

Inventaire des enveloppes tourbeuses régionales



Animé par :



Conservatoire
d'espaces naturels
Hauts-de-France

Réalisation : Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France

Rédaction : RAYMOND Lucas, JACEK Guillaume

Relecture : GUYÉTANT Gaëlle

Réalisé avec le soutien financier de :



Citation recommandée : RAYMOND L. & JACEK G., 2025 – PRAT. Inventaire des enveloppes tourbeuses régionales 2025. Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France, Boves. Rapport 120 p.

Date de réalisation : mai 2026

Table des matières

Contexte et contenu du document	7
Chapitre 1 : Localisation et délimitation des enveloppes de tourbes	9
1. Données pédologiques : récolte, bancarisation et analyses	9
1.1. Résumé des inventaires pédologiques réalisés en région	9
1.2. Avancement de la prospection des zones potentiellement tourbeuses des Hauts-de-France.....	12
1.3. Sondages déterminants tourbeux	16
2. Délimitation et caractérisation des enveloppes tourbeuses en région	23
2.2. Elaboration des « cartes de chaleur » de la tourbe en Hauts-de-France	26
2.3. Carte de veille	34
Conclusion intermédiaire	38
Synthèse des productions cartographiques	39
Choix et utilisations des supports cartographiques	40
Chapitre 2 : Analyse des résultats de pré-cartographie et optimisation de la carte de veille régionale	41
1. Contexte et évolution de la stratégie d'inventaire	41
2. Relation entre potentialité tourbeuse et sondage déterminant tourbeux	42
2.1. Potentialité tourbeuse et présence effective de tourbe	42
2.2. Potentialités tourbeuses et catégories des sondages du PRAT	44
3. Évaluation des performances prédictives du modèle PRAT	46
3.1. Méthode	46
3.2. Résultats	48
3.3. Affinement des seuils de potentialité tourbeuse	49
Conclusion	50
Chapitre 3 : Carte de veille par machine learning.....	53
1. Introduction.....	53
2. Méthode	54
2.1. Données d'entrée et sélection des variables explicatives	54
2.2. Outils, logiciels et traitements	58
3. Résultats	63
3.1. Corrélation des variables environnementales.....	63
3.2. Performances des modèles fondés sur les rasters monobandes	64
3.3. Performances des modèles fondés sur des rasters multibandes	66
3.4. Raster multibande retenu	68

4. Discussion.....	69
4.1. Limites de l'accuracy comme indicateur unique de performance	69
4.2. Pertinence d'un modèle détectant environ 60 % des occurrences de tourbes	69
4.3. Complémentarité avec la précartographie kilométrique	70
Chapitre 4 : Valorisation des données et réseau d'acteurs	71
1. Bancarisation des données pédologiques : DoneSol.....	71
1.1. Présentation générale	71
1.2. Retour d'expériences, limites et leviers d'améliorations DoneSol	73
2. Valorisation des données cartographiques et flore	75
3. L'animation du réseau d'acteurs.....	75
3.1. Démarchage de contacts internes au CEN	75
3.2. Démarche sur des sites gérés (hors sites CEN).....	75
3.3. Accès aux terrains et relevés en zones privées	76
FICHES ENVELOPPES TOURBEUSES	79
Perspectives.....	108
Diffusion des données et sensibilisation	108
Évaluation des stocks de carbone.....	108
Bibliographie	109
ANNEXES :	111

Table des illustrations

Carte 1 Répartition des sondages pédologiques réalisés en zones tourbeuses dans le cadre des inventaires tourbières (2013-2025)	10
Carte 2 Synthèse départementale du niveau de prospection	14
Carte 3 : Présence ou absence d'un horizon tourbeux au sein du sondage	17
Carte 4 Répartition des sondages en région selon leur catégorie au classement PRAT	20
Carte 5 Distribution départementale des classes de sondages PRAT	22
Carte 6 : Localisation des zones tourbeuses avérées par un sondage en région (Résolution 1km ²)	25
Carte 7 Localisation des enveloppes de tourbe en région Hauts-de-France	30
Carte 8 Répartition verticale de la tourbe en région sur le premier mètre de profondeur	33
Carte 9 Potentialité locale de la présence de tourbe en région Hauts-de-France par apprentissage automatique	37
Carte 10 : Localisation des enveloppes tourbeuses travaillées sous forme de fiche en 2025.....	79
Figure 1 : Différents cas de figure pour l'attribution d'une catégorie « déterminant tourbeux » PRAT.....	18
Figure 2 : schéma conceptuelle de l'interpolation IDW (a, b, c) ; exemple de résultats (d)	26
Figure 3 : représentation du maillage de points artificiels couplé aux données de terrain	28
Figure 4 : Schéma conceptuel des variables environnementales utilisées en machine learning pour caractériser les sondages et autotClassifier à l'échelle régionale.....	34
Figure 5 : Relation quasi monotone entre le taux de validation des mailles et leur niveau de potentialité tourbeuse	43

