choisi pour décrire l'évolution des services.

Les résultats des interactions sont consignés dans un tableau (tab. 13). Les coefficients détaillés du LMA sont en [annexe 3](#).

|              | D. freedom (Df) | Resid. Df | Variance   | Resid. Var | Pr(Chi)       |
|--------------|-----------------|-----------|------------|------------|---------------|
| NULL         | NA              | 76206     | NA         | 96364.47   | NA            |
| Travaux      | 1               | 76205     | 1591.2507  | 94773.22   | 0.000000e+00  |
| SE           | 16              | 76189     | 21096.1881 | 73677.03   | 0.000000e+00  |
| Site         | 15              | 76174     | 2401.4503  | 71275.58   | 0.000000e+00  |
| Nom          | 44              | 76130     | 6568.8889  | 64706.69   | 0.000000e+00  |
| Travaux : SE | 16              | 76114     | 853.4801   | 63853.21   | 2.426722e-171 |

Tableau 13 : résultats de l'anova du LMA

Les résultats du modèle linéaire généralisé ont été superposés aux résultats des experts (fig. 30).

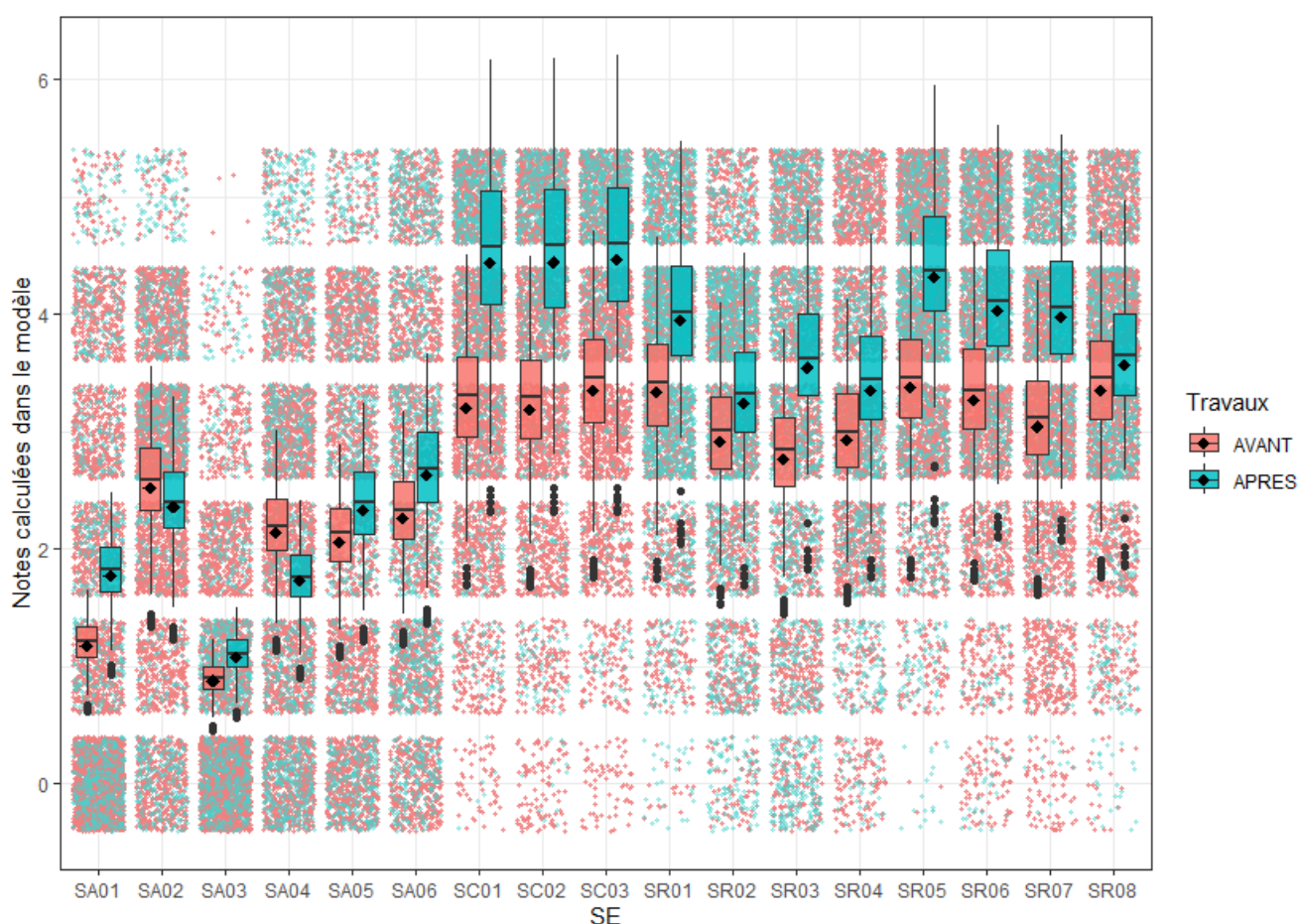


Figure 30 : Boxplot des notes calculées par le modèle LMA et scatterplot des notes des experts (points) en fonction des SE (les traits représentent la médiane et les losanges, la moyenne)

Si l'étude à l'échelle de l'ensemble des sites du LIFE est concluante, il semble pertinent de s'intéresser aux résultats obtenus à l'échelle des sites. La limite fixée pour réaliser une étude par site était de 15 réponses, le site de la basse vallée de la Somme de Pont-Rémy à Breilly (abrégé BVS\_PR\_B) (FR2200355) remplit cette condition. Ainsi, les résultats de l'analyse du site de la BVS sont présentés dans la partie suivante.

## 2. Contribution des travaux aux SE à l'échelle d'un site

### A. Impact de la restauration sur les services – échelle d'un site

De même que précédemment, une première approche de l'évolution de la fourniture des services est lisible aisément dans un spiderchart (fig. 31). Le site de la BVS\_PR\_B est choisi comme échelle du site parce que 15 matrices ont été remplies pour ce site, ce qui représente un nombre suffisant (Campagne *et al.*, 2017)

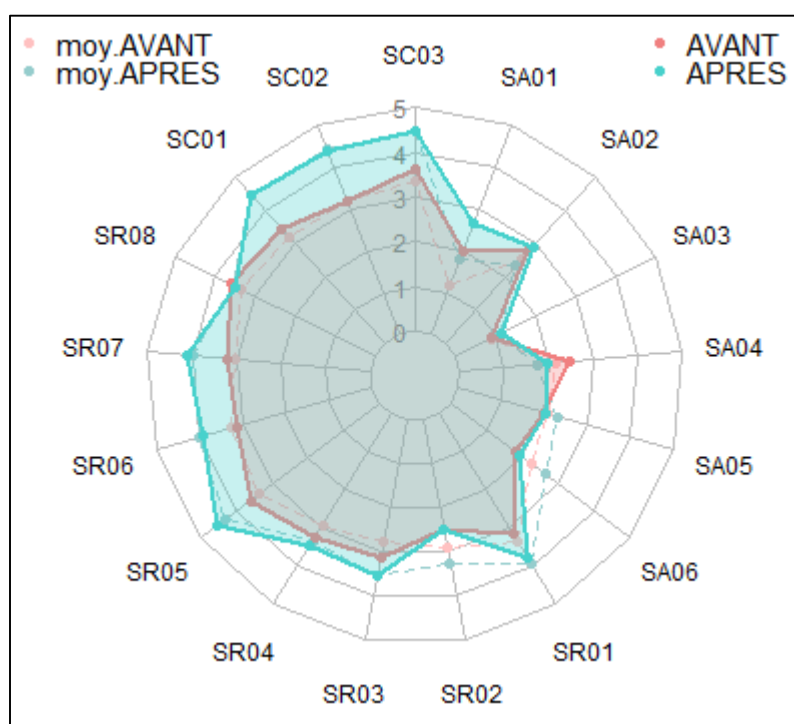


Figure 31 : Spiderchart de l'évolution de la qualité de fourniture des SE après les travaux de restauration pour tous les sites du LIFE, pour la BVS\_PR\_B

Dans cette figure, les traits pleins correspondent à la moyenne des notations associées au site de la BVS\_PR\_B et les traits pointillés à la moyenne du projet. A première vue, des variations par rapport à la moyenne du projet se distinguent pour les services d'approvisionnement (SA). Par exemple, la fourniture du SA01 se situe au-dessus de la moyenne du projet, avant comme après. De plus, une augmentation de fourniture du service après travaux a été déterminée par les experts. Concernant les services SA02 et SA03, leur qualité de fourniture se situent dans la moyenne du projet. Une diminution de la fourniture du service SA04 après travaux est cependant à noter. Pour les SA05 et SA06, tous deux en lien avec la fourniture d'eau potable, connaissent une baisse par rapport au projet et aucune évolution n'est observable à ce stade après les travaux. Pour les services de régulation (SR), seul le SR02 se situe en dessous de la moyenne, par rapport aux autres SR qui suivent globalement la moyenne du projet. D'ailleurs, à part les services SR02 et SR08, dont la qualité de fourniture n'évolue pas avec les travaux, tous les autres SR connaissent une augmentation de leur qualité de fourniture. Enfin, pour les services culturels, ils suivent tout-à-fait la tendance du projet et connaissent une forte augmentation après travaux. Les résultats pour chaque type de SE ont été étudiés (fig. 32).



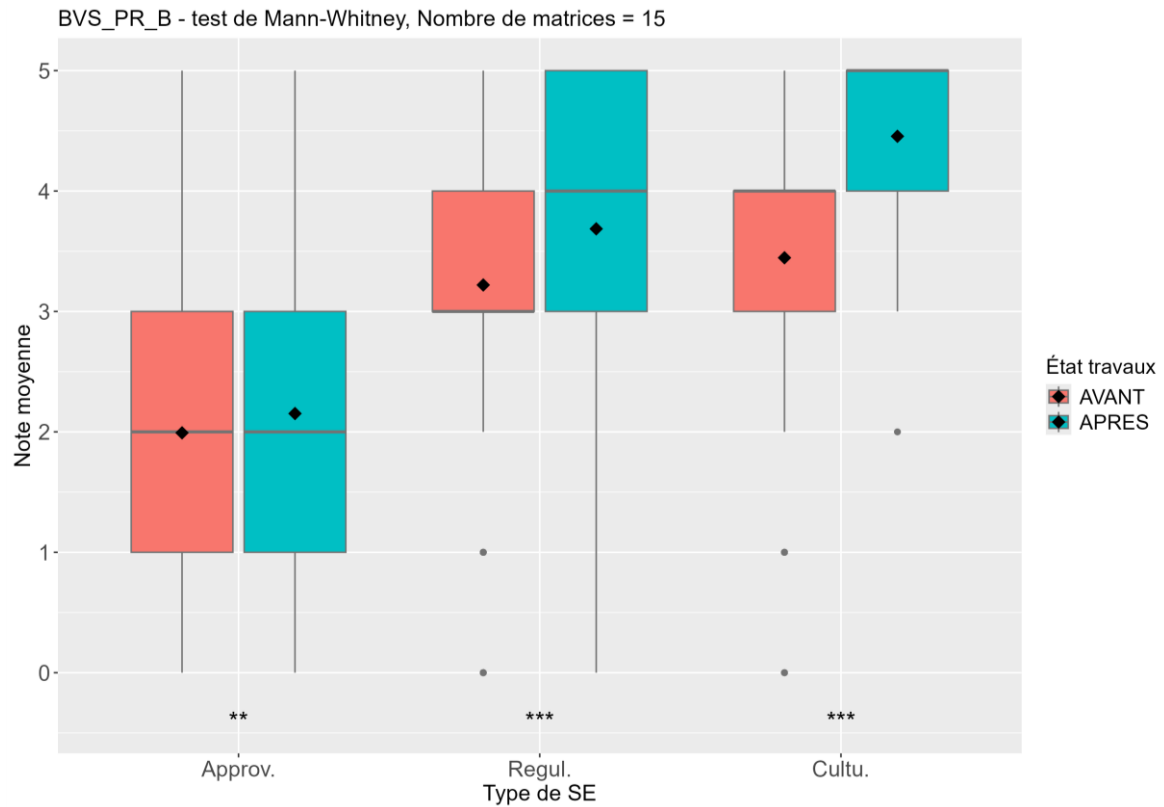


Figure 32 : Comparaison des notes de qualités des types de SE, site BVS\_PR\_B

Tout d'abord, les évolutions des types de services sont toutes significativement différentes et tendent toutes les trois vers l'augmentation après la restauration. Les services d'approvisionnement montrent cependant visiblement moins de significativité que les autres types, une étude par SE s'avère nécessaire (fig. 33, 34 et 35). Il est intéressant de noter que l'allure globale de ce graphique ressemble très fortement à celle présentée par le même graphique pour l'ensemble des sites du LIFE Anthropofens (partie III.A.1).

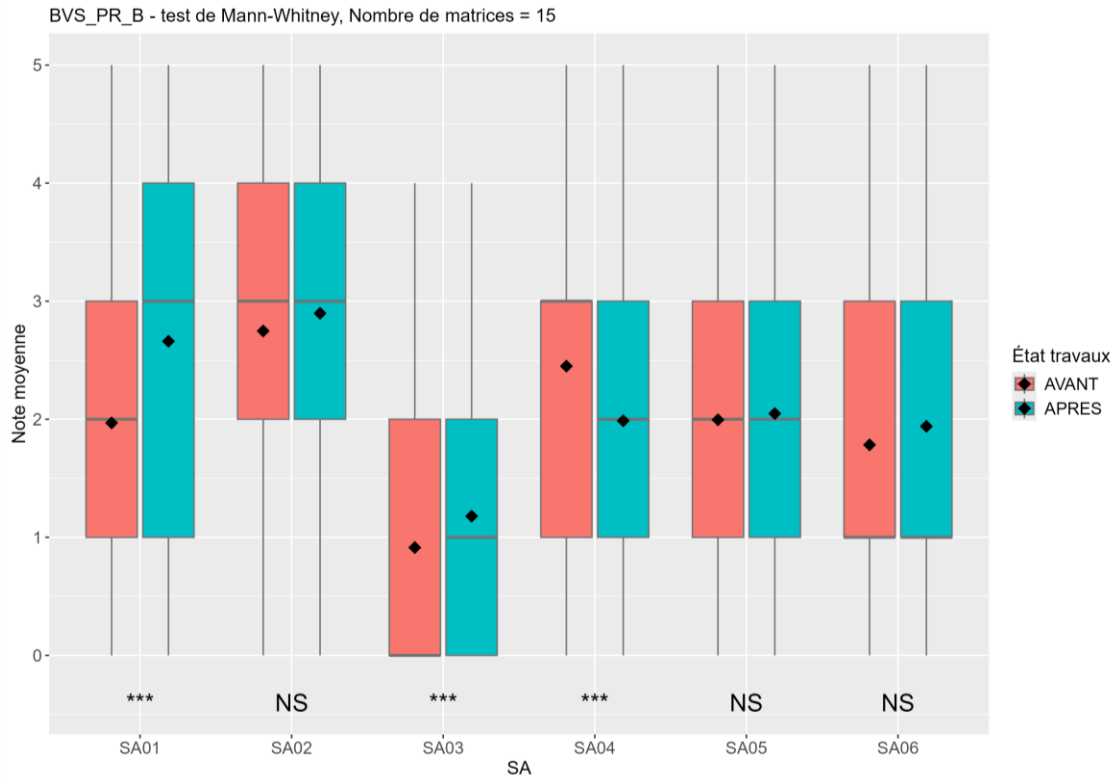


Figure 33 : Comparaison des notes de qualités des types de SA, site BVS\_PR\_B, NS = non significatif

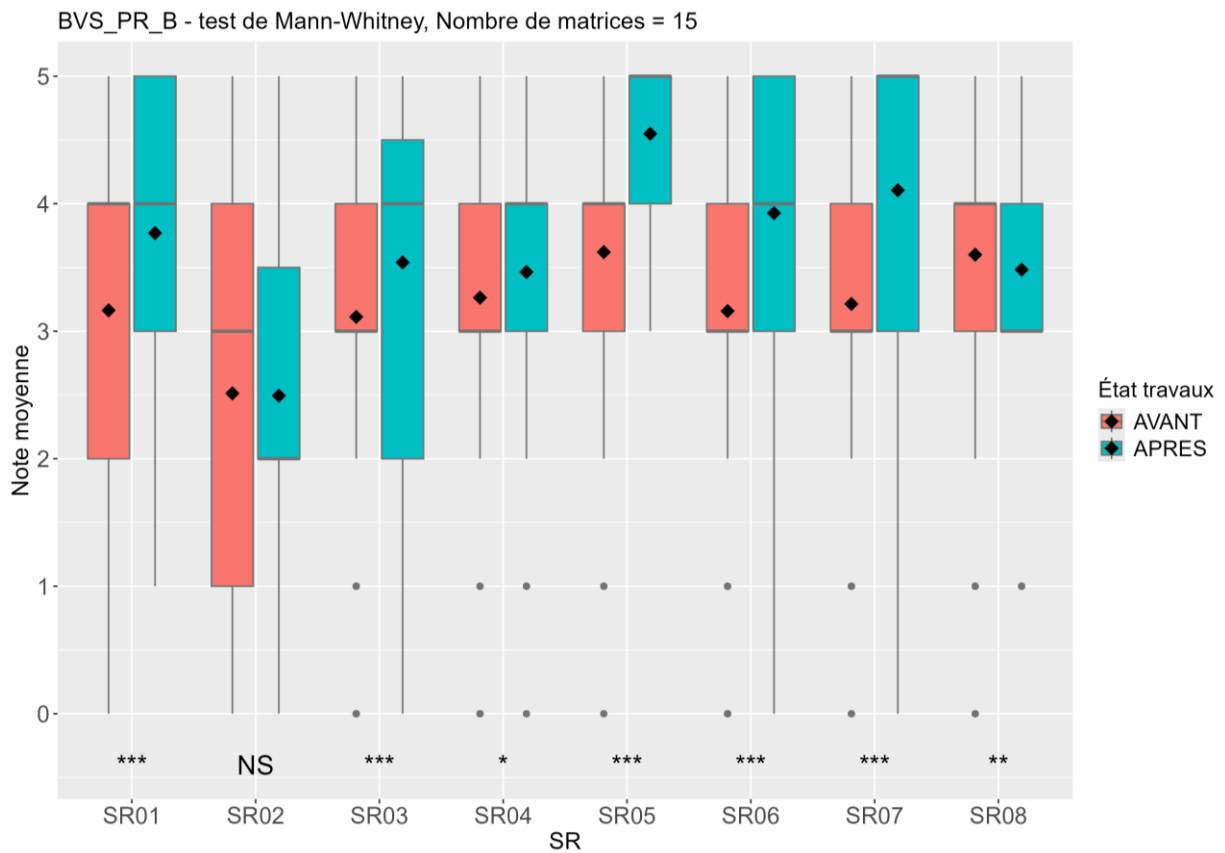


Figure 34 : Comparaison des notes de qualités des types de SR, site BVS\_PR\_B

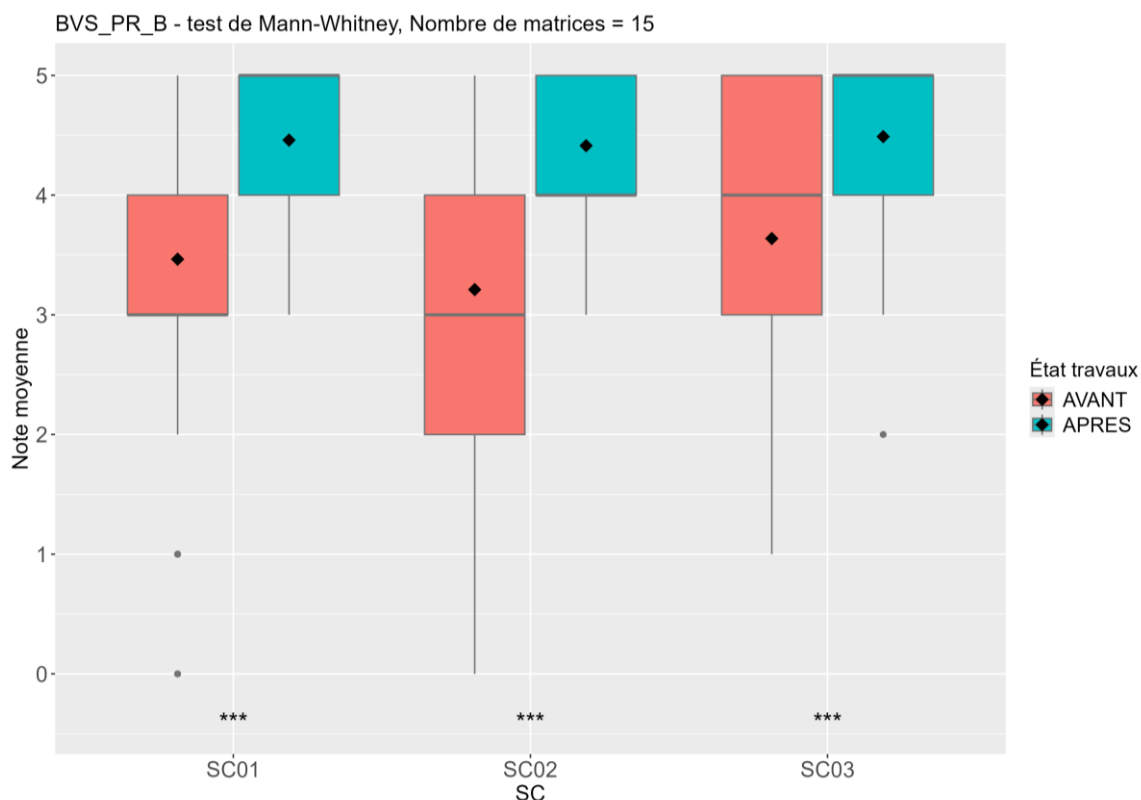


Figure 35 : Comparaison des notes de qualités des types de SC, site BVS\_PR\_B

Les services SA01, SA03 et SA04 sont les seuls à être significativement différents avant et après travaux. En effet, les séries statistiques des autres SA sont trop semblables pour se différencier. D'autre part, si les SA01 et SA03 connaissent une augmentation après la restauration, il s'agit d'une diminution de qualité de fourniture pour le SA04. Il convient également de souligner que les notations de ces services possèdent quasiment tous 50% de leur notation entre 3, voire 4 échelles de notation.

Tous les SR sont significativement différents avant et après la restauration, hormis le SR02 dont la différence temporelle n'est pas significative. Pour les SR04 et SR08, les différences sont significatives, car les moyennes sont assez différentes mais les séries statistiques avant/après travaux se ressemblent et font alors diminuer la significativité, du fait que seules 15 matrices évaluent ce site. En ce qui concerne les tendances d'évolution des services de régulation après travaux, tous connaissent une augmentation significative de leur qualité de fourniture, à part le SR08, qui lui diminue et va à l'encontre de l'évolution observée à l'échelle du projet et le SR02 qui n'est pas significativement différent. Enfin, les réponses associées aux services de régulation sont assez étalées pour le SR01, SR03 « après », SR06 « après », SR07 « après ». Ces derniers ont 50% de leurs réponses entre 3, voire 4 valeurs de l'échelle et pour la plupart, 100% de leurs réponses entre 0 et 5. Sinon, les résultats sont assez regroupés par rapport aux services d'approvisionnement observés précédemment. En général, en dehors du SR02 et des services précédemment cités, tous les autres services de régulation oscillent entre 2 valeurs de l'échelle et 100% entre 4 valeurs de l'échelle. Enfin, les qualités de fourniture des trois services culturels sont significativement meilleures après travaux qu'avant. Les notes avant travaux sont assez étalées, 50% des notes résident entre 2 ou 3 valeurs, et 100% des valeurs entre 4 et 6 notes de l'échelle.

Les détails des résultats des tests statistiques ont été consignés (tab. 14).

| Echantillons AV/AP | Résultat du test (W) | p-value   | df   |
|--------------------|----------------------|-----------|------|
| SA                 | 2684641              | 0.001472  | 4692 |
| SR                 | 5178299              | < 2.2e-16 | 6095 |
| SC                 | 871290               | < 2.2e-16 | 2242 |
| SA01               | 118436               | 3.161e-10 | 1161 |
| SA02               | 76936                | 0.9924    | 1021 |
| SA03               | 74643                | 0.000183  | 963  |
| SA04               | 64742                | 1.882e-06 | 1049 |
| SA05               | 56849                | 0.4539    | 879  |
| SA06               | 59329                | 0.253     | 903  |
| SR01               | 97100                | 6.79e-10  | 1049 |
| SR02               | 61885                | 0.5766    | 935  |
| SR03               | 71906                | 1.668e-06 | 905  |
| SR04               | 52028                | 0.04568   | 797  |
| SR05               | 133000               | < 2.2e-16 | 1137 |
| SR06               | 77710                | < 2.2e-16 | 923  |
| SR07               | 110755               | < 2.2e-16 | 1073 |
| SR08               | 59992                | 0.004917  | 1025 |
| SC01               | 106788               | < 2.2e-16 | 993  |
| SC02               | 89041                | < 2.2e-16 | 881  |
| SC03               | 95302                | < 2.2e-16 | 981  |

Tableau 14 : résultats des tests de Mann-Whitney sur le site de la BVS\_PR\_B

Afin de suivre la logique de l'étude, ces évolutions à l'échelle du site nécessitent plus ample réflexion quant aux caractéristiques écologiques à l'origine de ces différences.

## B. Caractéristiques écologiques des habitats de la BVS\_PR\_B et fourniture des SE

Le jeu de données analysé permet de visualiser l'évolution des services écosystémiques sur l'ensemble du territoire, pour l'ensemble des habitats. Chaque habitat fournit une valeur de qualité de fourniture de service écosystémique différente, aux dires des experts, selon les habitats. En BVS\_PR\_B, un tableau récapitulatif des notes en fonction des habitats peut être réalisé (tab. 15).

| AVANT | SA01 | SA02 | SA03 | SA04 | SA05 | SA06 | SR01 | SR02 | SR03 | SR04 | SR05 | SR06 | SR07 | SR08 | SC01 | SC02 | SC03 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| h1    | 0,9  | 2,99 | 1,17 | 3,78 | 1,31 | 1,55 | 2,32 | 2,45 | 2,75 | 2,66 | 2,87 | 2,25 | 3    | 3,88 | 2,67 | 2,63 | 3,04 |
| h2    | 1,87 | 2,7  | 0,73 | 3,01 | 2,03 | 1,85 | 3,23 | 2,71 | 2,85 | 3,03 | 3,49 | 3    | 3,58 | 4,29 | 3,79 | 2,96 | 3,38 |
| h4    | 1,45 | 2,83 | 0,87 | 2,95 | 1,85 | 1,56 | 2,43 | 2,13 | 2,71 | 2,95 | 3,06 | 2,36 | 2,41 | 3,47 | 2,67 | 2,35 | 3,13 |
| h5    | 1,95 | 2,49 | 1,06 | 1,57 | 1,88 | 1,73 | 3,05 | 2,53 | 3,26 | 3,57 | 3,6  | 3,25 | 2,51 | 3,32 | 2,87 | 2,7  | 3,62 |
| h7    | 1,96 | 2,95 | 0,73 | 2,11 | 2,37 | 1,91 | 3,7  | 2,73 | 3,51 | 3,84 | 4,03 | 4,05 | 3,51 | 3,43 | 3,76 | 4,11 | 4,19 |
| H5    | 3,38 | 2,57 | 0,91 | 1,53 | 2,43 | 2,04 | 4,05 | 2,5  | 3,48 | 3,38 | 4,44 | 3,77 | 4,07 | 3,29 | 4,69 | 4,24 | 4,27 |
|       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| APRES | SA01 | SA02 | SA03 | SA04 | SA05 | SA06 | SR01 | SR02 | SR03 | SR04 | SR05 | SR06 | SR07 | SR08 | SC01 | SC02 | SC03 |
| H3    | 4,22 | 3,06 | 1,51 | 2,39 | 1,69 | 1,7  | 3,48 | 2,55 | 3,49 | 3,15 | 4,29 | 3,27 | 3,08 | 3,17 | 4    | 4,03 | 4,21 |
| H4    | 0,79 | 2,46 | 0,84 | 1,27 | 1,88 | 1,75 | 3,35 | 2,07 | 3,49 | 3,61 | 4,53 | 4,23 | 4,53 | 3,45 | 4,71 | 4,53 | 4,63 |
| H5    | 2,87 | 3,14 | 1,17 | 2,27 | 2,56 | 2,35 | 4,45 | 2,83 | 3,64 | 3,63 | 4,82 | 4,29 | 4,7  | 3,82 | 4,68 | 4,67 | 4,63 |

Tableau 15 : Tableau des moyennes pondérées des qualités des SE par habitats de la BVS\_PR\_B

Globalement, ces données suivent les tendances qui ont été observées dans les analyses des spiderchart et des boxplots précédents. En effet, les services ayant les meilleures notes sont les services de régulation SR01, SR03, SR04, SR05, SR06, SR07 et SR08, ainsi que les trois services culturels. Ces données montrent que les habitats ne fournissent pas les services de la même manière. Ce qui est intéressant d'observer ici c'est que même à l'échelle d'un site, les résultats obtenus pour le projet quant à la diversité de capacité de fourniture d'habitats suivent la même tendance. Le tableau 08 de la partie IV.1.B. montrait les résultats de l'ACP sur le projet, avec la différenciation de 5 groupes de services dont la fourniture est favorisée à des habitats particuliers. Notamment, le premier groupe faisant appel à l'importance de la préservation de la biodiversité, de la qualité de l'eau et des cycles hydrologiques par la connaissance, pour le savoir et le bien-être humain, avec les SR01, SR05, SR06, SC01, SC02 et SC03 s'associait préférentiellement aux habitats d'HIC, du h6, h7 et h8. Le tableau 15 présente en effet, de meilleures notes sur les SE précédemment cités sur les habitats d'HIC avant et après et h7. Les habitats boisés h1, h2 et h4 fournissent bien le SA04 (fourniture de matériaux pour l'homme) par rapport aux autres habitats, comme l'ACP sur l'ensemble du projet le proposait. De même, les SA05, SA06, sont notés entre 1 et 3 sur l'ensemble des habitats, n'ayant pas d'habitat de préférence forte. Le SA01 et SA03 possèdent les meilleures notes, relativement aux autres habitats, auprès des habitats de prairies, ici H3, ce qui est en accord avec le groupe 4 de l'ACP du projet. Enfin, toujours en respectant ces résultats d'ACP, le dernier groupe montre que l'ensemble des habitats naturels favorisent les SR02, SR03, SR04, SR07, SR08 et SA02. En effet, sur l'ensemble des habitats de la BVS\_PR\_B, tous sont naturels et les moyennes observées sont généralement assez hautes, relativement aux autres services, par exemple le SA03. Les résultats de l'ACP peuvent donc être appliqués à plus petite échelle et notamment sur le site de la BVS\_PR\_B.

### C. Cartographies des qualités de fourniture des SE sur le site de la BVS\_PR\_B

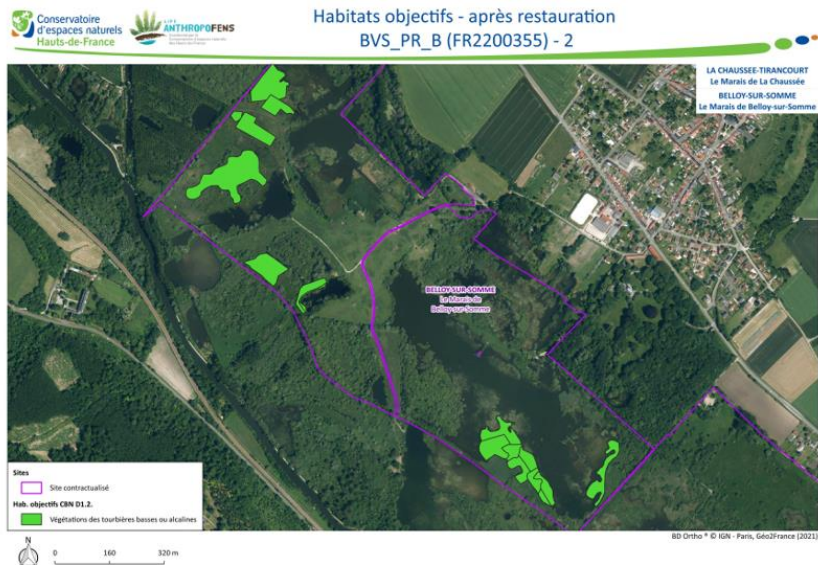
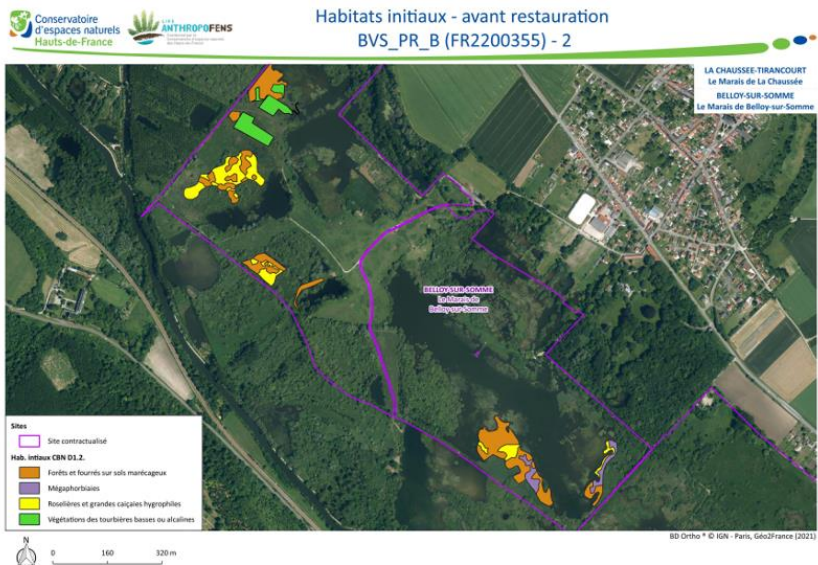
Les habitats initiaux du site de Belloy sur Somme, faisant partie du site Natura 2000 de la Basse vallée de la Somme de Pont-Rémy à Breilly, sont le h2 : forêts et fourrés sur sols marécageux, le h5 : mégaphorbiaie, le h7 : roselières et grandes cariçaies hygrophiles et H5 : Végétation des tourbières basses ou alcalines. Ce dernier habitat HIC, présent avant les travaux, est restauré sur l'ensemble des polygones de travaux. Les résultats relatifs aux SA, SR et SC à l'échelle du site ont été consignés sous la forme de cartographies (respectivement fig. 36, 37 et 38).

L'ensemble des habitats initiaux fournissent les services d'approvisionnement avec une valeur entre 1,8 et 2,1, tandis que l'habitats H5 restauré les fournit avec une note moyenne de 2,4.

Les habitats initiaux fournissent les SR avec des notes moyennes oscillant entre 3,1 et 3,6, alors que le H5 restauré les fournit avec une note moyenne de 4.

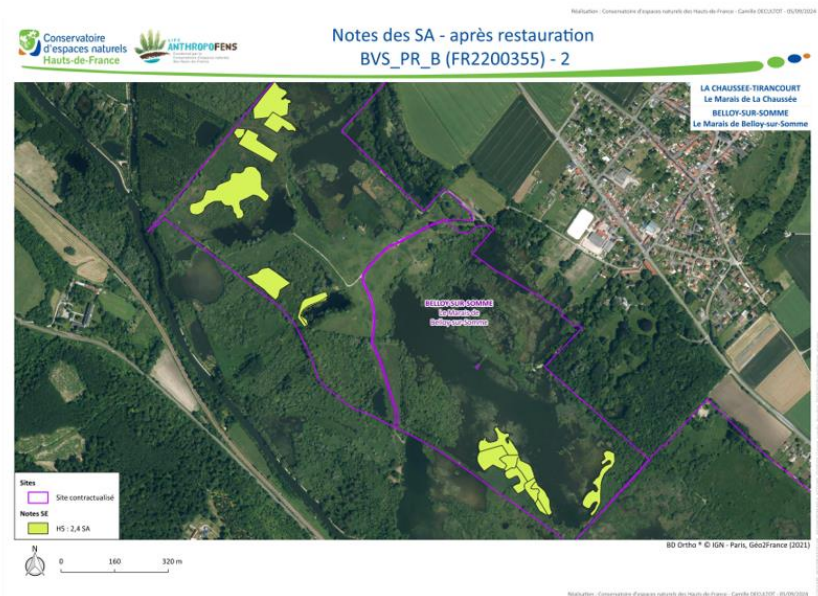
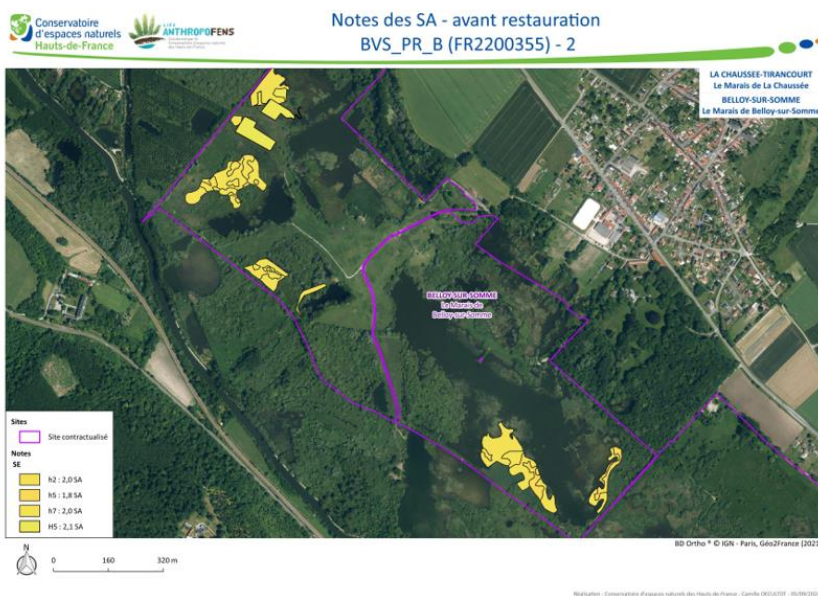
Enfin, les services culturels sont fournis par les habitats initiaux avec des valeurs allant de 3,1 à 4,4. Le H5 restauré a une note moyenne de 4,7 pour ces services.





## Légende habitats

- Hab. initiaux CBN D1.2.
- Forêts et fourrés sur sols marécageux
  - Mégaphorbiaies
  - Roselières et grandes caïcales hygrophiles
  - Végétations des tourbières basses ou alcalines



## Échelle des notes

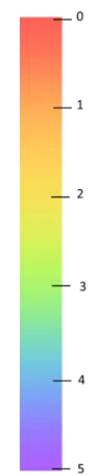
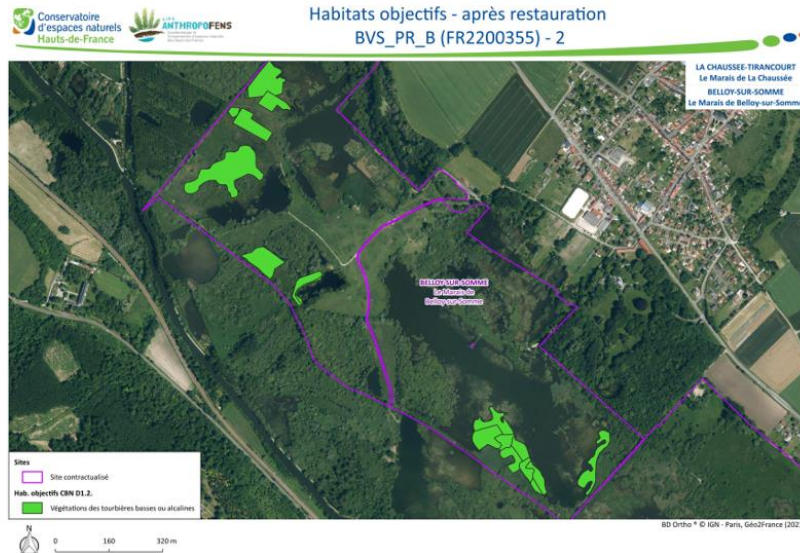
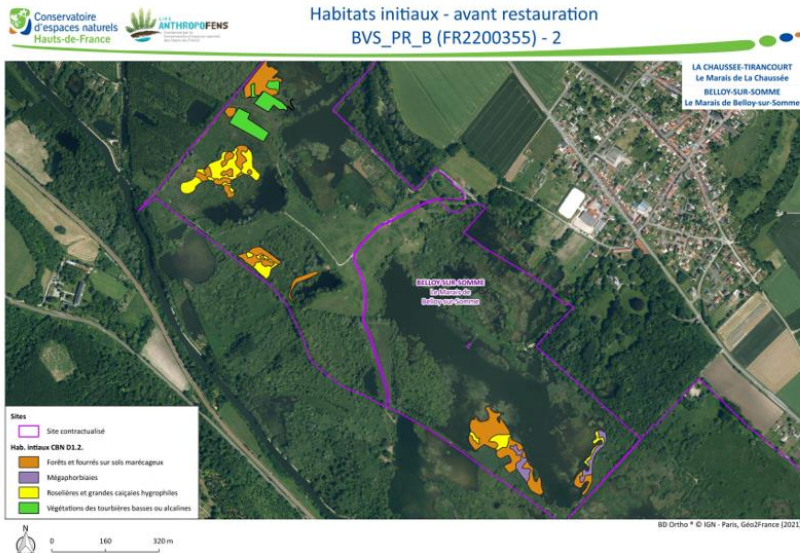


Figure 36 : Cartographie des résultats avant/après restauration des SA sur le site de la BVS\_PR\_B

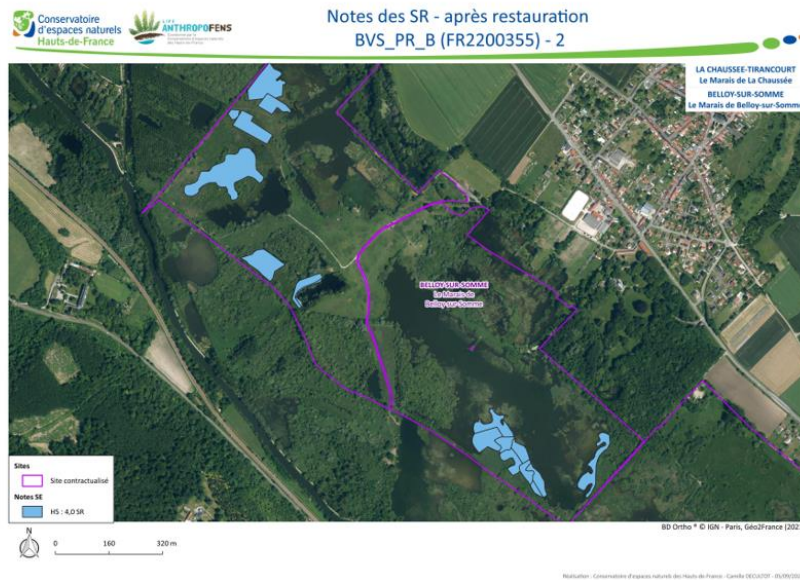
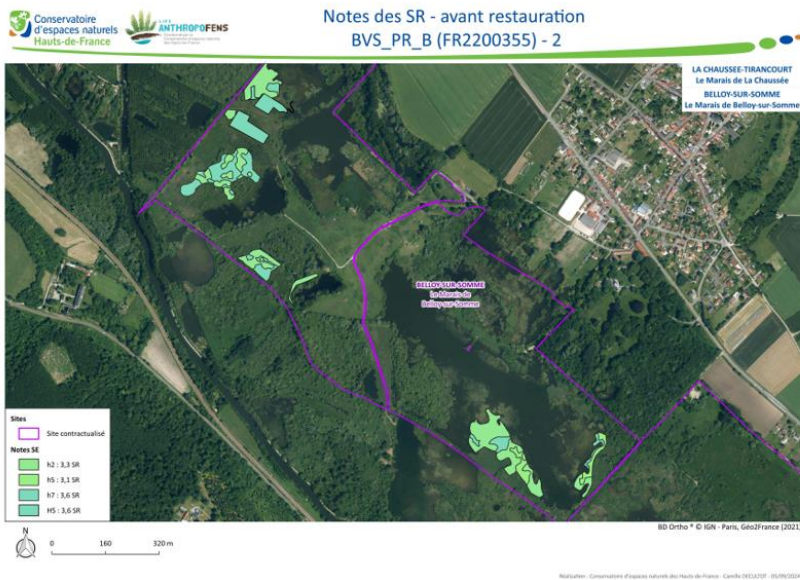




## Légende habitats

### Hab. initiaux CBN D1.2.

- Forêts et fourrés sur sols marécageux
- Mégaphorbiaies
- Roselières et grandes caïçales hygrophiles
- Végétations des tourbières basses ou alcalines



## Échelle des notes

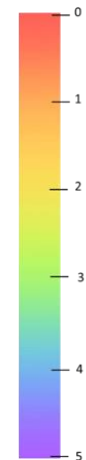
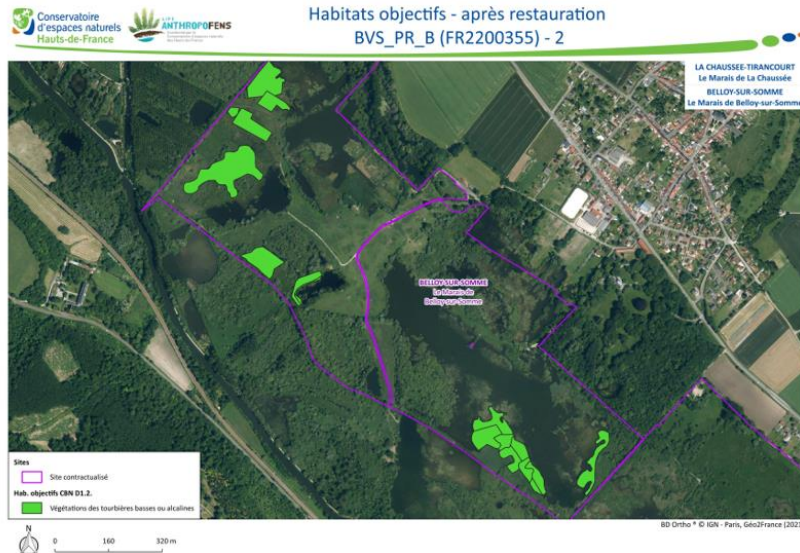
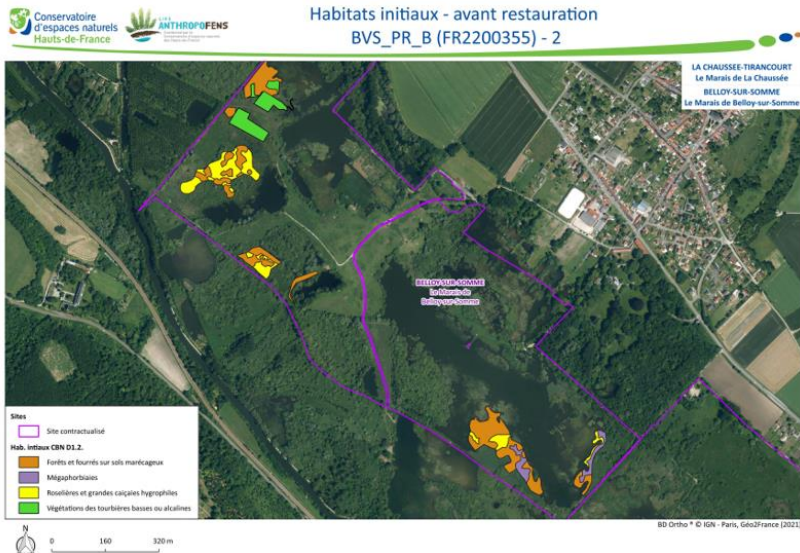