Figure 6 : Principe de construction des matrices de confusion	47
Figure 7 : Schéma conceptuel du Random Forest. Traduit de « Sheykhmousa et al.: Support vector machine versus random forest for remote sensing image classification.	56
Figure 8 : MNT de la région Hauts-de-France, BD-Alti 25 m IGN	59
Figure 9 : rasters calculés et mobilisés comme variable environnementale (a. Pente ; b. Accumulation des flux ; c. Indice Topographique d'Humidité)	60
Figure 10 : a. Indice de Position Topographique (TPI) ; b. Indice de Rugosité du Terrain (TRI)	61
Figure 11 : Haut gauche, Cartographie des habitats vectorisée ; Haut droite, Cartographie des habitats rasterisée ; Bas gauche, couche géologique GEO050K vectorisée, Bas droite couche géologique GEO050K rasterisée	62
Figure 12 Matrice de corrélation des variables environnementales utilisées	63
Figure 13 : Evolution de la précision pour la classe tourbe ; en abscisse tailles des échantillons en log10, en ordonnée performance moyenne du modèle, l'aplatissement de couleur représente l'évolution de la variance.....	64
Figure 14 : Evolution de la sensibilité pour la classe tourbe ; en abscisse tailles des échantillons en log10, en ordonnée performance moyenne du modèle, l'aplatissement de couleur représente l'évolution de la variance.....	65
Figure 15 : Evolution des performances du modèle sur les rasters multibande. En abscisse tailles des échantillons en log10, en ordonnées performance moyenne des 1 000 répétitions, l'aplatissement de couleur représente la variance. a. Précision du modèle pour la classe tourbe ; b. Sensibilité du modèle pour la classe tourbe.	67
Tableau 1 Critères unifiés de classification des sondages réalisés	11
Tableau 2 Taux de prospection par niveau de potentialité de présence de tourbe	12
Tableau 3 Nombre de sondages affiliés aux différentes catégories PRAT	19
Tableau 4 : Transformation des données en champs numériques	27
Tableau 5 : Résidus standardisés du test du Chi ² de la relation entre catégorie de sondage et niveau de potentialité tourbeuse.	45
Tableau 6 Catégories de performance du modèle	47
Tableau 7 : Sensibilité, précision et spécificité du modèle précartographique	48
Tableau 8 : Rasters mobilisés pour les tests et le modèle finale	54
Tableau 9 : Seuil du test Spearman utilisé pour l'analyse de corrélation	55
Tableau 10 : comparaison des combinaisons multibandes, à taille d'apprentissage maximale (n= 2852)	68
Tableau 11 : variables utilisées pour caractériser les horizons du sondage pédologique (les variables avec un * sont exclusivement enregistré en interne)	72
Tableau 12 : Récapitulatif des structures et acteurs du territoire contactés en 2025 pour la prospection du PRAT	77
Tableau 13 : Liste des contacts de 2025	78
Tableau 14 : Liste des syntaxons déterminants tourbières en région Hauts-de-France	111
Tableau 15 : Liste des plantes vasculaires typiques de tourbières en région Hauts-de-France	112
Tableau 16 : Liste des bryophytes typiques de tourbières en région Hauts-de-France.....	114
Tableau 17 : Liste des Characées typiques de tourbières en région Hauts-de-France	115



Contexte et contenu du document

En 2007 et en 2010, à l'occasion de la rédaction de deux numéros de la revue *L'écho des tourbières*, un tour d'horizon national des connaissances régionales sur les tourbières a pu être dressé par les Conservatoires d'espaces naturels (CEN) et le Pôle Relais Tourbières. Le niveau des connaissances est apparu insuffisant pour localiser précisément les tourbières et apprécier leurs enjeux de conservation dans le cadre, notamment, des travaux préalables à la réalisation des schémas départementaux des carrières ou encore, à la priorisation des actions de préservations des sites.

Face à ce constat, des projets visant à une meilleure localisation de ces milieux se sont alors développés et notamment à l'échelle de la région Hauts-de-France :

- Un inventaire des tourbières *via* la réalisation de sondages pédologiques sur le terrain entre 2013 à 2017 sur le territoire Picard (Aisne, Oise et Somme) par l'ex CEN Picardie.
- Une prélocalisation des tourbières établie dès 2011 côtés Nord-pas de Calais par l'ex CEN Nord-Pas-de-Calais.