Figure 37 : Cartographie des résultats avant/après restauration des SR sur le site de la BVS\_PR\_B

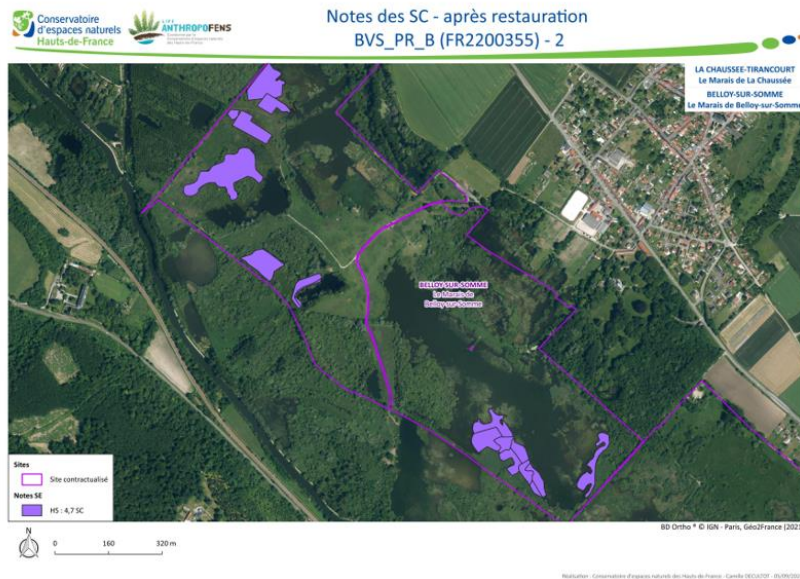
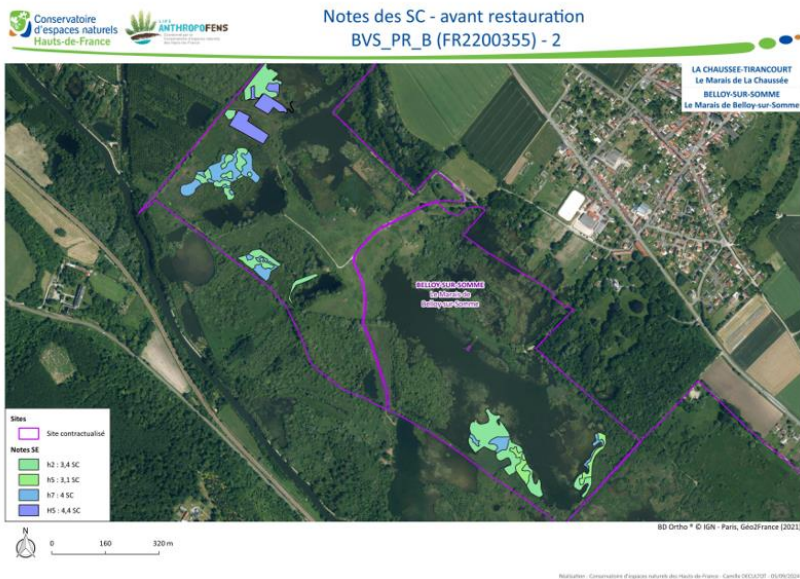




## Légende habitats

### Hab. initiaux CBN D1.2.

- Forêts et fourrés sur sols marécageux
- Mégaphorbiaies
- Roselières et grandes caïçales hygrophiles
- Végétations des tourbières basses ou alcalines



## Échelle des notes

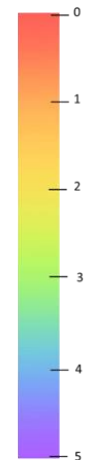


Figure 38 : Cartographie des résultats avant/après restauration des SC sur le site de la BVS\_PR\_B

## VI. Discussion

1. Interprétation des évolutions de qualité de SE après restauration à l'échelle du projet
  - A. Les services d'approvisionnement

Sur l'ensemble du projet, seuls deux services sont impactés négativement : les SA02 et SA04, correspondant respectivement à la fourniture de nourriture pour l'Homme, d'origine animale sauvage et à la fourniture de matériaux pour l'Homme (pour l'énergie, le bois d'œuvre, la litière...). Il convient de rappeler que parmi les 6 habitats objectifs du projet LIFE Anthropofens, 4 sont des habitats ouverts et ces derniers sont les plus importants en termes de surface de restauration (H2 : Marais calcaire à Marisque (7210) H3 : Prairie à Molinie sur sols calcaires, tourbeux ou argilo-limoneux (6410), H4 : Tourbière de transition (7140) et H5 : Végétation de tourbière basse alcaline (7230)). La perte d'habitats boisés engendre la diminution de la chasse de mammifères tels que les cerfs, les chevreuils, les sangliers, etc..., sensibles à la fragmentation d'habitats boisés (Chiarello, 1999). Cela explique la baisse du SA02 déclarée par les experts. Cependant, cette diminution des notes avant/après la restauration est assez faible : 2,5 à 2,4, soit une baisse de 4% de la qualité d'avant travaux dans le cas de ce service. Certes, la perte d'habitats boisés provoque une diminution mais, dans la Somme, et plus particulièrement dans les sites étudiés, la chasse la plus majoritaire est celle du gibier d'eau, qui sera favorisée par l'augmentation des surfaces de milieux humides et un niveau d'eau plus élevé, comme prévu par les travaux. Concernant la baisse de fourniture de matériaux du service SA04, après travaux, la baisse est plus drastique que pour le SA02. En effet, la qualité évaluée par les experts se voit attribuer une diminution de 20% de la qualité initiale du service. En effet, les travaux sont prévus tels que les espaces boisés plantés inclus dans les polygones de travaux connaîtront une restauration d'un HIC. Cela signifie que si le milieu visé est ouvert, aucune exploitation de bois ne sera réalisée après travaux, hors travaux ponctuels de lutte contre les ligneux pour le maintien du milieu ouvert, dont la biomasse pourra être valorisée comme matériau. D'autre part, si le HIC visé est boisé, notamment le H1 : forêt alluviale à *Alnus glutinosa* et *Fraxinus excelsior* (91E0\*), l'objectif de gestion est le vieillissement des arbres. De ce fait, l'exploitation de ligneux n'est pas envisagée, car une fois tombés, les arbres possèdent un tout nouvel intérêt écologique en devenant un lieu d'abris d'un roche biodiversité, notamment saprophyte (Jonsson, *et al.*, 2005). Ainsi, hormis, encore une fois, de ponctuels travaux d'entretien du milieu, aucune exploitation de biomasse ne sera réalisée.

Si les SA02 et SA04 connaissent une baisse de qualité, du fait de la perte des espaces boisés, le reste des services d'approvisionnement ne sont pas dans le même cas. En effet, le reste de ces services est, d'après les résultats, au contraire favorisés par la restauration. Les deux services SA01 et SA03 concernent respectivement la fourniture de nourriture pour l'Homme d'origine animale élevée, et la fourniture de nourriture d'origine végétale sauvage. Les résultats ont montré que ce premier est favorisé par des milieux ouverts tels que des milieux de prairies (H3). Ce type de milieu est favorable à l'installation de pâturage extensif, justifiant la fourniture de nourriture d'origine animale élevée favorisée avec la restauration des HIC ouverts. Cependant, certains de ces milieux HIC ouverts nécessitent une lutte contre les ligneux, ce qui est l'objet d'une gestion par pâturage dans la quasi-totalité des sites du projet. Ainsi, les milieux de prairies sont des espaces favorables pour l'installation de pâturage et en même temps, le pâturage permet le maintien de l'état ouvert des milieux (François *et al.*, 2012). Cependant, il est à noter dans des préoccupations futures, qu'avec l'augmentation de l'engorgement, l'enfoncement des animaux peut augmenter et dégrader l'habitat à terme (Berquer and Castelli, 2022). Ainsi, les experts semblent percevoir et exprimer la double efficacité de ce service, mais peut-être mais la question de la longévité du système tourbeux sera à prendre en compte. Pour ce qui est du SA03, les espaces de boisés sont propices à la cueillette de champignons, de baies, de fruits à coques, etc... (Copena *et al.*, 2022) donc la diminution des espaces boisés tend à faire diminuer cette pratique de cueillette. D'autres part, il semblerait que les champignons, notamment, soient favorisés par un milieu acide, avec des Sphaignes et boisé (Moreau, 2002), en somme, des caractéristiques qui ne seront pas, ou peu, présentes après



restauration. Cependant, ce service est également fondé sur la fourniture de foin ou de litière pour les animaux domestiques. Les milieux de HIC ouverts vont connaître des travaux de fauche réguliers engendrant la production de cette ressource, participant ainsi à ce service après travaux. Les deux derniers services d’approvisionnement SA05 et SA06 concernent l’alimentation d’un stock d’eau potable et non-potable. Globalement ces deux services évoluent conjointement et montrent une hausse après restauration. De manière commune, les experts ont établi que les habitats boisés ne fournissaient que peu ces deux services, à l’inverse des HIC et habitats aquatiques (h8). Les qualités des services de fourniture de stock d’eau SA05 et SA06 sont meilleures après les travaux et sont d’autant plus valorisées sur des habitats turfigènes HIC (H1, H2, H3, H4, H5) ou aquatiques (h8). En effet, si la qualité de la tourbe s’améliore, ce qui est l’objectif des travaux et de la restauration d’habitats de tourbières, le système hydraulique des tourbes va être d’autant plus effectif. Les habitats aquatiques et turfigènes assurent un stock d’eau en profondeur du massif tourbeux, grâce à leur faible conductivité et permettent un maintien de la hauteur des nappes (Evans, *et al.*, 1999). Pour ce qui est des HIC, associés aux travaux hydrauliques réalisés grâce au projet LIFE visant à rehausser les niveaux d’eau, ils peuvent limiter une dégradation plus poussée et alors participer au soutien de la nappe et donc aux stocks d’eau (Dommain, *et al.*, 2016). D’autre part, le processus d’installation de végétation turfigène et l’accumulation de la tourbe peuvent se mettre en place à nouveau dans les tourbières. Cependant, les experts notent le SA05 plus sévèrement que le SA06. Ceci s’explique parce que peu des sites sont situés dans une Aire d’Alimentation de Captage (AAC) ou à proximité d’une station de pompage d’Alimentation en Eau Potable. Pour les données de volumes d’eau prélevés pour l’irrigation et l’industrie, les données sont moins précises et plus de sites paraissent concernés par ce type de prélèvement (données BNPE fournies aux experts pour évaluation).

## B. Les services de régulation

Les services de régulation sont eux, tous en gain de qualité après les travaux. En effet, les milieux tourbeux possèdent de nombreuses fonctionnalités en lien avec la régulation des cycles de l’eau et de l’azote, comme vu dans la partie II. La participation au stock d’eau douce des systèmes tourbeux a été explicitée dans le paragraphe précédent. Cependant, du fait de la, faible mais existante, capacité de stockage et de rétention inhérente à la structure pédologique des tourbes, ainsi qu’à la rugosité de la végétation, les tourbières prennent également part à la régulation des cycles hydrologiques (Grayson *et al.*, 2010, Van der Wal, *et al.*, 2011). Notamment, elles ralentissent les pics de crues et limitent alors les risques comme le SR01. Plusieurs phénomènes sont à l’origine de cela : d’abord, si le risque survient en période sèche, les premiers centimètres de tourbe constitués entre-autres de macro-pores possèdent de la capacité de stockage jusqu’à saturation (Van der Wal, *et al.*, 2011). Ensuite, physiquement, l’eau en surplus peut se retrouver localement stockée dans les dépressions entre les touradons de molinies, les carex... (Grayson *et al.*, 2010). Enfin, la présence d’une végétation dense, comme dans les habitats de H2 : Marais calcaire à Marisque, ou H3 : Prairie à molinie sur sols calcaire, tourbeux ou argilo-limoneux, demeurent tout-à-fait propice au ralentissement des ondes de crues (Cubizolle, 2019). Ainsi, en améliorant la qualité de la tourbe et de l’habitat turfigène associé grâce aux travaux, la qualité de fourniture du SR01 augmente avec la réalisation des travaux. Le SR02 concerne également l’atténuation des risques naturels, mais est plus relatif aux propriétés inhérentes des habitats. En effet, il s’agit de la capacité de l’habitat à atténuer les mouvements de masse en stoppant le flux de sédiments, grâce à sa rugosité (Grayson *et al.*, 2010, Price *et al.*, 2016). Les risques naturels associés aux mouvements de terrain et aux ruissellements sont associés à la présence, ou absence, de couvert végétal assez rugueux et dense pour limiter l’érosion hydrique. Les experts s’accordent sur le fait que les habitats naturels sont les plus à même à fournir ce service. La littérature explicite que la lutte la plus efficace réside dans un mélange de strates (Rey *et al.*, 2004). En effet, si la strate herbacée s’occupe de couvrir et maintenir le sol en surface, la strate arborée, elle, tend à assécher l’excédent d’eau plus en profondeur et limite théoriquement les glissements de terrain. D’autre part, la morphologie des végétaux joue un rôle important dans la lutte contre le risque de glissement de terrain et d’érosion hydrique (Rey *et al.*, 2004). Il est à noter que quasiment aucun



site étudié ne présente une pente topographique, facteur aggravant de ce risque naturel. Les experts confirment cela en attribuant des notes assez moyennes à l'ensemble des habitats. Les experts désignent cependant un habitat plus favorable à la fourniture de ce service : le H3 : Prairie à molinie sur sols calcaires, tourbeux ou argilo-limoneux. Comme déjà présenté précédemment, cet habitat est fortement structuré par la densité des structures en « touffe » (touradons) fréquemment trouvés dans les habitats de Molinie bleue, justifiant ses notes plus élevées. Dans la même optique de protection des sols, le SR03 décrit un service écosystémique assurant la formation et le développement des sols, ainsi que le maintien de la matière organique. Les experts jugent que les habitats HIC sont sensiblement plus à même de fournir ce service que les habitats initiaux et plus particulièrement les habitats ouverts, par rapport aux boisés. Ce premier constat s'explique simplement par le fait qu'un habitat HIC turfigène permet la formation de tourbe avec une formation de tourbe pouvant aller jusqu'à 1mm par an (Baize *et al.*, 2009). Ainsi la restauration des 5 HIC va permettre à la fois de conserver la tourbe déjà existante et potentiellement d'en former. Plus précisément, l'habitat H4 : Tourbières de transition est, d'après l'étude, l'habitat le plus efficace à fournir ce service. Après la qualité des sols, le service SR04 s'intéresse, lui, à la qualité chimique des sols, par la bioremédiation, *i.e.* le traitement de substances toxiques, d'origine anthropique par les espèces végétales et animales. Les experts s'accordent avec la littérature en associant les meilleures notes aux habitats comportant le roseau commun (*Phragmites australis*) (h7, roselières et grande cariçaie et h5, mégaphorbiaie) connu pour ses capacités de bioremédiation de sites pollués, particulièrement les métaux lourds, et d'absorption des nutriments (Kalu *et al.*, 2021). Après travaux, les habitats HIC se sont vu attribuer des notes assez moyennes sur ce SR04, avec une note assez haute pour l'habitat H3 : Prairie à molinie sur sols calcaire, tourbeux ou argilo-marneux. La caractéristique principale expliquant cette note haute est la même que dans la lutte contre l'érosion hydrique du SR02. La bioremédiation se fait d'abord par la fixation des polluants afin d'éviter leur propagation dans l'ensemble de l'écosystème. La structure et l'enracinement de la Molinie bleue évite cette dispersion en fixant le sol et les polluants éventuels : il s'agit de phytostabilisation (Bakshe and Jugade, 2023). Le service SR06 concerne également la qualité chimique des composants environnementaux, mais se distingue du SR04 car il concerne uniquement la régulation de l'état chimique des eaux. Les experts ont déterminé que les habitats initiaux ouverts h7 et h8, ainsi que HIC étaient efficaces pour ce service. En effet, parmi les habitats initiaux, les habitats h7 : roselière et grandes cariçaies et h8 : milieu aquatique avec installation de radeau flottant sont très pertinents pour ce service. En raison de taux de nitrates assez importants dans l'eau en vallée de l'Avre, des radeaux flottants de macrophytes (h8) ont été positionnés lors des travaux dans les étangs de la réserve naturelle de Boves. Ceux-ci sont composés principalement de roseaux (*Phragmites australis*), de laïches (*Carex*) et de Fougère des marais (*Dryopteris cristata*), rappelant l'habitat h7. Le roseau commun, au même titre que les macrophytes, permet de filtrer l'eau en stockant les nutriments en excès dans son métabolisme et ainsi limite notamment la concentration de nitrates (Benslimane *et al.*, 2013). Après les travaux, à défaut d'avoir des habitats de type roselière, les HIC possèdent des notes moyennes à bonnes concernant ce SR06. Les travaux s'accompagnent d'une amélioration globale de la qualité de l'eau (hausse des niveaux, radeaux de phytoépuration, création de fossés intermédiaire entre les cultures et les tourbières...), cela permet la restauration des habitats HIC relativement sensibles à la qualité de l'eau (Gaudillat and Barda, 2002). La restauration de ces habitats engendrant la formation de tourbe de meilleure qualité implique des phénomènes de dénitrification et de purification de l'eau, améliorant d'autant la qualité de l'eau (Gaudillat and Barda, 2002). Le bon fonctionnement écologique de ce type de milieu apporte bien plus que de la régulation de qualité d'eau ou du sol. En effet, ces milieux participent activement à la protection de la biodiversité avec le service de régulation SR05. Bien que l'ensemble des habitats naturels se sont vu attribuer des notes moyennes à bonnes par les experts, les habitats HIC montrent encore de meilleures notes. En effet, ces habitats, et notamment le H4 : Tourbières de transition, abritent des communautés végétales et animales rares (Gaudillat and Barda, 2002), comme la Dolomède (*Dolomedes plantarius*, liste rouge mondiale, VU), le Vertigo des Moulins (*Vertigo moulinsiana*, liste rouge européenne et mondiale, VU) ou le Liparis de Loesel (*Liparis loeselii*, liste rouge européenne, NT). Restaurer de tels milieux ne peut que donc participer à la protection de la

biodiversité. Enfin, les deux derniers services de régulation participent, eux, à la régulation du climat à la fois mondial et local. Ce premier est d'après les experts favorisé par les habitats HIC, car comme présenté en partie II.F., les tourbières sont des stocks de carbone et permettent de maintenir le carbone emmagasiné depuis le début de la formation des tourbières. Également, les émissions associées aux tourbières dégradées seront limitées et la turfigénèse pourra reprendre. Pour ce qui est de l'échelle locale, l'ensemble des milieux naturels semblent participer à la régulation du climat local (SR08) et plus particulièrement les habitats boisés. En effet, ceux-ci, en plus, de réaliser la photosynthèse à plus grande échelle que les espaces ouverts, fournissent de l'ombrage, conservent l'humidité ambiante et favorisent des températures plus basses (Chen *et al.*, 1999), favorisant un meilleur climat local.

### C. Les services culturels

Enfin, les trois derniers services sont les services culturels concernant respectivement l'éducation et la science, la volonté sociale de léguer les tourbières aux générations futures et le fait de souhaiter conserver de tels milieux en raison de leurs fonctions non-utilitaristes. De manière globale, l'ensemble des 3 services sont fortement fournis par les habitats naturels. Les HIC apparaissent d'après les experts avec d'excellentes notes. En effet, ces habitats étant l'objet de restauration, ils intéressent des scientifiques pour plusieurs raisons. D'abord, par le fonctionnement hydro-écologique singulier de tels écosystèmes (Evans *et al.*, 1999 ; Rey *et al.*, 2004 ; McCarter *et al.*, 2020 ; Grayson *et al.*, 2010 ; Cubizolle, 2019 ; Duranel, 2016), par la faune et la flore exceptionnelle de ces milieux (Payette et Rochefort, 2001 ; Moreau, 2002), et par les ressources du passé enfouies dans la tourbe comme les pollens et les indices des paléo-climats (Garcia *et al.*, 2024). D'autre part, visiblement ces milieux singuliers motivent leur préservation pour les générations futures, symbolisant des lieux particuliers que les générations futures souhaiteront découvrir tout autant que les actuelles. Ceci explique la hausse toute particulière des trois services culturels après les travaux. Il est d'ailleurs intéressant de noter que l'habitat H4 : tourbières de transition, correspond à l'habitat fournissant le moins de services d'approvisionnement, et est l'habitat fournissant les services culturels avec la meilleure qualité, montrant la part de « valeur d'existence » dans la volonté de protéger et restaurer ces habitats.

## 2. Interprétation des groupes de services écosystémiques fonctionnels et intérêt écologique à grande échelle

Les résultats ont montré que les travaux exerçaient une influence significative sur l'ensemble des services. Ces premiers ont également montré que les services pouvaient être regroupés selon différentes fonctionnalités et selon certains habitats. En reprenant le tableau bilan d'association des habitats avec les groupes de services, il est possible de mettre des noms sur ces groupes de services et d'habitats caractéristiques.

Le tableau bilan 16 résume l'ensemble des données évoquées dans cette partie.

| N° du groupe | SE du groupe                         | Type d'habitats associés préférentiellement au groupe             | Dénomination du groupe  |
|--------------|--------------------------------------|---|---|
| 1            | SR01, SR05, SR06, SC01, SC02 et SC03 | HIC ouverts, îlots végétalisés et roselières et grandes cariçaias | Importance de la préservation de la biodiversité, de la qualité de l'eau et des cycles hydrologiques par la connaissance, pour le savoir et le bien-être humain |
| 2            | SA04                                 | Habitats boisés naturels et plantés                               | Source de matériaux   |

|   |                                    |  |   |
|---|------------------------------------|--|---|
| 3 | SR02, SR03, SR04, SR07, SR08, SA02 | Ensemble des habitats naturels (HIC et non-HIC)              | Prévention des risques naturels et régulation des climats mondiaux et locaux et de la faune chassable |
| 4 | SA01, SA03                         | Habitats de prairies (HIC et non-HIC)                        | Source de nourriture d'origine animale élevée et végétale sauvage                                     |
| 5 | SA05, SA06                         | Habitats naturels ouverts HIC de prairie ou milieu aquatique | Alimentation de stocks d'eaux potables et non-potables  |

Tableau 16 : Bilan des regroupements des services écosystémiques et des habitats

Le seul cluster ne présentant pas de HIC est le cluster 2. Ceci signifie que de manière générale, après les travaux du LIFE, les sites du LIFE ne fourniront pas ce service de source de matériaux, ou alors avec une piètre qualité. En effet, la disparition des habitats boisés au profit d'habitat ouverts ou non-exploités expliquent cette perte de service. A l'inverse, l'ensemble des autres groupes de services seront fournis par les habitats du LIFE, et donc par les sites de manière générale.

Les services du cluster 1 vont être la première source de services des tourbières restaurées par le projet LIFE Anthropofens. En effet, au-delà des aspects très pratiques de certains services au fonctionnement de la société humaine : lutte contre les risques naturels, fourniture de nourriture, *etc.*..., les tourbières sont avant tout des espaces menacés de manière mondiale par de nombreux facteurs comme l'extraction de tourbe dans les régions boréales et subarctiques, le changement climatique, le drainage et fertilisation en terres agricoles ou encore l'urbanisation due à l'expansion urbaine. Si peu d'espèces sont strictement inféodées aux tourbières, ces milieux font partie du cycle de vie de nombre d'espèces à la fois végétales et animales (Cubizolle, 2019). Ce service de régulation du pool génétique de la biodiversité n'a pas que des consonances de régulation. En effet, il s'agit d'une limite planétaire (Rockström *et al.*, 2009), dépassée à la fois mondialement et nationalement. Le commissariat général au développement durable (CGDD) rappelle que pour un seuil fixé de 10 extinctions par an, le nombre d'espèces disparues pour 1 million d'espèces s'élève à 100 à 1000 espèces, soit 0,1 à 1% au lieu de 0,001% (Steffen *et al.*, 2015). Il convient de souligner que les tourbières accueilleraient 45% de mammifères menacés, vulnérables ou en danger, au même titre que 33% d'oiseau (Cubizolle, 2019). Le même cluster appuie sur l'importance de la qualité de l'eau douce et met alors en jeu une autre limite planétaire associant à la fois les cycles de l'eau et de l'azote. En effet, la pollution des milieux aquatiques par des engrais azotés ou des rejets d'eau usés, conduit à la perturbation des écosystèmes aquatiques et à plus long terme des écosystèmes de manière générale. Ces perturbations peuvent être à l'origine d'eutrophisation et de disparition d'espèces (autre limite planétaire) (LARRIER *et al.*, 2023). Ainsi, la capacité de filtration des tourbières s'avère lutter directement contre la limite planétaire, déjà dépassée mondialement, de perturbation des cycles biogéochimiques de l'azote. Enfin, le système hydrologique des tourbières participe également à la lutte contre le dépassement mondial et national d'une autre limite planétaire : utilisation et cycle de l'eau douce (LARRIER *et al.*, 2023). Enfin, ce cluster rassemble les trois services culturels portant sur la connaissance scientifique et scolaire sur ce type de milieux naturels, la volonté de conserver ce milieu à la fois pour les générations futures et à la fois pour le souhait de préserver ce milieu naturel exceptionnel. Finalement, ces trois services semblent interconnectés. La science et l'éducation offre la possibilité d'apprendre au plus grand nombre à connaître et à se passionner pour ce milieu naturel rare et riche. Il est compréhensible que les experts, en tant que naturalistes pour la plupart, aient attribués d'excellentes notes à ces services. Dans la notion de legs aux générations futures, il semble difficile de ne pas repenser aux limites planétaires dépassés contre lesquelles luttent les milieux de tourbières. Finalement, comprendre scientifiquement ces milieux est la première clé de lutte pour la stabilité de l'équilibre naturel terrestre de 3 des 9 piliers planétaires, motivant alors le souhait de préserver ces milieux pour les générations à venir et pour sa propre intégrité écologique.

Le cluster 3 sera fourni de manière assez moyenne par les tourbières restaurées après les travaux. La lutte contre les risques naturels reste un atout social et économique non négligeable. De même, les implications d'un milieu agissant comme stock de carbone s'ajoutent à la liste des services écosystémiques des tourbières participant à la lutte contre le dépassement des limites planétaires et notamment, celle du changement climatique. Les services de maintien du carbone dans les sols et de la participation à la régulation du climat mondial sont tout-à-fait liés et efficaces dans le cas des tourbières (Cubizolle, 2019). Le service de bioremédiation intervient, lui, dans le cadre de la limite planétaire de l'introduction d'entités nouvelles dans la biosphère (substances chimiques, métaux lourds...) (Larrier *et al.*, 2023). S'il ne lutte pas directement contre leur introduction, il permet la réduction de leur concentration en surface et dans les eaux (Price *et al.*, 2016). Ce cluster prend une dimension de lutte contre les catastrophes naturelles et contre le changement climatique, à petite comme à grande échelle.

Les autres clusters (2, 4 et 5) de services ne sont pas fournis de manière très qualitative par les habitats tourbeux HIC d'après travaux. Il est intéressant de voir que ceux-ci ne concernent que de services d'approvisionnement. Ainsi, les milieux tourbeux restaurés par le LIFE n'auront pas de gain économique direct à proprement parler mais engendreront le gain de valeur non-utilitaire telles que la philanthropie, « l'altruisme » envers la biodiversité offerte notamment par le cluster 1. Egalement, de véritables valeurs économiques d'usages indirects seront gagnées par cette restauration grâce à la lutte contre le changement climatique et la régulation du cycle hydrologique et de la qualité de l'eau (Pascual *et al.*, 2010).

Finalement, ces 5 clusters possèdent différentes cibles d'intérêt. En effet, les clusters 2, 3 et 4 intéressent l'humanité d'un point de vue assez concret : obtenir de la nourriture, de l'eau ou des matériaux. L'ensemble des Hommes est concerné par ces problématiques et, de la qualité de ces services découle une dimension économique. En effet, le service de fourniture de nourriture d'origine animale élevée génère intrinsèquement de l'économie, puisque la viande fournie génère un produit d'utilité première au consommateur et un revenu au producteur. La hausse du service fournissant de la nourriture d'origine animale sauvage va engendrer de la location de ponton de pêche, des rentrées d'argent pour les associations de pêche, de même pour les associations et le matériel de chasse. La fourniture de nourriture d'origine végétale sauvage entretient la fréquence de visite d'un milieu connu pour ses cueillettes. La production de matériaux, notamment le foin ou le bois d'énergie a un coût économique à la vente. Enfin la production de ressource en eau par son exploitation et son traitement génère des ressources économiques aux collectivités et les agences de l'eau, notamment. En fait, les clusters 2, 3 et 4 relatifs à tous ces services intéressent plutôt des acteurs comme les associations de loisirs et amateurs de chasse et pêche, les collectivités, les agences de l'eau, les éleveurs, etc...

Le cluster 1 avec les services culturels va générer un intérêt plus tourné vers la fréquentation des sites. Par exemple, un gestionnaire de site, cherchant à faire connaître son site, ou un office du tourisme, peut bénéficier de l'augmentation de ces services. Egalement, l'augmentation de ce genre de services peut servir à la vie associative naturaliste. Si les services liés à l'éducation augmentent, les demandes d'intervention scolaires auprès de ces associations suivront sans doute cette tendance et participeront aux actions citoyennes de l'éducation. Enfin, le secteur de la recherche représentant des investissements importants ainsi que nombre d'emplois, de tels milieux tourbeux en bon état de restauration peuvent être le fruit de recherches nationales et internationales.

Le cluster 5 quant à lui concerne plutôt la gestion et la limitation des risques naturels. De toute évidence, en augmentant la qualité de ces services, moins d'infrastructures préventives ont besoin d'être installées et de fait, les conséquences sociales et économiques néfastes de ces phénomènes peuvent être limités. Ici, les acteurs intéressés seraient *à fortiori* les citoyens et les communes. Des moyens de lutte contre les risques à plus grande échelle comme le changement climatique sont contenus dans l'augmentation de la qualité de ce groupe de SE. Ici, c'est l'entièreté de la planète qui est concernée par cette problématique et qui se doit de

trouver des solutions. Beaucoup d'acteurs sont concernés en plus des citoyens : les associations de protection de l'environnement, les élus politiques, le monde agricole, la recherche...

### 3. Interprétation à l'échelle d'un site

En observant les évolutions des services sur le site de Belloy-sur-Somme, la première conclusion est que la restauration sur ce site va apporter de bonnes augmentations de qualité des trois types de services. Ceci s'explique par plusieurs phénomènes. Pour les services d'approvisionnement, le site est pâturé, et ceci même avant les travaux, de même les huttes de chasses sont nombreuses mais étaient déjà présentes. Les experts estiment que l'habitat H5 est favorable à la pâture et a peu d'impact sur la chasse, par rapport aux autres habitats. Il faut souligner, au même titre qu'à l'échelle du site, les problématiques d'un engorgement prolongé pour le bétail (Berquer and Castelli, 2022), cette dualité semble avoir été prise en compte par l'évaluation des experts à l'échelle du site, au vu de la variance des échantillons associés. Par ailleurs, si le H5 n'est pas particulièrement connu pour la cueillette possible qu'il fournit, il est notamment possible de cueillir des champignons, alors que les roselières et mégaphorbiaie présentes avant restauration ne fournissent pas de végétaux comestibles. D'autre part, il y a un forage AEP à proximité avec un volume de prélèvement assez important 1km du site, la restauration d'une tourbière H5 favorise éventuellement un niveau plus constant des nappes et potentiellement une recharge de celles-ci, et il en va de même pour des forages non AEP. La moitié des services d'approvisionnement n'a pas montré d'évolution significative après la restauration. Il est possible que les 3 localités constituant le site Natura2000 soient très différentes sur les services SA02, SA05 et SA06, ou alors les experts ne parviennent pas à s'accorder et les panels de réponses sont trop différents, ou encore, les experts ne perçoivent pas de différences entre ces services avant et après la restauration. A la lumière de ce qui a été expliqué auparavant, les 3 services SA02, SA05 et SA06 ne connaissent pas d'impact particulièrement forts à la suite des travaux, à l'inverse des trois autres services SA01, SA03 et SA04. Tout cela justifie la légère augmentation observée.

Les services de régulation montrent une assez forte augmentation de fourniture. En effet, le peu d'habitat tourbeux avant travaux laisse penser que la tourbière n'était pas particulièrement en bon état. D'ailleurs le H5 a des capacités de fixation des pollutions et du sol assez faible, cela justifie la faible significativité observée sur les services SR02 et SR04. Cependant, la restauration de tourbière va jouer en faveur du stockage de carbone dans le sol et donc de lutte contre le changement climatique à plus grande échelle. Par ailleurs, le site de Belloy est connu pour une grande diversité de faune et de flore (données internes), ne serait-ce qu'au sein même du site Natura2000, il montre une grande diversité d'odonates, d'oiseaux, de coléoptères, de lépidoptères, de mammifères terrestres, de plantes vasculaires...Ainsi, la restauration d'un habitat aussi riche en faune et en flore que le H5 va implémenter encore plus cette diversité. D'ailleurs, l'amélioration globale de la tourbe va également avoir un rôle dans l'épuration des eaux, chargées en nitrate à certains endroits du site. L'ensemble de ces fonctionnalités explique la hausse des services SR01, SR03, SR05, SR06 et SR07. Pour le dernier service de régulation du climat local SR08, une diminution significative s'observe, en effet, la disparition des habitats boisés sur le site va sûrement diminuer la fourniture d'ombre et d'humidité.

Enfin concernant les services culturels, le simple fait de restaurer des HIC à forte connotation positive pour les experts ne peut engendrer qu'une évolution positive pour les trois services.

De manière globale, les résultats du projet sont tout-à-fait cohérents avec les résultats observés à l'échelle du projet à la différence près des mosaïques observables sur le site. Cela illustre bien le lien direct de la fourniture des services et les caractéristiques écologiques des habitats.



## 4. Enseignements de l'étude

### A. Validation des attendus du projet

De façon très simple, le premier enseignement de cette étude est que les travaux des sites du projet seront à l'origine d'une modification de la fourniture des services écosystémiques évalués. Si la plupart d'entre eux montrent une hausse de fourniture, quelques-uns, notamment concernant l'approvisionnement, connaissent une baisse de fourniture. En effet, dans le cadre du LIFE, les travaux visent à restaurer des milieux tourbeux principalement dans le but de retrouver des fonctions écologiques opérationnelles et de sauvegarder ces milieux à enjeux. Le gain de services reste une conséquence de la remise en fonctionnalité de tels systèmes. Ainsi, la hausse des services écosystémiques liés au cycle de l'eau et de l'azote des tourbières a été prouvée dans cette étude.

D'autre part, il a également été montré que les divers habitats du projet fournissent différemment les services écosystémiques et que cette qualité était directement conditionnée par les caractéristiques écologiques des habitats. De fait, la modification de la modification d'habitats fait donc évoluer la fourniture de services. L'hypothèse de conditionnement des services par les différents habitats est ainsi également validée.

### B. Utilité d'une étude sur les services écosystémiques

La plupart des sites naturels fournissent des services écosystémiques comme ceux présentés dans l'étude. Les services écosystémiques représentent un outil compréhensible par un grand nombre, étant donné qu'ils touchent directement le grand public (Bonn *et al.*, 2016). En effet, ces services font directement le lien entre les Hommes et la nature. Il semble donc tout-à-fait approprié de réaliser ce genre d'étude afin de justifier l'intérêt de préserver les milieux naturels auprès du grand public, des décideurs ainsi qu'au pouvoir public (Bonn *et al.*, 2016).

D'autre part, l'étude ici réalisée démontre scientifiquement d'une relation paraissant relativement intuitive, selon laquelle la fourniture de services écosystémiques résulte directement de la qualité des fonctions des écosystèmes. Dans le cadre des systèmes tourbeux, cette amélioration passe par la restauration des habitats tourbeux, action cible du LIFE Anthropofens. Ainsi, l'étude confirme scientifiquement cette affirmation.

Un autre avantage présenté par cette étude est la diversité thématique des résultats qui peuvent être tirés de ces résultats. En effet, chaque acteur y conserve les informations qui lui paraissent pertinentes. Une association de vulgarisation des sciences naturalistes, va par exemple, sûrement s'intéresser aux services culturels et de préservation du milieu et de la biodiversité, tandis qu'une commune pourrait peut-être avoir une entrée de lecture plus aisée sur la lutte contre les risques naturels. Il serait intéressant de pouvoir chiffrer ces potentiels gains économiques afin d'éventuellement les comparer aux moyens utilisés dans les travaux. Cela pourrait faire l'objet d'une étude complémentaire à la présente.

### C. Gestion intégrée des sites

Bien que les résultats de l'étude démontrent de la hausse des services après travaux, il semble nécessaire de positionner ces résultats dans un cadre de gestion des sites. Si cet outil peut permettre d'éclairer des acteurs/partenaires de projets sur l'importance du maintien et de l'entretien de certaines fonctionnalités écologiques des milieux et éventuellement peut permettre de mettre en place des priorités de gestion en fonction de l'enjeu des sites. Cependant, il semble peu aisé d'utiliser ces résultats comme base de réflexion dans le but de fixer des objectifs de gestion. Il s'agit simplement d'un outil support à la compréhension d'un écosystème, ou encore, comme c'est le cas ici, un outil assez simple d'évolution du milieu.

Il paraît cependant intéressant de se pencher sur la question, que ce soit pour de la communication sur le site ou pour simplement mieux comprendre le site en question. Si cette étude paraît complexe à instaurer, peut-être cela peut-il le sujet d'un stage de Master 1 ou de Master 2, en fonction de la proximité des structures avec des experts.

#### D. Reproductibilité de l'étude

L'étude sur les services écosystémiques à l'échelle du projet LIFE a demandé un an (compilation de deux stages de Master 2), temps que n'ont pas forcément les gestionnaires des sites pour ce genre d'étude. La question de la répétabilité d'une telle étude se pose alors. Le plus important du travail a été de rassembler assez d'experts, physiquement et virtuellement, sur les 13 sites dans un temps limité afin de remplir les objectifs. Dans le cadre d'une étude intégrée sur un seul site, une fois une quinzaine d'experts trouvés, une bonne partie du processus est achevée. En fixant un rendez-vous commun aux experts et en les accompagnant en même temps dans le remplissage des matrices, le travail devrait être nettement facilité. Il arrive que les évaluateurs n'aient pas confiance dans leur capacité à remplir les matrices, mais, les indices de confiance représentent des outils tout-à-fait performants dans la représentativité des résultats et permettent de trouver une justesse et un équilibre au sein des réponses.

Une fois le matériel récolté, il reste quelques étapes de traitement qui peuvent être réalisées relativement aisément sur divers logiciels. Les résultats attendus dans ce type d'étude peuvent uniquement se limiter au spider chart.

Ce type d'étude est donc reproductible et la partie la plus chronophage réside dans la mise en place de la méthode, qui à l'échelle d'un site peut s'alléger par rapport au présent retour d'expérience.

#### 5. Présentation et comparaison d'études similaires sur les SE

De multiples études visent à évaluer les services écosystémiques et peuvent être citées et comparées à la présente étude.

Par exemple, en 2016 une évaluation des services écosystémiques du Parc Naturel de la Scarpe-Escaut (PNRSE) a été réalisée. La méthodologie d'évaluation des SE, choisis du CICES était similaire à celle du présent rapport et se présentait également sous la forme d'une étude à dire d'experts. La seule différence notable est l'unité de végétation étudiée. Quand ici il s'agit de polygones de travaux, dans l'étude de 2016, les unités étaient les divers types d'occupation du sol (Campagne *et al.*, 2016). Les résultats se présentent sous la forme d'une figure bilan (fig. 39).

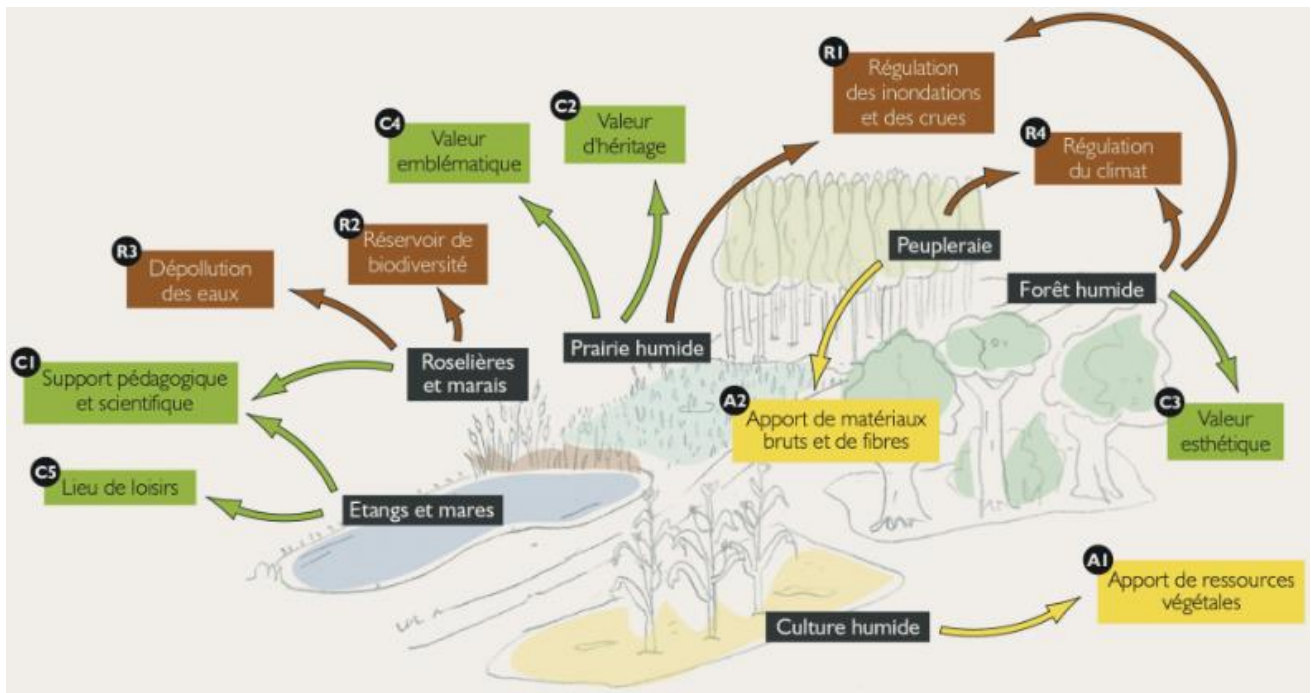


Figure 39 : SE potentiellement le plus rendus par les zones humides répandues dans la prairie de la Scarpe et la vallée de l'Escaut (Campagne et al., 2016)

Dans l'étude de 2016, 17 SE ont également été sélectionnés très similaires à ceux de la présente étude avec quelques légères différences. Les résultats des SE du PNRSE font tout-à-fait échos aux résultats obtenus dans le cadre du projet. En effet, il a été montré, en 2024, les importances des habitats boisés sur les services d'approvisionnement en matériaux et des habitats ouverts et anthropisés sur les l'apport de ressources végétales. D'autre part, le groupe correspondant aux phénomènes de régulations s'appliquent aux habitats naturels ouverts et fermés. Enfin les habitats de roselières et de marais sont efficaces dans la fourniture de services de dépollution et de réservoir de biodiversité, ce qui est également observé dans la présente étude. Enfin les services culturels sont assez fortement rendus par les divers habitats ouverts. L'ensemble de ces résultats marque une corrélation entre les résultats obtenus en 2016 et ceux de cette étude. Le spiderchart des résultats de restauration associé au PNRSE (en [annexe 4](#)) va dans le sens des résultats de 2016 et 2024, dans le cadre de la restauration des habitats nommés « Roselières et marais », ainsi que « Prairies humides ». De fortes hausses sont observables après travaux pour les services culturels et de régulation (résultats à prendre avec précaution, étant donnée le faible nombre d'experts ayant participé en 2024 pour le site).

L'étude la plus reconnue dans les Hauts-de-France concernant l'évaluation des SE reste celle réalisée par Roche et Campagne (2019) à la demande de la DREAL dans l'objectif de conceptualiser des outils permettant une meilleure prise en compte des services écosystèmes dans les évaluations environnementales. Ainsi, l'étude a pour objectif d'évaluer les services rendus sur l'ensemble du territoire des Hauts-de-France au travers de l'évaluation à dire d'experts. Les outils sont globalement similaires à la présente étude, seulement l'unité spatiale utilisée dans l'étude de la DREAL est l'occupation du sol. En s'intéressant aux résultats de l'occupation du sol désignée telle que « Bas marais, tourbières de transition et sources » (H7 dans le rapport associé), qui englobe les habitats étudiés dans la présente étude, les résultats de celle-ci semblent cohérents avec l'évaluation à l'échelle des Hauts-de-France. Par exemple, cette occupation du sol fournit assez bien à très bien les services de régulation tels que la qualité des eaux, le contrôle de l'érosion, ainsi que la régulation des inondations et des crues.

D'autres études peuvent être citées comme celle réalisée en Amazonie colombienne en 2015 par Ramirez-Gomez *et al.*, qui a également des dires d'experts (Ramirez-gomez *et al.*, 2015). L'étude a été motivée par les changements d'approvisionnement dans les provisions des indigènes les empêchant de maintenir certains modes de vies traditionnels. Les résultats de l'étude se sont avérés très probants envers les attendus initiaux. Les auteurs indiquent que les résultats cartographiques, très précis grâce aux connaissances des territoires des experts choisis, les indigènes ont pu visualiser les changements dans le temps. D'autre part, ces résultats ont été très utiles dans la compréhension de la problématique par les dirigeants locaux.

Enfin, une étude a été réalisée en 2018 pour quantifier et cartographier les services de régulation et les changements d'usages de sols dans une région péri-urbaine au Kenya (Wangai *et al.*, 2019). Les résultats ont montré que les occupations type forêts, prairies et zones humides fournissaient le plus de services de régulation au contraire des autres occupations. Les résultats montrent également une dégradation de la fourniture de ces services au cours du temps et que les facteurs de changements étaient principalement les activités humaines. Ces résultats présentés aux locaux et aux décisionnaires peuvent permettre d'engager un développement plus durable des services de régulation.

## 6. Limites de l'étude

Quelques limites peuvent être listées à la fin de cette étude, sur des points techniques relatifs à la méthode et au matériel utilisés, ainsi que relatifs au traitement de données. Plusieurs limites peuvent être pointées et soulèvent diverses interrogations quant à cette étude et plus généralement aux services écosystémiques. Ces réflexions sont le résultat de discussions internes, de retours des experts ayant participé à l'étude ainsi que d'échanges réalisés avec des gestionnaires et universitaires lors de la présentation des résultats de cette étude au colloque du Groupe d'Etude des Tourbières (GET), le 11/09/24 (Décultot *et al.*, 2024). Ces limites ne tentent pas de rendre l'étude moins légitime mais posent plutôt des pistes d'amélioration ou de réflexions pour d'autres études utilisant une méthode similaire.

### A. Limites associées à la conception de la méthode

La première limite concernant la méthode, réside dans le choix des SE évalués. Dans l'objectif de faire un retour complet sur l'évolution des services après des restaurations, il faudrait évaluer bien plus de services qu'uniquement ceux liés aux cycles de l'eau et de l'azote. Réduire l'étude à un panel de services permet en effet d'alléger le remplissage des matrices par les experts, mais cible uniquement les services liés aux fonctions des tourbières qui visent à être améliorées par le projet. Cependant, certains de ces SE sont au cœur de problématiques liées au changement climatique comme un service de régulation lié à la protection du milieu contre le vent (Haines-Young and Potschin, 2013). Etant donné qu'il est attendu que la fréquence des tempêtes augmente, il serait pertinent d'évaluer ce service, afin de réellement projeter les résultats dans plusieurs années. En effet, puisque les résultats de la restauration ne seront établis que dans quelques années, d'ici là les attentes humaines par rapport à ces services seront sûrement plus grandes. Ajouter ce type de service à évaluer ne dévalorise pas pour autant les résultats et gains de services observés dans cette étude, il s'agirait simplement d'en faire une étude plus intégrée et donc valable sur de plus longues perspectives.

La seconde remarque porte sur l'échelle de l'évaluation. Si pour des questions de praticité et méthodologiques l'échelle de l'habitat a été sélectionnée, afin de réaliser une étude environnementale plus complète, d'autres échelles auraient pu être plus adaptées. Par exemple, l'échelle moins spécifique des polygones de travaux semble être une bonne solution. Cette échelle pourrait s'évaluer en accompagnant cette donnée géographique par des informations spécifiques aux polygones, comme les travaux réalisés, les habitats présents et objectifs, la qualité de la tourbe dans ces polygones, du fonctionnement hydrologique à plus petite

échelle. Concernant cette étude, cela aurait nécessité plus de données que celles disponibles, et alors un temps de prospection nécessaire. Puis, la partie la plus difficile étant de rassembler des experts avec du temps à consacrer à cette étude, une étude environnementale plus intégrée et complète, serait plus fastidieuse et chronophage. Ceci participerait sûrement à diminuer le nombre de participants à une étude de ce type.

Une solution qui pourrait être trouvée serait de flécher des financements pour ce genre d'actions pour indemniser les experts. Ici, les experts se sont mobilisés sur leur temps de travail personnel, voire temps personnel, ce n'était donc probablement pas suffisant et mobilisant.

### B. Limites associées à l'évaluation par les experts

Une limite qui apparaît à la lecture des résultats, et notamment des boxplots, réside dans la variance, parfois très importante, des échantillons (cas de 50% des notes entre 3 et 6 notes différentes sur les 6 possibles). Par exemple, à l'échelle du projet, ce sont les SA qui présentent ce cas, plus particulièrement les SA01 (source de nourriture pour l'Homme), SA04 (source de matériaux pour l'Homme), SA05 et SA06 (alimentation de stocks d'eau). Les services de régulation présentent aussi partiellement cette caractéristique sur les SR03 (formation du sol) et SR04 (bioremédiation). Plusieurs situations, non incompatibles, peuvent expliquer ces fortes variances de notation intra-échantillons. D'abord, les deux SR en question, ont souvent été source de questionnement quant à la définition et la compréhension de ces services. Ainsi, ce phénomène peut simplement être le résultat de défauts dans la présentation du matériel d'évaluation aux experts, menant à des compréhensions très diverses des attendus de l'évaluation de ces services. Une autre explication peut simplement se présenter comme la variance inter-sites. Il faudrait vérifier les résultats de ces services à l'échelle de tous les sites, afin de s'assurer de la pertinence de cette hypothèse. Dans la même direction, un expert n'évaluant qu'un seul site ne va sûrement pas avoir les mêmes références que d'autres évaluant plusieurs sites. Peut-être ces variances sont ainsi le résultat d'un manque de point de comparaison entre sites. Enfin, ces variances pourraient être l'expression d'importants désaccords entre les experts sur la qualité du service. Auquel cas, il est très intéressant de lister les services qui suscitent dissension au sein du panel et d'aller chercher les origines de ces notations différenciées auprès des experts. Cela pourrait permettre d'intégrer et de tirer des enseignements de l'expertise du panel et d'en tirer des enseignements pour la gestion ou la direction des travaux. En s'intéressant aux mêmes résultats à l'échelle d'un site, les services d'approvisionnement présentent tous d'importantes variances, au même titre que les services SR01 (régulation du cycle hydrologique), SR02 (atténuation des flux de masses) et SR03. L'interprétation qui peut être tirée de cette information est que les services d'approvisionnement ont été assez difficiles à apprécier dans le contexte du projet, surtout dans le contexte d'un seul site ou les experts n'ont pas forcément de point de comparaison sur d'autres sites avec différentes problématiques. Plus particulièrement, les SA05 et SA06 présentant à la fois des fortes variances à l'échelle du site et du projet, sont peut-être difficile à évaluer sans littérature spécifique sur le fonctionnement hydrologique complexe des tourbières, qui ne faisait malheureusement pas partie du matériel fourni aux experts. Ceci impacte aussi probablement les réponses du SR01 à l'échelle du site. La définition SR03 présentait des manques d'adaptation au contexte des tourbières et donc des incohérences, menant très probablement à sa variance. La proximité des SR04 et SR06 (respectivement bioremédiation et bon état chimique des eaux) ont été source de confusions d'après certains experts et se rattache donc à des défauts de matériel fourni aux experts.

La majorité des discussions avec les différents experts à propos de l'étude portaient sur l'aspect participatif de l'étude. En effet, l'étude à dire d'experts semble au premier abord subjective, et certains des experts contactés n'ont pas souhaité prendre part à l'étude pour cette raison. Il faut garder en mémoire que cette méthode participative est proposée par les auteurs de la méthode de la MAES eux-mêmes. D'autre part, pour évaluer une notion aussi anthropocentrée que celle des services écosystémiques, cette méthode semble assez



appropriée. Cependant, les inquiétudes des experts sur la méthode sont tout-à-fait légitimes. Pour que l'étude soit fiable, il faut un panel d'experts large et varié. En effet, ne faire appel qu'à un seul corps de profession et d'expertise, donne déjà une direction à l'étude environnementale qui découlera de l'étude. La situation idéale serait d'avoir un panel constitué de professions multiples comme des élus locaux, des agriculteurs, des gestionnaires, des universitaires, etc... tout en respectant la définition stricte des experts, c'est-à-dire un évaluateur qui a des connaissances sur les tourbières et surtout qui connaît les sites. La première partie du stage a consisté à collecter le plus de profils d'experts possibles, lors des différentes phases de contacts, beaucoup des experts contactés n'ont pu participer pour des questions de calendrier en grande partie. Le reste des refus de participation s'est en partie dû au sentiment de distance par rapport au projet LIFE Anthropofens ou par rapport à la méthode utilisée. De fait, les experts sont en grande partie uniquement des gestionnaires (et notamment du CEN) et des universitaires (fig. 40). Les expertises sont cependant assez variées, mais sont clairement orientées naturalistes (fig. 41).

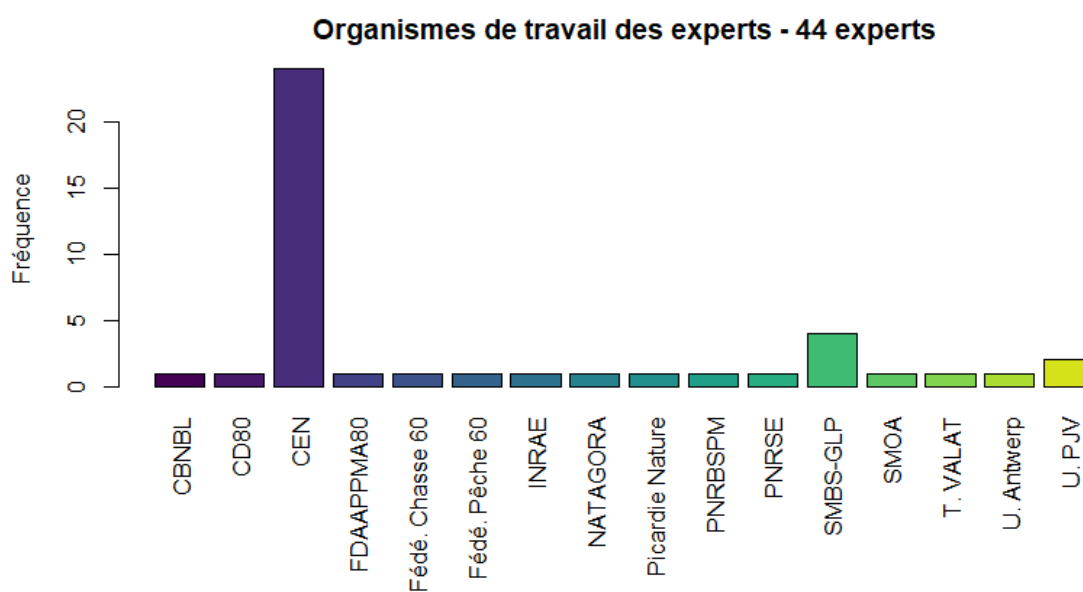


Figure 40 : Fréquence des organismes de travail du panel d'expert



Figure 41 : Fréquence des spécialités d'expertise du panel d'expert

Evidemment si la participation de ces experts est essentielle et tout-à-fait pertinente, il aurait été préférable cependant de compléter ce panel par plus de métiers divers. Ici, beaucoup des participants font partie des partenaires du projet LIFE Anthropofens, il est ainsi possible qu'un certain biais soit induit par ce panel d'experts quant aux attentes du projet.

D'ailleurs, afin d'essayer de déterminer l'objectivité des notes données par les experts, un test a été conduit. Une analyse d'un modèle linéaire simple exprimant le lien entre les notes et les indices de confiance attribués par les experts a été réalisé (fig. 42).

### Notes en fonction des IC\_SE pour SR08

Tous les sites du LIFE Anthropofens

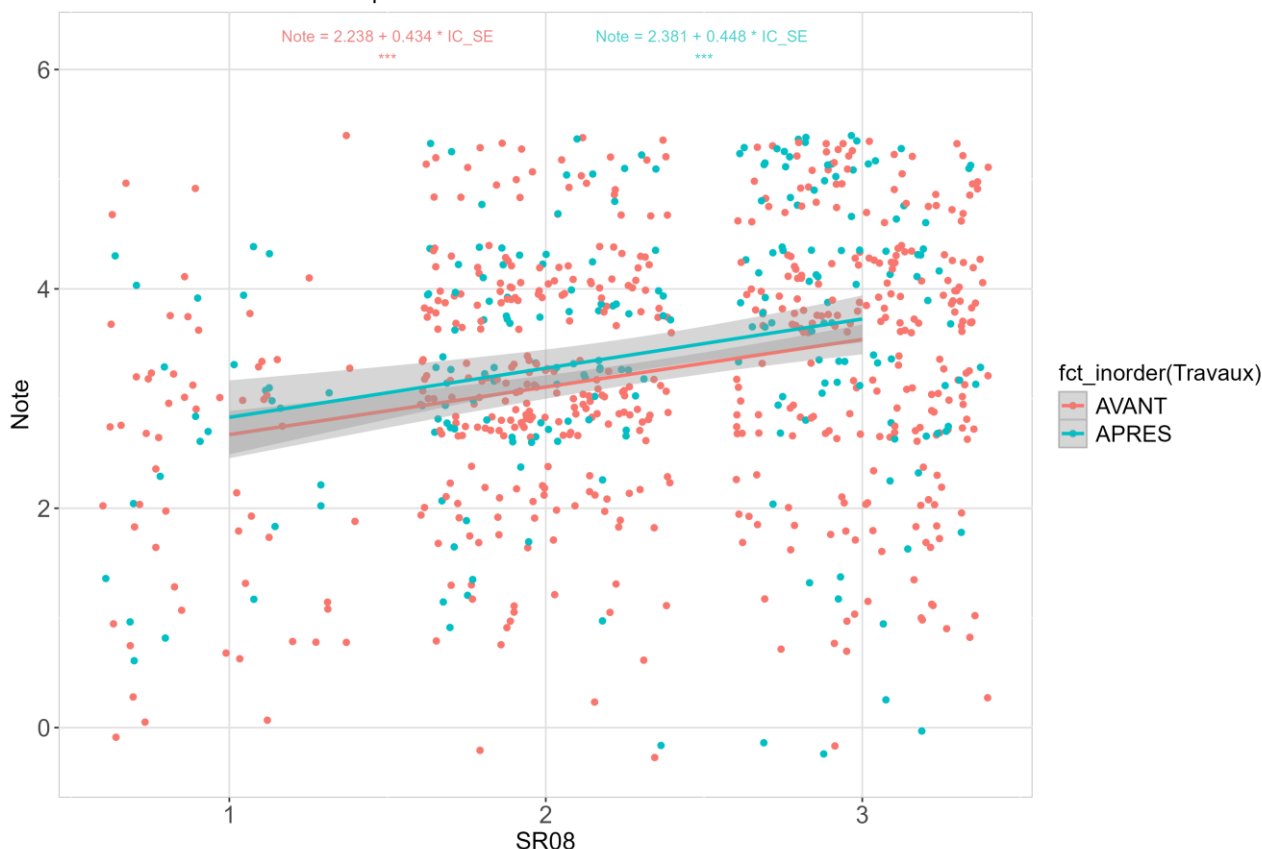


Figure 42 : Régression linéaire entre les notes du SR08

Avec cette figure, il apparaît que pour certains services, il y a un lien significatif, par exemple pour SR08, entre les indices de confiance et les notations. Cela peut pouvoir signifier deux choses : soit les experts se considèrent confiants dans leur réponse (3/3) parce qu'ils attribuent la note maximale, soit les experts peu confiants (1/3) ont tendance à mettre une note moyenne. Cette première explication pourrait être perçue comme une sorte « d'enthousiasme » de notation par l'expert : l'expert est plus assuré de sa réponse dès lors qu'il affirme une note extrême (note de 5 ou 0 par exemple). Deuxième explication, les personnes plus sûres de leur réponse, préfèrent noter avec des notes moyennes, auquel cas, il s'agirait plutôt d'un « effet de prudence ». Il semble avec le SR08 que les experts estimant leur IC à 2, se positionnent plus sur des notes entre 3 et 4 pour avant et après les travaux. Pour les experts sûrs de leur réponse (IC à 3/3), ils se positionnent plutôt entre 4 et 5 pour les deux états de travaux. Ce phénomène, est présent chez d'autres services et particulièrement ceux de régulation, sauf le SR07, exempt de cette analyse. Pour les services d'approvisionnement, cette tendance est également observable pour les SA03 et SA05 et SA06. De manière assez inattendue, les services culturels, qui semblent à première vue les plus difficiles à apprécier de manière

scientifique, ne sont quasiment pas soumis à cette tendance. Ainsi, les notes associées au reste des services d’approvisionnement, et les services culturels ne dépendent pas significativement des indices de confiance et annoncent une certaine objectivité, au moins vérifiée par ce test. Il est intéressant de noter que les services les plus sensibles à cette observation sont ceux de régulation, découlant directement des fonctionnalités écologiques des tourbières qui sont visées de restauration par le projet. Peut-être cet « enthousiasme » de notation est lié aux forts attendus du projet sur de ces services régulations. Ce biais est inhérent au panel et une fois intégré et compris reste assez faible et marginal au vu des coefficients

Il semble également intéressant de regarder combien de temps les experts ont passé à remplir les matrices, ainsi que leur lien avec les sites (fig. 43 et 44).

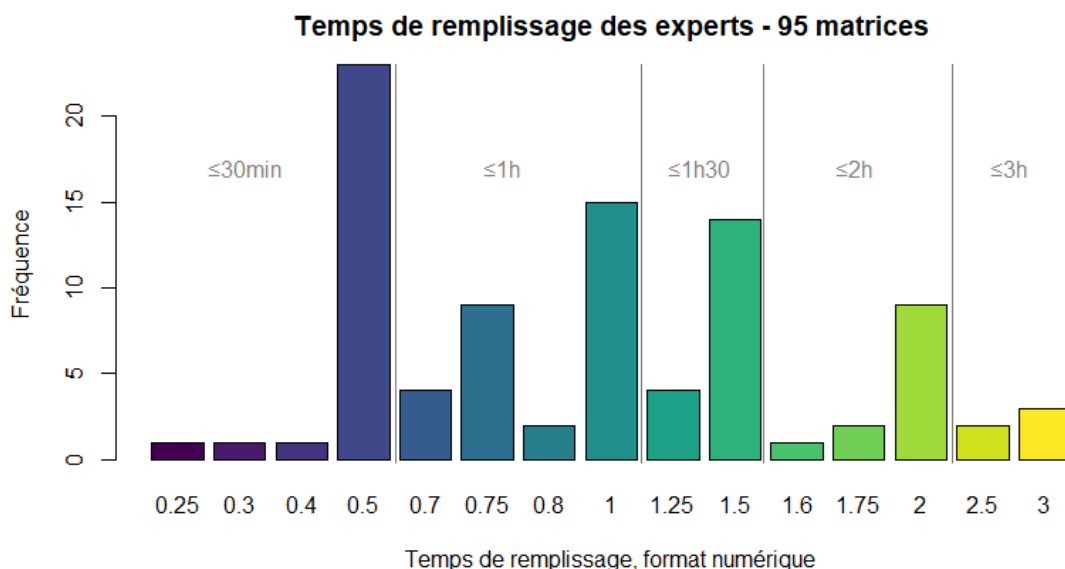


Figure 43 : Fréquence du temps de remplissage des matrices par les experts

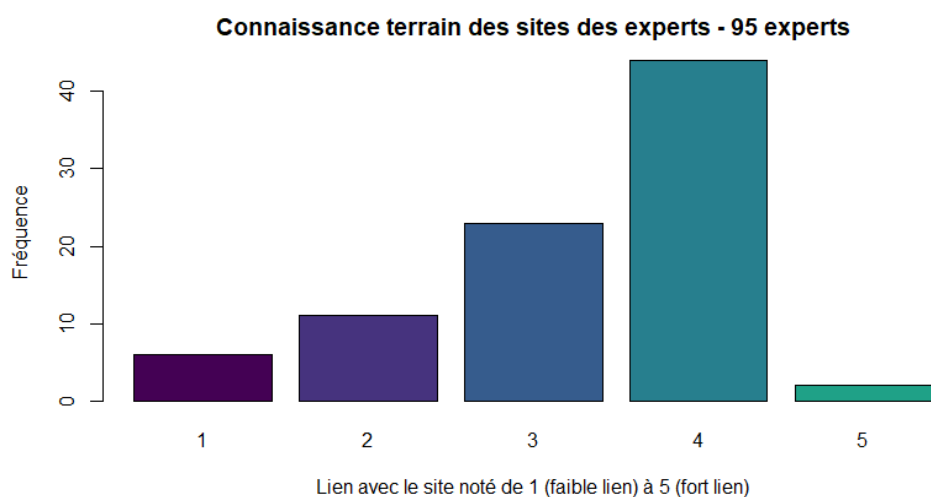


Figure 44 : Fréquence du lien des experts avec les sites (niveaux : 1 = très peu de visites réalisées, 2 = quelques visites, 3 = visites régulières, 4 = visites très fréquentes et 5 = visites quasi-quotidiennes)

Il semblerait que les experts aient passé (sauf trois exceptions) au minimum 30 minutes et au maximum 3h à remplir les matrices. Ce qui au vu de la taille des matrices paraît tout-à-fait raisonnable, il faudrait compléter

en regardant la fréquence des indices de confiance en fonction du temps de remplissage mais cela paraît tout-à-fait correct. Cela confirme que l'ensemble des experts a pris le temps d'examiner les documents et s'assurent de la pertinence des notes qu'ils attribuent. De même, les experts sont à 80% familier assez familier à très familier avec les sites, ce qui justifie clairement de leur expertise.

Ainsi, le panel d'experts de cette étude répond tout-à-fait aux demandes de l'étude, et bien qu'un lien inhérent et pas forcément dissociable de l'avis d'expert apparaisse entre les indices de confiance et les notations, le panel semble très pertinent et efficace. Ainsi, cette étude manque malheureusement de diversité de métiers et d'expertises au-delà du champ naturaliste à proprement parler. Il faut tout de même préciser que les auteurs Campagne *et al.* (2017) et Campagne and Roche (2018) précisent le nombre objectif de 15 experts pour s'assurer de la pertinence des résultats.

### C. Limites associées à la temporalité des travaux

Sur la plupart des sites, les travaux ne sont pas encore réalisés, ou sont en cours. Evaluer des services écosystémiques sur une situation après travaux à laquelle les experts n'ont pas encore pu être confrontés, rend cette partie de l'évaluation complètement théorique. D'autre part, une fois les travaux réalisés, il n'est pas certain que les habitats se mettront en place sur le long terme. L'objectif souhaité ne reste pas garanti. Beaucoup de paramètres environnementaux entrent en jeu et grâce aux travaux les habitats d'intérêt communautaires possèdent en effet de grandes chances de s'établir sur les sites, mais rien ne garantit leur présence effective dans 10 ou 20 ans. Il serait alors intéressant de reconduire une étude sur les services écosystémiques, une fois les habitats établis et les sites stabilisés après travaux.

## Conclusion

Cette étude répond au besoin de quantification des impacts des travaux de restauration des systèmes tourbeux du projet LIFE Anthropofens sur les services écosystémiques des treize sites Natura2000 concernés dans les Hauts-de-France et de Wallonie. La méthodologie utilisée par ce rapport a été mise en place en 2023 par J. Capoulade et fait appel à la sélection de 17 services écosystémiques liés aux cycles de l'eau et de l'azote, déterminants dans la structure des tourbières, depuis les 3 grandes sections de SE de la classification CICES : approvisionnement, régulation et culturels. Puis, la méthode se fonde sur les notions de la MAES et de l'approche des matrices remplies par un panel d'experts.

Les données obtenues sur les services écosystémiques ont été comparées entre les deux états : avant et après de la restauration. Cela a mené à l'observation d'une hausse systématique des services de régulation et culturels après travaux sur l'ensemble du projet. Les services d'approvisionnement sont plus disparates dans leur évolution. La plupart montrent une hausse, mais les services concernant la fourniture de nourriture d'origine animale sauvage et la fourniture de biomasse comme matériau déclinent après la restauration.

Par la suite, la réalisation d'une ACP et d'un clustering par les K-means, combinée à un modèle linéaire généralisé calculant les qualités des services en fonction des habitats, montre : (i) le conditionnement de fourniture des SE notamment par la caractéristique naturelle ou anthropisée de l'habitat et sa physionomie (ouvert ou boisé) et (ii) des groupes fonctionnels de SE peuvent être distingués et sont plus ou moins fournis par des typologies d'habitats.

Ensuite, un dernier modèle linéaire a pu définir l'importance des variables « Site » et « Travaux » sur la qualité des services écosystémiques. L'étude plus approfondie à l'échelle d'un site du projet (la basse vallée de la Somme de Pont-Rémy à Breilly (FR2200355)) vérifie l'ensemble des hypothèses et attendus de l'étude. En effet, à cette échelle, une hausse globale des SR et SC est clairement identifiable, tandis que les SA ne montrent pas d'évaluation ou ne tendent pas particulièrement à accorder les experts. L'étude globale a été comparée à d'autres, avec diverses échelles géographiques, et les résultats de la présente étude semblent tout-à-fait cohérents avec ceux-ci.

D'autre part, bien que les résultats de hausse ou de baisse des SE répondent à la problématique d'impacts de la restauration du projet LIFE Anthropofens, ce genre d'étude a d'autres portées. Par exemple, les résultats font échos aux notions de limites planétaires, d'économie environnementales et sont principalement un atout de vulgarisation et de sensibilisation à la préservation et les conservations des sites naturels.

Des limites sont identifiables majoritairement à l'échelle de la méthodologie de l'étude et de la conception d'une étude à dire d'experts. Un biais inhérent aux qualifications socio-professionnelles des experts se présente avec notamment la quasi-exclusivité des professions étant : gestionnaires ou universitaires en lien avec le projet. Cependant, bien qu'il aurait été préférable d'avoir un plus vaste panel d'experts avec des horizons professionnels plus divers, les experts ont répondu aux attentes de remplissage des matrices et présentent des résultats tout-à-fait pertinents et cohérents. Cette étude sert donc également de retour d'expériences et peut permettre de guider les gestionnaires ou les structures souhaitant évaluer les services écosystémiques de sites pour les diverses raisons évoquées plus tôt. Certaines questions et pistes pourraient sembler pertinentes à approfondir, en fonction des problématiques d'étude. Par exemple, évaluer la quantification des gains économiques issus de la hausse des services écosystémiques et les comparer aux moyens investis dans des travaux de restauration semblerait pertinent. Enfin, cette étude met en lumière l'outil d'évaluation des services écosystémiques. Grâce à de telles études, il est notamment possible d'identifier la participation des habitats et milieux au changement climatique. Afin d'anticiper des stratégies de management de l'espace dans le but de lutter contre ces changements et risques associés. Analyser les services écosystémiques d'un site permet d'avoir un premier aperçu de ses capacités de résilience.



## Bibliographie

- Baize, D., sol, A. française pour l'étude du, & Girard, M.-C. (2009). *Référentiel pédologique 2008*. Editions Quae.
- Bakshe, P., & Jugade, R. (2023). Phytostabilization and rhizofiltration of toxic heavy metals by heavy metal accumulator plants for sustainable management of contaminated industrial sites: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100293. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100293>
- Bartoń, K. (2010). *MuMIn : Multi-Model Inference* (p. 1.47.5). <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.MuMIn>
- Benslimane, M., Mostephaoui, T., Hamimed, A., & Cherif, Z. T. (2013). *PERFORMANCES EPURATOIRES ET INTERET DU PROCEDE DE PHYTOTRAITEMENT DES EAUX USEES PAR DES VEGETAUX MACROPHYTES*.
- Bernard, P.-R. (2016). *Panorama des services écosystémiques des tourbières en France. Quels enjeux pour la préservation et la restauration de ces milieux naturels ?* <https://side.developpement-durable.gouv.fr/BRET/doc/SYRACUSE/384256/panorama-des-services-ecosystemiques-des-tourbieres-en-france-quels-enjeux-pour-la-preservation-et-l>
- Bonn, A., Allott, T., Evans, M., Joosten, H., Stoneman, R., (2016) in: Bonn, A., Allott, T., Evans, M., Joosten, H., & Stoneman, R. (2016). *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice*. Cambridge University Press. Chapter One: Peatland restoration and ecosystem services: an introduction
- Dommain, R., Dittrich, I., Giesen, W., Joosten, H., Rais, D. S., Silvius, M., Wibisono, I. T. C. (2016) in: Bonn, A., Allott, T., Evans, M., Joosten, H., & Stoneman, R. (2016). *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice*. Cambridge University Press. Chapter Fourteen: Ecosystem services, degradation and restoration of peat swamps in the South East Asian tropics.
- Décultot, C., Berquer, A., Capoulade, J. (2024, septembre 11). *Évaluation de la contribution du LIFE Anthropofens aux services écosystémiques liés aux cycles de l'eau et de l'azote*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26635.71204>
- Berquer, A., & Castelli, M. (2022). *Rapport d'état initial des impacts du pâturage en tourbière*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34070.42565>
- Burkhard, B., & Maes, J. (2017). *Mapping Ecosystem Services*.
- Burkhard, B., Santos-Martin, F., Nedkov, S., & Maes, J. (2018). An operational framework for integrated Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services (MAES). *One Ecosystem*, 3, e22831. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e22831>
- Campagne, C. S., Roche, P. (2021). Guide pour la prise en compte des services écosystémiques dans les évaluations des incidences sur l'environnement. Inrae; DREAL.. fihal-04040331f
- Campagne, C. S., Roche, P., Gosselin, F., Tschanz, L., & Taton, T. (2017). Expert-based ecosystem services capacity matrices: Dealing with scoring variability. *Ecological Indicators*, 79, 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.043>
- Campagne, C. S., & Roche, P. K. (2018). May the matrix be with you! Guidelines for the application of expert-based matrix approach for ecosystem services assessment and mapping. *One Ecosystem*, 3, e24134. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e24134>
- Campagne, C. S., Tschanz, L. & Taton, T. (2016). Outil d'évaluation et de concertation sur les services écosystémiques: La matrice des capacités. *Sciences Eaux & Territoires, Articles hors-série 2016*, 1-6. <https://doi.org/10.14758/SET-REVUE.2016.HS.01>
- Capoulade, J., Berquer, A., (2023). Disponible sur: [rapport-justine-capoulade.pdf](https://rapport-justine-capoulade.pdf) (life-anthropofens.fr)
- Chen, J., Saunders, S. C., Crow, T. R., Naiman, R. J., Broszofski, K. D., Mroz, G. D., Brookshire, B. L., & Franklin, J. F. (1999). *MicroclimatFeorest Ecosystem and LandscapeEcology*.
- Chiarello, A. G. (1999). Effects of fragmentation of the Atlantic forest on mammal communities in south-eastern Brazil. *Biological Conservation*, 89(1), 71-82. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(98\)00130-X](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(98)00130-X)

Copena, D., Pérez-Neira, D., Macías Vázquez, A., & Simón, X. (2022). Community forest and mushrooms : Collective action initiatives in rural areas of Galicia. *Forest Policy and Economics*, 135, 102660. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102660>

Cubizolle, H. (2019). *Les tourbières et la tourbe : Géographie, hydro-écologie, usages et gestion conservatoire*. Lavoisier-Tec & Doc.

Duranel, A. (2016). *Hydrologie et modélisation hydrologique des tourbières acides du Massif Central (France)* [Phdthesis, Université de Lyon]. <https://theses.hal.science/tel-01560566>

Evans, M. G., Burt, T. P., Holden, J., & Adamson, J. K. (1999). Runoff generation and water table fluctuations in blanket peat: Evidence from UK data spanning the dry summer of 1995. *Journal of Hydrology*, 221(3), 141-160. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00085-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00085-2)

Husson, F., Josse, J., Le, S., Mazet, J. (2006). *FactoMineR : Multivariate Exploratory Data Analysis and Data Mining* (p. 2.11). <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.FactoMineR>

François, R. (2021). *Les 15 000 hectares de tourbières alcalines des vallées de Somme et d'Avre (Picardie) Première partie : Milieu physique et géohistoire*. Bull. Société Linnéenne Nord-Picardie 2021, vol. 39

François, R., Hauguel, J.-C., & Duhamel, F. (2012). *Guide des végétations des zones humides de Picardie*. Centre régional de phytosociologie agréé Conservatoire botanique national de Bailleul.

Garcia, C., Antoine, P., Ducrocq, T., Bacon, J., Beaumont, L., Coutard, S., Dabkowski, J., & Brasseur, B. (2024). Mise en place des tourbières alcalines et modifications de la dynamique fluviatile dans la moyenne vallée de la Somme (France) à l'Holocène. *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*. <https://journals.openedition.org/quaternaire/19535>

Gaudillat, V., Bardat, J., & Documentation Française (Éds.). (2002). *Habitats humides : La documentation française*. La Documentation française.

Gearey, B., Fyfe, R., (2016) in: Bonn, A., Allott, T., Evans, M., Joosten, H., & Stoneman, R. (2016). *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice*. Cambridge University Press. Chapter Six: Peatlands as knowledge archives.

Gobat, J.-M., Aragno, M., & Matthey, W. (2010). *Le sol vivant : Bases de pédologie, biologie des sols*. EPFL Press.

Guide LIFE : Assessing ecosystems and their services in LIFE projects A guide for beneficiaries. Disponible sur : [18540ac0-45f6-4087-84c0-8b8babfd581d en \(europa.eu\)](https://18540ac0-45f6-4087-84c0-8b8babfd581d.europa.eu)

Gómez-Baggethun, E., de Groot, R., Lomas, P. L., & Montes, C. (2010). The history of ecosystem services in economic theory and practice : From early notions to markets and payment schemes. *Ecological Economics*, 69(6), 1209-1218. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.007>

Grayson, R., Holden, J., & Rose, R. (2010). Long-term change in storm hydrographs in response to peatland vegetation change. *Journal of Hydrology*, 389(3), 336-343. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.012>

Haines-Young, R. and Potschin, M. (2013): Common International Classification of Ecosystem Services (CICES): Consultation on Version 4, August-December 2012. EEA Framework Contract No EEA/IEA/09/003 (Download at [www.cices.eu](http://www.cices.eu) or [www.nottingham.ac.uk/cem](http://www.nottingham.ac.uk/cem))

Jonsson, B., Kruys, N., & Ranius, T. (2005). Ecology of species living on dead wood – lessons for dead wood management. *Silva Fennica*, 39(2). <https://doi.org/10.14214/sf.390>

Joosten, H., (2016) in: Bonn, A., Allott, T., Evans, M., Joosten, H., & Stoneman, R. (2016). *Peatland Restoration and Ecosystem Services : Science, Policy and Practice*. Cambridge University Press. Chapter Two: Peatland across the Globe

Joosten, H., Sirin, A., Couwenberg, J., Laine, J., Smith, P., (2016), in: Bonn, A., Allott, T., Evans, M., Joosten, H., & Stoneman, R. (2016). *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice*. Cambridge University Press. Chapter Four: The role of peatlands in climate regulation

Joosten, H. & Couwenberg. (2009). *Are emission reductions from peatlands MRV-able?* <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20093336595>

Joosten, H., & Clarke, D. (avec International Mire Conservation Group & International Peat Society). (2002). *Wise use of mires and peatlands: Background and principles including a framework for decision-making*. Internat. Mire Conservation Group [u.a.].

Kalu, C. M., Ogola, H. J. O., Selvarajan, R., Tekere, M., & Ntushelo, K. (2021). Fungal and metabolome diversity of the rhizosphere and endosphere of *Phragmites australis* in an AMD-polluted environment. *Heliyon*, 7(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06399>

Larrier et al. (2023). *La France face aux neuf limites planétaires*. Disponible sur : [La France face aux neuf limites planétaires \(ecologie.gouv.fr\)](https://www.ecologie.gouv.fr)

Maes, J., Liqueste, C., Teller, A., Erhard, M., Paracchini, M. L., Barredo, J. I., Grizzetti, B., Cardoso, A., Somma, F., Petersen, J.-E., Meiner, A., Gelabert, E. R., Zal, N., Kristensen, P., Bastrup-Birk, A., Biala, K., Piroddi, C., Egoh, B., Degeorges, P., ... Laval, C. (2016). An indicator framework for assessing ecosystem services in support of the EU Biodiversity Strategy to 2020. *Ecosystem Services*, 17, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.10.023>

Potschin, M., Haines-Young, R. (2011). *Ecosystem services: Exploring a geographical perspective—* Marion B. Potschin, Roy H. Haines-Young, 2011. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0309133311423172>

McCarter, C. P. R., Rezanezhad, F., Quinton, W. L., Gharedaghloo, B., Lennartz, B., Price, J., Connon, R., & Van Cappellen, P. (2020). Pore-scale controls on hydrological and geochemical processes in peat: Implications on interacting processes. *Earth-Science Reviews*, 207, 103227. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103227>

MEA : Millennium Ecosystem Assessment (Program) (Éd.). (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press. Disponible sur : [F-356Txt\(wri\).indd \(millenniumassessment.org\)](https://www.millenniumassessment.org/)

Moreau, P.-A. (2002). *Analyse écologique et patrimoniale des champignons supérieurs dans les tourbières des Alpes du Nord* [Thèse doctorat]. Université Savoie Mont Blanc.

Page, et al. (2002). *The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997* / *Nature*. <https://www.nature.com/articles/nature01131>

Pascual, U., Muradian, R., Rodríguez, L. C., & Duraïappah, A. (2010). Exploring the links between equity and efficiency in payments for environmental services : A conceptual approach. *Ecological Economics*, 69(6), 1237-1244. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.004>

Payette, S., & Rochefort, L. (2001). *Écologie des tourbières du Québec-Labrador*. Presses Université Laval.

Price, J., Evans, C., Evans, M., Allott, T., Shuttleworth, E., (2016) in: Bonn, A., Allott, T., Evans, M., Joosten, H., & Stoneman, R. (2016). *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice*. Cambridge University Press. Chapter Five: Peatland restoration and hydrology

Ramirez-Gomez, S. O. I., Torres-Vitolas, C. A., Schreckenber, K., Honzák, M., Cruz-Garcia, G. S., Willcock, S., Palacios, E., Pérez-Miñana, E., Verweij, P. A., & Poppy, G. M. (2015). Analysis of ecosystem services provision in the Colombian Amazon using participatory research and mapping techniques. *Ecosystem Services*, 13, 93-107. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.12.009>

Rey, F., Ballais, J.-L., Marre, A., & Rovéra, G. (2004). Rôle de la végétation dans la protection contre l'érosion hydrique de surface. *Comptes Rendus. Géoscience*, 336(11), 991-998. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.03.012>

Roche, P. K., & Campagne, C. S. (2019). Are expert-based ecosystem services scores related to biophysical quantitative estimates? *Ecological Indicators*, 106, 105421. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.05.052>

Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. (2009). Planetary Boundaries : Exploring the Safe Operating Space for Humanity. *Ecology and Society*, 14(2). <https://www.jstor.org/stable/26268316>

Rydin, H., Jeglum, J. K., & Bennett, K. D. (2013). *The Biology of Peatlands*, 2e. OUP Oxford.

Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S., Fetzer, I., Bennett, E., Biggs, R., Carpenter, S., Vries, W., de Wit, C., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Persson, L., Ramanathan, V., Reyers, B., & Sörlin, S. (2015). « Planetary Boundaries : Guiding Human Development on a Changing Planet ». *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>

UKNEA: UK National Ecosystem Assessment (2011). Disponible : <http://uknea.unep-wcmc.org/Resources/tabid/82/Default.aspx>

Van der Wall, R., Aletta Bonn, Don Monteith, Mark Reed, Kirsty Blackstock, Nick Hanley, Des Thompson, Martin Evans and Isabel Alonso in: UKNEA: UK National Ecosystem Assessment (2011). Chapter Five: Mountains, Moorlands and Heaths

Wangai, P. W., Burkhard, B., & Müller, F. (2019). Quantifying and mapping land use changes and regulating ecosystem service potentials in a data-scarce peri-urban region in Kenya. *Ecosystems and People*, 15(1), 11-32. <https://doi.org/10.1080/21513732.2018.1529708>

Wastiaux, C. (2008). *Les tourbières sont-elles des éponges régularisant l'écoulement ? Bulletin de la Société géographique de Liège*, 50, 2008, 57-6

Wickham, H., Chang, W., (2014) Package 'ggplot2', disponible sur : [document \(psu.edu\)](http://document.psu.edu)

LIFE Anthropofens. : site internet du LIFE Anthropofens. <http://www.life-anthropofens.fr/>

## Annexes

### Annexe 1 : Classification et indicateurs des 17 SE

| Section           | Division  | Groupe                            | Code | Classe et définition   | Indicateurs  |
|-------------------|-----------|-----------------------------------|------|--|--|
| Approvisionnement | Nutrition | Biomasse comme denrée alimentaire | SA01 | L'habitat est : une <b>source de nourriture pour l'homme, d'origine animale élevée</b>                     | <b>Données paturage</b> : type et nombre de bêtes, surface associée  |
|                   |           |                                   | SA02 | L'habitat est : une <b>source de nourriture pour l'homme, d'origine animale sauvage</b>                    | <b>Données de chasse</b> : Nombre de Huttes de chasse, espèces pouvant être chassées<br><b>Données de pêche</b> : Espèces pêchées                                |
|                   |           |                                   | SA03 | L'habitat est : une <b>source de nourriture pour l'homme, d'origine végétale sauvage</b>                   | <b>Données espèces cueillies</b> : Cueillette possible, champignons comestibles, foin  |
|                   |           | Biomasse comme matériau           | SA04 | L'habitat est : une <b>source de matériaux pour l'homme</b> , pour l'énergie, le bois d'œuvre, litière ... | <b>Données de travaux</b> : Matière végétale exportée  |
|                   |           | Eau                               | SA05 | L'habitat : <b>alimente un stock d'eau potable</b>   | <b>Données AEP</b> : Quantité d'eau prélevée et localisation des aires d'alimentation  |
|                   |           |                                   | SA06 | L'habitat : <b>alimente un stock d'eau non potable</b> (irrigation, refroidissement,...)                   | <b>Données agriculture et industrie</b> : Quantité d'eau prélevable à fin d'irrigation, de consommation domestique et ou d'utilisation industrielle/ énergétique |

| Section  | Division  | Groupe  | Code | Classe et définition   | Indicateurs  |
|----------|---|---|------|--|--|
| Culturel | Interactions directes, in-situ et à l'extérieur avec des systèmes vivants qui dépendent des paramètres de l'environnement | Interactions intellectuelles et représentatives avec l'environnement naturel  | SC01 | L'habitat : possède <b>des systèmes vivants qui motivent les recherches scientifiques ou l'éducation</b> | <b>Données intérêt scientifique</b> : multiplicité des sites du LIFE Anthropofens, objectifs de connaissance du grand public, bibliographie associée au LIFE Anthropofens, faune et flore remarquables |
|          |   |   | SC02 | L'habitat : possède <b>des systèmes vivants qui ont des valeurs de lègs</b>                              | <b>Données intérêt général</b> : sites du Life, liste de faune et flore remarquables, zonages du site (Natura 2000, RAMSAR...)   |
|          | Interactions indirectes et distantes avec systèmes vivants  | Autres caractéristiques biotiques qui ont une valeur non relative à son usage | SC03 | L'habitat : possède <b>des systèmes vivants qui ont une valeur d'existence</b>                           | <b>Données intérêt général</b> : sites du Life, liste de faune et flore remarquables, zonages du site (Natura 2000, RAMSAR...)   |



| Section    | Division  | Groupe  | Code | Classe et définition   | Indicateurs  |
|------------|---|---|------|--|--|
| Régulation | Régulation des caractères physiques, chimiques et biologiques | Régulation des débits et prévention des risques naturels  | SR01 | L'habitat : <b>régule le cycle hydrologique et les débits et à maintenir l'écoulement d'eau</b> (comprenant les inondations et les crues)  | <b>Données hydrologiques</b> : Type d'habitat, pédologie, géologie, chroniques piezométriques et masses d'eau de proximité |
|            |   |   | SR02 | L'habitat : <b>atténue les mouvements de masses</b> en stoppant le <b>flux de sédiments</b> (glissement de terrain, ruissellements...)   | <b>Données hydrologique et phyto</b> : Plaine d'inondation et rugosité du couvert végétal                                  |
|            |   | Régulation de la qualité des sols   | SR03 | L'habitat : assure la <b>formation, le développement</b> des sols et le <b>maintien de la matière organique</b> dans les sols par les processus <b>d'altération, de décomposition et de fixation de nutriments</b> | <b>Données pédologiques</b> : type et qualité du sol   |
|            |   | Traitement des déchets ou substances toxiques d'origines anthropiques par les espèces végétales et animales | SR04 | L'habitat : effectue <b>de la bio-remédiation</b> (microorganismes, algues, plantes et animaux)  | <b>Données qualité chimique de l'eau et données habitats</b>   |
|            |   | Maintenance du cycle de vie, protection de l'habitat et du pool génétique                                   | SR05 | L'habitat : <b>participe à la protection de la biodiversité</b> (régulation du pool génétique et la diversité)   | <b>Données faune / flore</b>   |
|            |   | Régulation de l'état chimique de l'eau  | SR06 | L'habitat : assure le <b>bon état chimique des eaux douces par les espèces végétales et animales</b>   | <b>Données qualité de l'eau</b> : statut chimique des eaux   |
|            |   | Régulation de la composition atmosphérique et conditions climatiques  | SR07 | L'habitat : participe à <b>réguler le climat mondial</b> par la <b>réduction des concentrations de gaz à effet de serre</b>  | <b>Données pédologiques et de végétations</b>  |
|            |   |   | SR08 | L'habitat : participe à <b>réguler la température et l'humidité à une échelle locale</b>   | <b>Données habitats et d'engorgement</b>   |

## Annexe 2 : Tableau des coefficients du LMB

|                         | Estimate | Std. Error | z value | Pr(> z ) | Signif. |
|-------------------------|----------|------------|---------|----------|---------|
| (Intercept)             | 0.89272  | 0.04056    | 22.012  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSC02             | 0.06450  | 0.05789    | 1.114   | 0.265218 |         |
| SE_CodeSC03             | 0.24689  | 0.05504    | 4.485   | 7.28e-06 | ***     |
| HAB_Codeh2              | 0.15904  | 0.04859    | 3.274   | 0.001062 | **      |
| HAB_Codeh3              | 0.01961  | 0.05446    | 0.360   | 0.718731 |         |
| HAB_Codeh4              | 0.24596  | 0.06831    | 3.601   | 0.000317 | ***     |
| HAB_Codeh5              | 0.20197  | 0.05125    | 3.941   | 8.10e-05 | ***     |
| HAB_Codeh6              | 0.28458  | 0.05871    | 4.847   | 1.25e-06 | ***     |
| HAB_Codeh7              | 0.38579  | 0.04714    | 8.183   | 2.76e-16 | ***     |
| HAB_Codeh8              | 0.37630  | 0.07908    | 4.759   | 1.95e-06 | ***     |
| HAB_Codeh9              | -0.01417 | 0.07410    | -0.191  | 0.848331 |         |
| HAB_Codeh10             | 0.01749  | 0.08799    | 0.199   | 0.842444 |         |
| HAB_Codeh11             | -0.19957 | 0.09663    | -2.065  | 0.038887 | *       |
| HAB_Codeh12             | -0.61829 | 0.12238    | -5.052  | 4.37e-07 | ***     |
| HAB_CodeH1              | 0.28000  | 0.08716    | 3.212   | 0.001316 | **      |
| HAB_CodeH2              | 0.46765  | 0.06054    | 7.725   | 1.12e-14 | ***     |
| HAB_CodeH3              | 0.45391  | 0.08617    | 5.268   | 1.38e-07 | ***     |
| HAB_CodeH4              | 0.43347  | 0.10244    | 4.231   | 2.32e-05 | ***     |
| HAB_CodeH5              | 0.58525  | 0.04559    | 12.837  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSC02:HAB_Codeh2  | -0.01153 | 0.06950    | -0.166  | 0.868278 |         |
| SE_CodeSC03:HAB_Codeh2  | -0.13606 | 0.06671    | -2.040  | 0.041376 | *       |
| SE_CodeSC02:HAB_Codeh3  | -0.11402 | 0.07915    | -1.441  | 0.149696 |         |
| SE_CodeSC03:HAB_Codeh3  | -0.21686 | 0.07630    | -2.842  | 0.004480 | **      |
| SE_CodeSC02:HAB_Codeh4  | -0.25872 | 0.10169    | -2.544  | 0.010953 | *       |
| SE_CodeSC03:HAB_Codeh4  | -0.25878 | 0.09559    | -2.707  | 0.006785 | **      |
| SE_CodeSC02:HAB_Codeh5  | -0.13607 | 0.07442    | -1.828  | 0.067511 | .       |
| SE_CodeSC03:HAB_Codeh5  | -0.17600 | 0.07088    | -2.483  | 0.013021 | *       |
| SE_CodeSC02:HAB_Codeh6  | -0.02878 | 0.08504    | -0.338  | 0.735050 |         |
| SE_CodeSC03:HAB_Codeh6  | -0.22022 | 0.08290    | -2.656  | 0.007897 | **      |
| SE_CodeSC02:HAB_Codeh7  | -0.04394 | 0.06761    | -0.650  | 0.515750 |         |
| SE_CodeSC03:HAB_Codeh7  | -0.19843 | 0.06495    | -3.055  | 0.002250 | **      |
| SE_CodeSC02:HAB_Codeh8  | -0.07816 | 0.11463    | -0.682  | 0.495328 |         |
| SE_CodeSC03:HAB_Codeh8  | -0.23393 | 0.11346    | -2.062  | 0.039234 | *       |
| SE_CodeSC02:HAB_Codeh9  | 0.08657  | 0.10377    | 0.834   | 0.404145 |         |
| SE_CodeSC03:HAB_Codeh9  | -0.09582 | 0.10221    | -0.937  | 0.348540 |         |
| SE_CodeSC02:HAB_Codeh10 | -0.15640 | 0.12962    | -1.207  | 0.227594 |         |
| SE_CodeSC03:HAB_Codeh10 | -0.33879 | 0.12838    | -2.639  | 0.008314 | **      |
| SE_CodeSC02:HAB_Codeh11 | 0.04532  | 0.13800    | 0.328   | 0.742616 |         |
| SE_CodeSC03:HAB_Codeh11 | -0.13707 | 0.13683    | -1.002  | 0.316456 |         |
| SE_CodeSC02:HAB_Codeh12 | -0.54146 | 0.19259    | -2.811  | 0.004933 | **      |
| SE_CodeSC03:HAB_Codeh12 | -0.72385 | 0.19176    | -3.775  | 0.000160 | ***     |
| SE_CodeSC02:HAB_CodeH1  | 0.01796  | 0.11889    | 0.151   | 0.879899 |         |
| SE_CodeSC03:HAB_CodeH1  | -0.16442 | 0.11753    | -1.399  | 0.161810 |         |
| SE_CodeSC02:HAB_CodeH2  | -0.03636 | 0.08706    | -0.418  | 0.676166 |         |
| SE_CodeSC03:HAB_CodeH2  | -0.19261 | 0.08486    | -2.270  | 0.023219 | *       |
| SE_CodeSC02:HAB_CodeH3  | -0.01751 | 0.12818    | -0.137  | 0.891370 |         |
| SE_CodeSC03:HAB_CodeH3  | -0.24067 | 0.12495    | -1.926  | 0.054093 | .       |
| SE_CodeSC02:HAB_CodeH4  | 0.14179  | 0.14213    | 0.998   | 0.318471 |         |
| SE_CodeSC03:HAB_CodeH4  | -0.03263 | 0.14077    | -0.232  | 0.816690 |         |
| SE_CodeSC02:HAB_CodeH5  | -0.10728 | 0.06552    | -1.637  | 0.101540 |         |
| SE_CodeSC03:HAB_CodeH5  | -0.29325 | 0.06294    | -4.659  | 3.17e-06 | ***     |

|                        | Estimate  | Std. Error | z value | Pr(> z ) | Signif. |
|------------------------|-----------|------------|---------|----------|---------|
| (Intercept)            | 0.856740  | 0.040723   | 21.038  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSR02            | 0.186610  | 0.055487   | 3.363   | 0.000771 | ***     |
| SE_CodeSR03            | 0.184207  | 0.056395   | 3.266   | 0.001089 | **      |
| SE_CodeSR04            | 0.053709  | 0.060096   | 0.894   | 0.371472 | .       |
| SE_CodeSR05            | 0.263150  | 0.053179   | 4.948   | 7.48e-07 | ***     |
| SE_CodeSR06            | 0.047025  | 0.057784   | 0.814   | 0.415762 | .       |
| SE_CodeSR07            | 0.239275  | 0.054395   | 4.399   | 1.09e-05 | ***     |
| SE_CodeSR08            | 0.487346  | 0.052057   | 9.362   | < 2e-16  | ***     |
| HAB_Codeh2             | 0.367490  | 0.047180   | 7.789   | 6.74e-15 | ***     |
| HAB_Codeh3             | 0.154553  | 0.053772   | 2.874   | 0.004050 | **      |
| HAB_Codeh4             | 0.122208  | 0.066957   | 1.825   | 0.067975 | .       |
| HAB_Codeh5             | 0.359870  | 0.050145   | 7.177   | 7.15e-13 | ***     |
| HAB_Codeh6             | 0.361581  | 0.058033   | 6.231   | 4.65e-10 | ***     |
| HAB_Codeh7             | 0.482684  | 0.047010   | 10.268  | < 2e-16  | ***     |
| HAB_Codeh8             | 0.467312  | 0.079029   | 5.913   | 3.36e-09 | ***     |
| HAB_Codeh9             | -0.002105 | 0.077745   | -0.027  | 0.978398 | .       |
| HAB_Codeh10            | 0.105161  | 0.089598   | 1.174   | 0.240514 | .       |
| HAB_Codeh11            | 0.107560  | 0.088929   | 1.210   | 0.226469 | .       |
| HAB_Codeh12            | -0.070067 | 0.102893   | -0.681  | 0.495893 | .       |
| HAB_CodeH1             | 0.378005  | 0.087858   | 4.302   | 1.69e-05 | ***     |
| HAB_CodeH2             | 0.489167  | 0.061867   | 7.907   | 2.64e-15 | ***     |
| HAB_CodeH3             | 0.399058  | 0.087858   | 4.542   | 5.57e-06 | ***     |
| HAB_CodeH4             | 0.445785  | 0.106617   | 4.181   | 2.90e-05 | ***     |
| HAB_CodeH5             | 0.530993  | 0.046233   | 11.485  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSR02:HAB_Codeh2 | -0.268271 | 0.065484   | -4.097  | 4.19e-05 | ***     |
| SE_CodeSR03:HAB_Codeh2 | -0.370137 | 0.067128   | -5.514  | 3.51e-08 | ***     |
| SE_CodeSR04:HAB_Codeh2 | -0.274256 | 0.070823   | -3.872  | 0.000108 | ***     |
| SE_CodeSR05:HAB_Codeh2 | -0.303245 | 0.062785   | -4.830  | 1.37e-06 | ***     |
| SE_CodeSR06:HAB_Codeh2 | -0.141043 | 0.067590   | -2.087  | 0.036911 | *       |
| SE_CodeSR07:HAB_Codeh2 | -0.289632 | 0.064230   | -4.509  | 6.50e-06 | ***     |
| SE_CodeSR08:HAB_Codeh2 | -0.344620 | 0.061574   | -5.597  | 2.18e-08 | ***     |
| SE_CodeSR02:HAB_Codeh3 | -0.272630 | 0.076172   | -3.579  | 0.000345 | ***     |
| SE_CodeSR03:HAB_Codeh3 | -0.387361 | 0.077530   | -4.996  | 5.85e-07 | ***     |
| SE_CodeSR04:HAB_Codeh3 | -0.246915 | 0.080761   | -3.057  | 0.002233 | **      |
| SE_CodeSR05:HAB_Codeh3 | -0.251359 | 0.072332   | -3.475  | 0.000511 | ***     |
| SE_CodeSR06:HAB_Codeh3 | -0.113482 | 0.076688   | -1.480  | 0.138929 | .       |
| SE_CodeSR07:HAB_Codeh3 | -0.242977 | 0.073075   | -3.325  | 0.000884 | ***     |
| SE_CodeSR08:HAB_Codeh3 | -0.348897 | 0.070579   | -4.943  | 7.68e-07 | ***     |
| SE_CodeSR02:HAB_Codeh4 | -0.246046 | 0.095494   | -2.577  | 0.009979 | **      |
| SE_CodeSR03:HAB_Codeh4 | -0.015901 | 0.094724   | -0.168  | 0.866692 | .       |
| SE_CodeSR04:HAB_Codeh4 | -0.098347 | 0.102003   | -0.964  | 0.334966 | .       |
| SE_CodeSR05:HAB_Codeh4 | -0.028681 | 0.088442   | -0.324  | 0.745721 | .       |
| SE_CodeSR06:HAB_Codeh4 | 0.194394  | 0.092752   | 2.096   | 0.036096 | *       |
| SE_CodeSR07:HAB_Codeh4 | -0.145187 | 0.091511   | -1.587  | 0.112614 | .       |
| SE_CodeSR08:HAB_Codeh4 | -0.159228 | 0.087458   | -1.821  | 0.068664 | .       |
| SE_CodeSR02:HAB_Codeh5 | -0.315580 | 0.070271   | -4.491  | 7.09e-06 | ***     |
| SE_CodeSR03:HAB_Codeh5 | -0.292873 | 0.071194   | -4.114  | 3.89e-05 | ***     |
| SE_CodeSR04:HAB_Codeh5 | -0.062053 | 0.074420   | -0.834  | 0.404378 | .       |
| SE_CodeSR05:HAB_Codeh5 | -0.216358 | 0.066633   | -3.247  | 0.001166 | **      |
| SE_CodeSR06:HAB_Codeh5 | -0.060292 | 0.071709   | -0.841  | 0.400464 | .       |
| SE_CodeSR07:HAB_Codeh5 | -0.540174 | 0.070534   | -7.658  | 1.88e-14 | ***     |
| SE_CodeSR08:HAB_Codeh5 | -0.541737 | 0.067080   | -8.076  | 6.70e-16 | ***     |
| SE_CodeSR02:HAB_Codeh6 | -0.333950 | 0.083327   | -4.008  | 6.13e-05 | ***     |
| SE_CodeSR03:HAB_Codeh6 | -0.415267 | 0.085403   | -4.862  | 1.16e-06 | ***     |
| SE_CodeSR04:HAB_Codeh6 | -0.384726 | 0.090122   | -4.269  | 1.96e-05 | ***     |
| SE_CodeSR05:HAB_Codeh6 | -0.310624 | 0.079243   | -3.920  | 8.86e-05 | ***     |
| SE_CodeSR06:HAB_Codeh6 | 0.001358  | 0.081714   | 0.017   | 0.986737 | .       |
| SE_CodeSR07:HAB_Codeh6 | -0.467973 | 0.081782   | -5.722  | 1.05e-08 | ***     |
| SE_CodeSR08:HAB_Codeh6 | -0.799060 | 0.082779   | -9.653  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSR02:HAB_Codeh7 | -0.363862 | 0.065804   | -5.529  | 3.21e-08 | ***     |
| SE_CodeSR03:HAB_Codeh7 | -0.449447 | 0.067118   | -6.696  | 2.14e-11 | ***     |
| SE_CodeSR04:HAB_Codeh7 | -0.079250 | 0.069439   | -1.141  | 0.253750 | .       |
| SE_CodeSR05:HAB_Codeh7 | -0.302053 | 0.062526   | -4.831  | 1.36e-06 | ***     |
| SE_CodeSR06:HAB_Codeh7 | -0.005891 | 0.066828   | -0.088  | 0.929756 | .       |
| SE_CodeSR07:HAB_Codeh7 | -0.456987 | 0.064668   | -7.067  | 1.59e-12 | ***     |
| SE_CodeSR08:HAB_Codeh7 | -0.659694 | 0.062743   | -10.514 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSR02:HAB_Codeh8 | -0.374512 | 0.113706   | -3.294  | 0.000989 | ***     |
| SE_CodeSR03:HAB_Codeh8 | -0.420458 | 0.114902   | -3.659  | 0.000253 | ***     |
| SE_CodeSR04:HAB_Codeh8 | -0.272504 | 0.121742   | -2.238  | 0.025197 | *       |
| SE_CodeSR05:HAB_Codeh8 | -0.192744 | 0.107146   | -1.799  | 0.072034 | .       |
| SE_CodeSR06:HAB_Codeh8 | -0.084603 | 0.115979   | -0.729  | 0.465716 | .       |
| SE_CodeSR07:HAB_Codeh8 | -0.801187 | 0.122284   | -6.552  | 5.68e-11 | ***     |
| SE_CodeSR08:HAB_Codeh8 | -0.471623 | 0.109813   | -4.295  | 1.75e-05 | ***     |

Évaluation de la contribution du projet LIFE Anthropofens aux services écosystémiques liés aux cycles de l'eau et de l'azote

|                         | Estimate  | Std. Error | z value | Pr(> z ) | Signif. |
|-------------------------|-----------|------------|---------|----------|---------|
| (Intercept)             | 0.856740  | 0.040723   | 21.038  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSR02:HAB_Codeh9  | -0.153258 | 0.110677   | -1.385  | 0.166137 |         |
| SE_CodeSR03:HAB_Codeh9  | -0.296904 | 0.111033   | -2.674  | 0.007495 | **      |
| SE_CodeSR04:HAB_Codeh9  | -0.119886 | 0.113058   | -1.060  | 0.288966 |         |
| SE_CodeSR05:HAB_Codeh9  | -0.406780 | 0.107883   | -3.771  | 0.000163 | ***     |
| SE_CodeSR06:HAB_Codeh9  | 0.104782  | 0.105704   | 0.991   | 0.321547 |         |
| SE_CodeSR07:HAB_Codeh9  | 0.027050  | 0.100534   | 0.269   | 0.787883 |         |
| SE_CodeSR08:HAB_Codeh9  | -0.182927 | 0.100142   | -1.827  | 0.067749 | .       |
| SE_CodeSR02:HAB_Codeh10 | -0.164562 | 0.137091   | -1.200  | 0.229992 |         |
| SE_CodeSR03:HAB_Codeh10 | -0.613304 | 0.142897   | -4.292  | 1.77e-05 | ***     |
| SE_CodeSR04:HAB_Codeh10 | -0.078266 | 0.135330   | -0.578  | 0.563040 |         |
| SE_CodeSR05:HAB_Codeh10 | -0.488979 | 0.132668   | -3.686  | 0.000228 | ***     |
| SE_CodeSR06:HAB_Codeh10 | -0.089466 | 0.126640   | -0.706  | 0.479903 |         |
| SE_CodeSR07:HAB_Codeh10 | -0.124664 | 0.122126   | -1.021  | 0.307357 |         |
| SE_CodeSR08:HAB_Codeh10 | -0.334105 | 0.120598   | -2.770  | 0.005599 | **      |
| SE_CodeSR02:HAB_Codeh11 | -0.318001 | 0.134255   | -2.369  | 0.017854 | *       |
| SE_CodeSR03:HAB_Codeh11 | -0.623241 | 0.142067   | -4.387  | 1.15e-05 | ***     |
| SE_CodeSR04:HAB_Codeh11 | -0.218252 | 0.145250   | -1.503  | 0.132943 |         |
| SE_CodeSR05:HAB_Codeh11 | -0.307245 | 0.129963   | -2.364  | 0.018074 | *       |
| SE_CodeSR06:HAB_Codeh11 | -0.026267 | 0.126167   | -0.208  | 0.835079 |         |
| SE_CodeSR07:HAB_Codeh11 | -0.126354 | 0.120889   | -1.045  | 0.295928 |         |
| SE_CodeSR08:HAB_Codeh11 | -0.365937 | 0.124312   | -2.944  | 0.003243 | **      |
| SE_CodeSR02:HAB_Codeh12 | -0.318602 | 0.147687   | -2.157  | 0.030983 | *       |
| SE_CodeSR03:HAB_Codeh12 | -0.054589 | 0.145602   | -0.375  | 0.707718 |         |
| SE_CodeSR04:HAB_Codeh12 | -0.224621 | 0.155030   | -1.449  | 0.147368 |         |
| SE_CodeSR05:HAB_Codeh12 | -0.610457 | 0.151221   | -4.037  | 5.42e-05 | ***     |
| SE_CodeSR06:HAB_Codeh12 | -0.195901 | 0.142821   | -1.372  | 0.170170 |         |
| SE_CodeSR07:HAB_Codeh12 | -0.297210 | 0.137406   | -2.163  | 0.030540 | *       |
| SE_CodeSR08:HAB_Codeh12 | -0.470524 | 0.138207   | -3.404  | 0.000663 | ***     |
| SE_CodeSR02:HAB_CodeH1  | -0.322742 | 0.128007   | -2.521  | 0.011693 | *       |
| SE_CodeSR03:HAB_CodeH1  | -0.918708 | 0.140994   | -6.516  | 7.22e-11 | ***     |
| SE_CodeSR04:HAB_CodeH1  | -0.402402 | 0.135809   | -2.963  | 0.003047 | **      |
| SE_CodeSR05:HAB_CodeH1  | -0.387012 | 0.122418   | -3.161  | 0.001570 | **      |
| SE_CodeSR06:HAB_CodeH1  | -0.193795 | 0.121438   | -1.596  | 0.110526 |         |
| SE_CodeSR07:HAB_CodeH1  | -0.110715 | 0.113558   | -0.975  | 0.329578 |         |
| SE_CodeSR08:HAB_CodeH1  | -0.384370 | 0.115306   | -3.333  | 0.000858 | ***     |
| SE_CodeSR02:HAB_CodeH2  | -0.390419 | 0.088925   | -4.390  | 1.13e-05 | ***     |
| SE_CodeSR03:HAB_CodeH2  | -0.608432 | 0.094519   | -6.437  | 1.22e-10 | ***     |
| SE_CodeSR04:HAB_CodeH2  | -0.295321 | 0.092809   | -3.182  | 0.001463 | **      |
| SE_CodeSR05:HAB_CodeH2  | -0.295174 | 0.083507   | -3.535  | 0.000408 | ***     |
| SE_CodeSR06:HAB_CodeH2  | -0.080432 | 0.087729   | -0.917  | 0.359237 |         |
| SE_CodeSR07:HAB_CodeH2  | -0.492094 | 0.088871   | -5.537  | 3.07e-08 | ***     |
| SE_CodeSR08:HAB_CodeH2  | -0.693818 | 0.087956   | -7.888  | 3.06e-15 | ***     |
| SE_CodeSR02:HAB_CodeH3  | -0.252824 | 0.128007   | -1.975  | 0.048260 | *       |
| SE_CodeSR03:HAB_CodeH3  | -0.629075 | 0.139076   | -4.523  | 6.09e-06 | ***     |
| SE_CodeSR04:HAB_CodeH3  | -0.016738 | 0.127311   | -0.131  | 0.895399 |         |
| SE_CodeSR05:HAB_CodeH3  | -0.122703 | 0.117640   | -1.043  | 0.296928 |         |
| SE_CodeSR06:HAB_CodeH3  | -0.073590 | 0.127289   | -0.578  | 0.563172 |         |
| SE_CodeSR07:HAB_CodeH3  | -0.458981 | 0.130705   | -3.512  | 0.000445 | ***     |
| SE_CodeSR08:HAB_CodeH3  | -0.496895 | 0.123719   | -4.016  | 5.91e-05 | ***     |
| SE_CodeSR02:HAB_CodeH4  | -0.366992 | 0.156255   | -2.349  | 0.018840 | *       |
| SE_CodeSR03:HAB_CodeH4  | -0.138177 | 0.150015   | -0.921  | 0.357004 |         |
| SE_CodeSR04:HAB_CodeH4  | -0.219881 | 0.160206   | -1.372  | 0.169912 |         |
| SE_CodeSR05:HAB_CodeH4  | -0.061597 | 0.139575   | -0.441  | 0.658982 |         |
| SE_CodeSR06:HAB_CodeH4  | 0.046315  | 0.150238   | 0.308   | 0.757874 |         |
| SE_CodeSR07:HAB_CodeH4  | -0.137156 | 0.147507   | -0.930  | 0.352461 |         |
| SE_CodeSR08:HAB_CodeH4  | -0.383773 | 0.149072   | -2.574  | 0.010041 | *       |
| SE_CodeSR02:HAB_CodeH5  | -0.525123 | 0.065278   | -8.044  | 8.67e-16 | ***     |
| SE_CodeSR03:HAB_CodeH5  | -0.430507 | 0.065764   | -6.546  | 5.90e-11 | ***     |
| SE_CodeSR04:HAB_CodeH5  | -0.258312 | 0.069119   | -3.737  | 0.000186 | ***     |
| SE_CodeSR05:HAB_CodeH5  | -0.255793 | 0.061196   | -4.180  | 2.92e-05 | ***     |
| SE_CodeSR06:HAB_CodeH5  | -0.105622 | 0.066052   | -1.599  | 0.109805 |         |
| SE_CodeSR07:HAB_CodeH5  | -0.321328 | 0.063002   | -5.100  | 3.39e-07 | ***     |
| SE_CodeSR08:HAB_CodeH5  | -0.711303 | 0.061755   | -11.518 | < 2e-16  | ***     |

|                        | Estimate  | Std. Error | z value | Pr(> z ) | Signif. |
|------------------------|-----------|------------|---------|----------|---------|
| (Intercept)            | -0.516905 | 0.078087   | -6.620  | 3.60e-11 | ***     |
| SE_CodeSA02            | 1.547339  | 0.086339   | 17.922  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA03            | 0.676941  | 0.098075   | 6.902   | 5.12e-12 | ***     |
| SE_CodeSA04            | 1.813439  | 0.084437   | 21.477  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA05            | 1.006453  | 0.095027   | 10.591  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA06            | 1.022383  | 0.093694   | 10.912  | < 2e-16  | ***     |
| HAB_Codeh2             | 0.440589  | 0.089620   | 4.916   | 8.83e-07 | ***     |
| HAB_Codeh3             | 0.048158  | 0.105464   | 0.457   | 0.647937 |         |
| HAB_Codeh4             | 0.403576  | 0.118733   | 3.399   | 0.000676 | ***     |
| HAB_Codeh5             | 0.901488  | 0.089064   | 10.122  | < 2e-16  | ***     |
| HAB_Codeh6             | 1.673581  | 0.088357   | 18.941  | < 2e-16  | ***     |
| HAB_Codeh7             | 0.825246  | 0.086742   | 9.514   | < 2e-16  | ***     |
| HAB_Codeh8             | 0.133912  | 0.168285   | 0.796   | 0.426178 |         |
| HAB_Codeh9             | -0.302536 | 0.159149   | -1.901  | 0.057307 | .       |
| HAB_Codeh10            | -0.541702 | 0.254796   | -2.126  | 0.033501 | *       |
| HAB_Codeh11            | -0.524549 | 0.218550   | -2.400  | 0.016389 | *       |
| HAB_Codeh12            | 0.404787  | 0.151811   | 2.666   | 0.007667 | **      |
| HAB_CodeH1             | -0.581708 | 0.231768   | -2.510  | 0.012078 | *       |
| HAB_CodeH2             | 0.737059  | 0.109934   | 6.705   | 2.02e-11 | ***     |
| HAB_CodeH3             | 1.232031  | 0.130258   | 9.458   | < 2e-16  | ***     |
| HAB_CodeH4             | -1.850219 | 0.582607   | -3.176  | 0.001494 | **      |
| HAB_CodeH5             | 0.956856  | 0.085015   | 11.255  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA02:HAB_Codeh2 | -0.605928 | 0.100831   | -6.009  | 1.86e-09 | ***     |
| SE_CodeSA03:HAB_Codeh2 | -1.013073 | 0.120648   | -8.397  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA04:HAB_Codeh2 | -0.703469 | 0.098666   | -7.130  | 1.01e-12 | ***     |
| SE_CodeSA05:HAB_Codeh2 | -0.251310 | 0.110301   | -2.278  | 0.022703 | *       |
| SE_CodeSA06:HAB_Codeh2 | -0.119531 | 0.108221   | -1.105  | 0.269373 |         |
| SE_CodeSA02:HAB_Codeh3 | -0.113204 | 0.117081   | -0.967  | 0.333603 |         |
| SE_CodeSA03:HAB_Codeh3 | -0.509202 | 0.139721   | -3.644  | 0.000268 | ***     |
| SE_CodeSA04:HAB_Codeh3 | -0.701201 | 0.118207   | -5.932  | 2.99e-09 | ***     |
| SE_CodeSA05:HAB_Codeh3 | -0.075833 | 0.128865   | -0.588  | 0.556220 |         |
| SE_CodeSA06:HAB_Codeh3 | 0.036702  | 0.126201   | 0.291   | 0.771191 |         |
| SE_CodeSA02:HAB_Codeh4 | -0.937236 | 0.142026   | -6.599  | 4.14e-11 | ***     |
| SE_CodeSA03:HAB_Codeh4 | -1.264792 | 0.183706   | -6.885  | 5.78e-12 | ***     |
| SE_CodeSA04:HAB_Codeh4 | -0.611574 | 0.132895   | -4.602  | 4.19e-06 | ***     |
| SE_CodeSA05:HAB_Codeh4 | -0.541726 | 0.156325   | -3.465  | 0.000529 | ***     |
| SE_CodeSA06:HAB_Codeh4 | -0.702718 | 0.158912   | -4.422  | 9.78e-06 | ***     |
| SE_CodeSA02:HAB_Codeh5 | -1.048649 | 0.102309   | -10.250 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA03:HAB_Codeh5 | -0.867549 | 0.118205   | -7.339  | 2.15e-13 | ***     |
| SE_CodeSA04:HAB_Codeh5 | -1.701586 | 0.103458   | -16.447 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA05:HAB_Codeh5 | -0.626844 | 0.111624   | -5.616  | 1.96e-08 | ***     |
| SE_CodeSA06:HAB_Codeh5 | -0.544888 | 0.109494   | -4.976  | 6.48e-07 | ***     |
| SE_CodeSA02:HAB_Codeh6 | -1.782153 | 0.106705   | -16.702 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA03:HAB_Codeh6 | -2.154999 | 0.139257   | -15.475 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA04:HAB_Codeh6 | -2.397596 | 0.111812   | -21.443 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA05:HAB_Codeh6 | -1.545265 | 0.121880   | -12.679 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA06:HAB_Codeh6 | -1.441787 | 0.118680   | -12.148 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA02:HAB_Codeh7 | -0.846992 | 0.098032   | -8.640  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA03:HAB_Codeh7 | -1.007856 | 0.115448   | -8.730  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA04:HAB_Codeh7 | -1.394905 | 0.097781   | -14.266 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA05:HAB_Codeh7 | -0.448900 | 0.107146   | -4.190  | 2.79e-05 | ***     |
| SE_CodeSA06:HAB_Codeh7 | -0.382415 | 0.105508   | -3.625  | 0.000289 | ***     |
| SE_CodeSA02:HAB_Codeh8 | -0.448726 | 0.192572   | -2.330  | 0.019797 | *       |
| SE_CodeSA03:HAB_Codeh8 | -1.200670 | 0.281886   | -4.259  | 2.05e-05 | ***     |
| SE_CodeSA04:HAB_Codeh8 | -3.376357 | 0.374784   | -9.009  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA05:HAB_Codeh8 | 0.404700  | 0.196345   | 2.061   | 0.039287 | *       |
| SE_CodeSA06:HAB_Codeh8 | 0.471270  | 0.192324   | 2.450   | 0.014270 | *       |



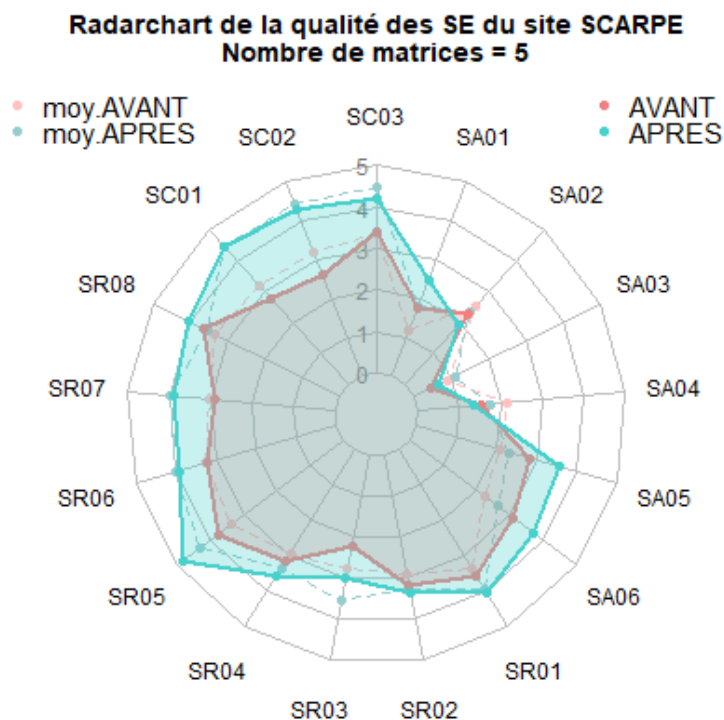
|                         | Estimate  | Std. Error | z value | Pr(> z ) | Signif. |
|-------------------------|-----------|------------|---------|----------|---------|
| (Intercept)             | -0.516905 | 0.078087   | -6.620  | 3.60e-11 | ***     |
| SE_CodeSA02:HAB_Codeh9  | 0.410054  | 0.172199   | 2.381   | 0.017253 | *       |
| SE_CodeSA03:HAB_Codeh9  | 0.199658  | 0.195215   | 1.023   | 0.306420 |         |
| SE_CodeSA04:HAB_Codeh9  | -0.326169 | 0.177450   | -1.838  | 0.066049 | .       |
| SE_CodeSA05:HAB_Codeh9  | 0.229148  | 0.188024   | 1.219   | 0.222951 |         |
| SE_CodeSA06:HAB_Codeh9  | 0.426416  | 0.184384   | 2.313   | 0.020742 | *       |
| SE_CodeSA02:HAB_Codeh10 | 0.657890  | 0.267369   | 2.461   | 0.013870 | *       |
| SE_CodeSA03:HAB_Codeh10 | 0.481749  | 0.290371   | 1.659   | 0.097099 | .       |
| SE_CodeSA04:HAB_Codeh10 | 0.008695  | 0.275067   | 0.032   | 0.974781 |         |
| SE_CodeSA05:HAB_Codeh10 | 0.696983  | 0.278845   | 2.500   | 0.012436 | *       |
| SE_CodeSA06:HAB_Codeh10 | 0.562317  | 0.281008   | 2.001   | 0.045385 | *       |
| SE_CodeSA02:HAB_Codeh11 | 0.598458  | 0.234170   | 2.556   | 0.010599 | *       |
| SE_CodeSA03:HAB_Codeh11 | 0.182191  | 0.271123   | 0.672   | 0.501592 |         |
| SE_CodeSA04:HAB_Codeh11 | 0.072711  | 0.237926   | 0.306   | 0.759905 |         |
| SE_CodeSA05:HAB_Codeh11 | 0.792687  | 0.247211   | 3.207   | 0.001344 | **      |
| SE_CodeSA06:HAB_Codeh11 | 0.478604  | 0.252197   | 1.898   | 0.057730 | .       |
| SE_CodeSA02:HAB_Codeh12 | -0.401567 | 0.176394   | -2.277  | 0.022814 | *       |
| SE_CodeSA03:HAB_Codeh12 | -1.329430 | 0.252200   | -5.271  | 1.35e-07 | ***     |
| SE_CodeSA04:HAB_Codeh12 | -0.270132 | 0.170167   | -1.587  | 0.112409 |         |
| SE_CodeSA05:HAB_Codeh12 | -0.340450 | 0.193581   | -1.759  | 0.078629 | .       |
| SE_CodeSA06:HAB_Codeh12 | -0.463251 | 0.193276   | -2.397  | 0.016537 | *       |
| SE_CodeSA02:HAB_CodeH1  | 0.494472  | 0.252830   | 1.956   | 0.050495 | .       |
| SE_CodeSA03:HAB_CodeH1  | 0.048467  | 0.284688   | 0.170   | 0.864817 |         |
| SE_CodeSA04:HAB_CodeH1  | 0.156001  | 0.250001   | 0.624   | 0.532626 |         |
| SE_CodeSA05:HAB_CodeH1  | 0.774835  | 0.259182   | 2.990   | 0.002794 | **      |
| SE_CodeSA06:HAB_CodeH1  | 0.720106  | 0.257873   | 2.792   | 0.005231 | **      |
| SE_CodeSA02:HAB_CodeH2  | -0.736263 | 0.126978   | -5.798  | 6.70e-09 | ***     |
| SE_CodeSA03:HAB_CodeH2  | -1.450480 | 0.173492   | -8.361  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA04:HAB_CodeH2  | -1.462704 | 0.132672   | -11.025 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA05:HAB_CodeH2  | -0.386007 | 0.138023   | -2.797  | 0.005163 | **      |
| SE_CodeSA06:HAB_CodeH2  | -0.173338 | 0.133235   | -1.301  | 0.193260 |         |
| SE_CodeSA02:HAB_CodeH3  | -1.252980 | 0.163703   | -7.654  | 1.95e-14 | ***     |
| SE_CodeSA03:HAB_CodeH3  | -1.247486 | 0.199296   | -6.259  | 3.86e-10 | ***     |
| SE_CodeSA04:HAB_CodeH3  | -1.720108 | 0.167033   | -10.298 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA05:HAB_CodeH3  | -0.539268 | 0.164921   | -3.270  | 0.001076 | **      |
| SE_CodeSA06:HAB_CodeH3  | -0.451298 | 0.161948   | -2.787  | 0.005325 | **      |
| SE_CodeSA02:HAB_CodeH4  | 1.804638  | 0.594000   | 3.038   | 0.002381 | **      |
| SE_CodeSA03:HAB_CodeH4  | 0.773892  | 0.652905   | 1.185   | 0.235897 |         |
| SE_CodeSA04:HAB_CodeH4  | 0.083681  | 0.624870   | 0.134   | 0.893468 |         |
| SE_CodeSA05:HAB_CodeH4  | 1.893475  | 0.603409   | 3.138   | 0.001701 | **      |
| SE_CodeSA06:HAB_CodeH4  | 1.927887  | 0.604456   | 3.189   | 0.001425 | **      |
| SE_CodeSA02:HAB_CodeH5  | -1.178613 | 0.096978   | -12.153 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA03:HAB_CodeH5  | -1.095174 | 0.112702   | -9.717  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA04:HAB_CodeH5  | -1.953985 | 0.098276   | -19.883 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA05:HAB_CodeH5  | -0.584328 | 0.105339   | -5.547  | 2.90e-08 | ***     |
| SE_CodeSA06:HAB_CodeH5  | -0.488503 | 0.103532   | -4.718  | 2.38e-06 | ***     |

### Annexe 3 : Tableau des coefficients du LMA

|                           | Estimate  | Std. Error | z value | Pr(> z ) | Signif. |
|---------------------------|-----------|------------|---------|----------|---------|
| (Intercept)               | 0.321302  | 0.028826   | 11.146  | < 2e-16  | ***     |
| fct_inorder(Travaux)APRES | 0.404828  | 0.024875   | 16.274  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA02               | 0.765081  | 0.018824   | 40.644  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA03               | -0.299316 | 0.024417   | -12.259 | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA04               | 0.598344  | 0.019486   | 30.706  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA05               | 0.558396  | 0.020339   | 27.455  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSA06               | 0.651212  | 0.019809   | 32.875  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSC01               | 1.003808  | 0.018268   | 54.950  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSC02               | 0.999183  | 0.018596   | 53.731  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSC03               | 1.045433  | 0.018400   | 56.817  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSR01               | 1.035124  | 0.018158   | 57.007  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSR02               | 0.905929  | 0.018693   | 48.464  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSR03               | 0.849881  | 0.018915   | 44.932  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSR04               | 0.915439  | 0.018998   | 48.187  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSR05               | 1.044513  | 0.017954   | 58.177  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSR06               | 1.025065  | 0.018310   | 55.985  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSR07               | 0.952899  | 0.018321   | 52.010  | < 2e-16  | ***     |
| SE_CodeSR08               | 1.045763  | 0.018207   | 57.438  | < 2e-16  | ***     |
| SITEBVS_PR_B              | 0.079065  | 0.022486   | 3.516   | 0.000438 | ***     |
| SITEFOUCHES               | -0.073643 | 0.030755   | -2.395  | 0.016641 | *       |
| SITEHEINSCH               | -0.085871 | 0.028715   | -2.990  | 0.002785 | **      |
| SITEMALP                  | 0.006566  | 0.023902   | 0.275   | 0.783543 |         |
| SITEMMMC                  | 0.076285  | 0.022683   | 3.363   | 0.000771 | ***     |
| SITEMMS_A_C               | -0.041512 | 0.024083   | -1.724  | 0.084761 | .       |
| SITEMS                    | 0.045614  | 0.024298   | 1.877   | 0.060479 | .       |
| SITEMVS                   | -0.117735 | 0.022833   | -5.156  | 2.52e-07 | ***     |
| SITEPETIT-VIVIER          | -0.048933 | 0.037135   | -1.318  | 0.187607 |         |
| SITEPMTBVA                | 0.055134  | 0.023485   | 2.348   | 0.018894 | *       |
| SITESACY                  | -0.190792 | 0.024485   | -7.792  | 6.58e-15 | ***     |
| SITESAMPONT               | -0.099788 | 0.026266   | -3.799  | 0.000145 | ***     |
| SITESCARPE                | -0.025348 | 0.023290   | -1.088  | 0.276438 |         |
| SITSEMOIS                 | -0.077895 | 0.028117   | -2.770  | 0.005598 | **      |
| SITETMA                   | -0.009851 | 0.023727   | -0.415  | 0.678016 |         |
| NOM1                      | -0.360493 | 0.030258   | -11.914 | < 2e-16  | ***     |
| NOM2                      | -0.075296 | 0.031429   | -2.396  | 0.016588 | *       |
| NOM3                      | 0.136170  | 0.032510   | 4.189   | 2.81e-05 | ***     |
| NOM4                      | -0.573066 | 0.033336   | -17.190 | < 2e-16  | ***     |
| NOM5                      | -0.080515 | 0.012704   | -6.338  | 2.33e-10 | ***     |
| NOM6                      | -0.683548 | 0.019345   | -35.335 | < 2e-16  | ***     |
| NOM7                      | 0.090777  | 0.026744   | 3.394   | 0.000688 | ***     |
| NOM8                      | -0.123845 | 0.028845   | -4.293  | 1.76e-05 | ***     |
| NOM9                      | -0.179617 | 0.021331   | -8.421  | < 2e-16  | ***     |
| NOM10                     | 0.135550  | 0.022004   | 6.160   | 7.26e-10 | ***     |
| NOM11                     | -0.001214 | 0.028299   | -0.043  | 0.965776 |         |
| NOM12                     | -0.311637 | 0.017645   | -17.662 | < 2e-16  | ***     |
| NOM13                     | -0.250119 | 0.023642   | -10.580 | < 2e-16  | ***     |
| NOM14                     | 0.108695  | 0.017922   | 6.065   | 1.32e-09 | ***     |
| NOM15                     | -0.215521 | 0.014534   | -14.829 | < 2e-16  | ***     |
| NOM16                     | 0.018175  | 0.025938   | 0.701   | 0.483467 |         |

|                          | Estimate  | Std. Error | z value | Pr(> z ) | Signif. |
|--------------------------|-----------|------------|---------|----------|---------|
| (Intercept)              | 0.321302  | 0.028826   | 11.146  | < 2e-16  | ***     |
| NOM17                    | -0.143764 | 0.034979   | -4.110  | 3.96e-05 | ***     |
| NOM18                    | -0.175553 | 0.021553   | -8.145  | 3.79e-16 | ***     |
| NOM19                    | -0.734481 | 0.028965   | -25.357 | < 2e-16  | ***     |
| NOM20                    | -0.373878 | 0.063211   | -5.915  | 3.32e-09 | ***     |
| NOM21                    | -0.076997 | 0.024931   | -3.088  | 0.002012 | **      |
| NOM22                    | 0.147531  | 0.027383   | 5.388   | 7.14e-08 | ***     |
| NOM23                    | -0.062676 | 0.014567   | -4.303  | 1.69e-05 | ***     |
| NOM24                    | -0.208404 | 0.036163   | -5.763  | 8.27e-09 | ***     |
| NOM25                    | -0.206118 | 0.015114   | -13.638 | < 2e-16  | ***     |
| NOM26                    | 0.067739  | 0.016304   | 4.155   | 3.26e-05 | ***     |
| NOM27                    | -0.095417 | 0.018003   | -5.300  | 1.16e-07 | ***     |
| NOM28                    | -0.436959 | 0.025502   | -17.135 | < 2e-16  | ***     |
| NOM29                    | -0.092568 | 0.024566   | -3.768  | 0.000164 | ***     |
| NOM30                    | -0.136850 | 0.018470   | -7.409  | 1.27e-13 | ***     |
| NOM31                    | -0.107478 | 0.034814   | -3.087  | 0.002020 | **      |
| NOM32                    | -0.252649 | 0.030263   | -8.348  | < 2e-16  | ***     |
| NOM33                    | -0.198673 | 0.026952   | -7.371  | 1.69e-13 | ***     |
| NOM34                    | 0.074963  | 0.023443   | 3.198   | 0.001385 | **      |
| NOM35                    | -0.237365 | 0.028286   | -8.392  | < 2e-16  | ***     |
| NOM36                    | 0.062799  | 0.023270   | 2.699   | 0.006960 | **      |
| NOM37                    | -0.321700 | 0.019025   | -16.909 | < 2e-16  | ***     |
| NOM38                    | -0.011226 | 0.021327   | -0.526  | 0.598618 |         |
| NOM39                    | 0.049127  | 0.022730   | 2.161   | 0.030672 | *       |
| NOM40                    | -0.188184 | 0.020544   | -9.160  | < 2e-16  | ***     |
| NOM41                    | -0.040924 | 0.020897   | -1.958  | 0.050186 | .       |
| NOM42                    | 0.073210  | 0.021524   | 3.401   | 0.000671 | ***     |
| NOM43                    | -0.199195 | 0.038668   | -5.151  | 2.58e-07 | ***     |
| NOM44                    | -0.600414 | 0.018270   | -32.864 | < 2e-16  | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSA02 | -0.482177 | 0.032029   | -15.054 | < 2e-16  | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSA03 | -0.201496 | 0.040682   | -4.953  | 7.31e-07 | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSA04 | -0.625519 | 0.034171   | -18.306 | < 2e-16  | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSA05 | -0.288632 | 0.033956   | -8.500  | < 2e-16  | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSA06 | -0.262412 | 0.032954   | -7.963  | 1.68e-15 | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSC01 | -0.091863 | 0.029704   | -3.093  | 0.001984 | **      |
| TravauxAPRES:SE_CodeSC02 | -0.084798 | 0.030190   | -2.809  | 0.004972 | **      |
| TravauxAPRES:SE_CodeSC03 | -0.128489 | 0.030007   | -4.282  | 1.85e-05 | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSR01 | -0.242624 | 0.029833   | -8.133  | 4.20e-16 | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSR02 | -0.305035 | 0.031103   | -9.807  | < 2e-16  | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSR03 | -0.171944 | 0.031069   | -5.534  | 3.13e-08 | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSR04 | -0.278966 | 0.031553   | -8.841  | < 2e-16  | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSR05 | -0.169452 | 0.029373   | -5.769  | 7.97e-09 | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSR06 | -0.209642 | 0.030070   | -6.972  | 3.13e-12 | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSR07 | -0.151191 | 0.029955   | -5.047  | 4.48e-07 | ***     |
| TravauxAPRES:SE_CodeSR08 | -0.350493 | 0.030413   | -11.525 | < 2e-16  | ***     |

## Annexe 4 : Résultats du site des vallées de la Scarpe et de l'Escaut



## Annexe 5 : Abréviations

ORGANISMES : CEN80 (Somme) ; CEN02 (Aisne) ; CEN62 (Pas-de-Calais) ; CEN25 (Doubs) ; Picardie Nature ; EPTB Somme – AMEVA ; SMBS-GLP : Syndicat mixte Baie de Somme – Grand Littoral Picard ; CD80 : Conseil Départemental de la Somme ; FDAAPPMA80 : Fédération de la Somme pour la Pêche et la protection du milieu aquatique ; NATAGORA ; T. VALAT : Tour du VALAT ; PNRSE : PNR Scarpe Escaut ; U. Antwerp : Université d'Anvers ; U. PJV : Université Picardie Jules Verne

CES : Chargé d'étude scientifique ; CMS : Chargé de mission scientifique ; CMB : Chargée de mission Biodiversité ; CMT : Chargé de mission territoriale ; ST : Stagiaire ; ASSIST. INGE : assistant ingénieur ; RESP MISSION SC. : responsable mission scientifique ; CPNatura2000 : Chargée de projet Natura 2000 ; CMNatura2000 : Chargée de mission Natura 2000 ; CEMN : Chargé d'études Milieux Naturels ; CMRAMSAR : Chargée de mission RAMSAR ; CB : conservateur bénévole ; DIR : Directeur ; GL : garde littoral ; RUTech : Responsable d'unité technique ; CR : Chargé de recherche ; RESP. COMM : Responsable communication ; RD : Responsable départemental ; COORD. LIFE : Coordinateur Life ; CP LIFE : Chargée de projet Life Anthropofens ; CPS : Chargée de projets scientifiques ; CU : Chercheur universitaire

### SPECIALITÉ

GEN : généraliste ; ECOLOGIE : écologie des communautés ; FAUNE AQUA : Faune aquatique ; GES : Gaz à effet de serre ; FAUNE ET FLORE : faune et flore ; FLORE HYDRO. : Flore et hydrologie ; FAUNE PISCI. : Faune piscicole ; DD : Développement durable ; PHYTOSOCIO : Phytosociologique et botanique ; GEST.MILIEUX AQUA. : gestion milieux aquatiques ; GEST. TECH : gestion technique des sites ; TOURB. : Tourbières ; GEOL : Géologie

Le LIFE Anthropofens est mis en œuvre par :



Avec la participation financière de :



Avec le soutien de :