La fusion des deux anciens conservatoires en 2020 a incité à travailler de façon homogène et coordonnée à l'échelle des Hauts-de-France. Depuis 2022, un projet de plan régional d'action en faveur des tourbières (PRAT), incluant un volet *Connaissance* dédié notamment à l'homogénéisation de la méthode d'inventaire et sa poursuite, a été lancé par le CEN Hauts-de-France.

L'inventaire des tourbières régionales réalisé dans le PRAT se base sur un travail de précartographie des potentialités de présence de tourbe en région produit en 2020 (Lebrun *et al.*, 2020) et mis à jour en 2024 (Jacek *et al.*, 2024). Ce travail a permis à l'échelle de maille d'1km² d'identifier et de prioriser les zones d'inventaires à prospecter *in situ* sur la base de données extraites de bases de données pédologiques, hydrologiques, géologiques, floristiques et d'habitats régionales et nationales. Pour plus d'information nous conseillons le lecteur de se référer aux documents cités ci-dessus.

In situ, la délimitation des enveloppes tourbeuses repose majoritairement sur la réalisation de sondages pédologiques, visant à confirmer ou infirmer la présence de tourbe au sein des mailles identifiées lors de la phase de précartographie. Il est important de garder en tête que la présence de tourbe dans le sondage ne reflète cependant pas la fonctionnalité actuelle du milieu, la mise en place des phénomènes de turfigénèse, ou le maintien sans dégradation du stock actuel présent. L'objectif de cet inventaire est prioritairement d'identifier les enveloppes de tourbe et ce peu importe leur niveau de fonctionnalité et leur état de conservation. Un inventaire complémentaire de la flore turficole et des habitats associés est cependant réalisé lorsque nécessaire pour évaluer les niveaux de fonctionnalité du milieu.

Compte tenu de l'ampleur des zones d'inventaire à prospecter, il est rapidement apparu qu'une délimitation fine des enveloppes tourbeuses régionales, tant en surface qu'en profondeur, était difficilement réalisable. Une approche en deux temps a donc été retenue.

1. Dans un premier temps, la présence de tourbe dans les mailles issues de la précartographie a été confirmée ou infirmée par la réalisation de sondages pédologiques

ciblés, réalisés au sein des secteurs identifiés comme les plus pertinents à dire d'experts.

2. Pour compléter les éventuelles lacunes de cette approche, un travail cartographique d'interpolation et de machine-learning s'appuyant sur les sondages réalisés a permis de produire une **carte de veille tourbeuse** avec une précision de l'ordre de 25 mètres.

La série de documents présentée ci-après, structurée en quatre chapitres, a pour objectif de compiler l'ensemble des méthodes mises en œuvre ainsi que les résultats des analyses réalisées pour atteindre ces deux objectifs.

Les présents documents ne reviennent pas sur les différentes actions du PRAT ni sur la méthode d'inventaire de terrain initiale ; pour ces éléments, le lecteur est invité à se référer au document de référence.

- **Chapitre 1 : Localisation et délimitation des enveloppes de tourbes**

Ce chapitre présente une analyse générale des inventaires pédologiques faits entre 2013 et 2025 en région et la définition des principales enveloppes régionales

- **Chapitre 2 : Analyse des résultats de précartographie**

Ce chapitre présente un retour sur l'efficacité de la méthode de prélocalisation par rapport aux observations de terrain

- **Chapitre 3 : Mise en place d'une carte de veille régionale**

Ce chapitre présente en détail la méthode de création de cartographie de veille tourbeuse d'une résolution de 25m de rayon

- **Chapitre 4 : Valorisation des données et réseau d'acteur**

Ce chapitre présente un retour d'expérience sur l'utilisation de la base de données DoneSol, les acteurs du territoire mobilisés dans la cadre du PRAT ainsi qu'une présentation détaillée de cinq enveloppes tourbeuses de la région.

Chapitre 1 : Localisation et délimitation des enveloppes de tourbes

1. Données pédologiques : récolte, bancarisation et analyses

1.1. Résumé des inventaires pédologiques réalisés en région

Les inventaires pédologiques réalisés en régions entre 2013 et 2025 complétés par la récupération de données produites par des structures partenaires et des bureaux d'études a permis l'agrégation de 3803 sondages pédologiques sur la zone concernée par l'inventaire du Plan régional d'action en faveur des tourbières **Carte 1**. Les données de sondages sont actuellement divisées en 3 bases.

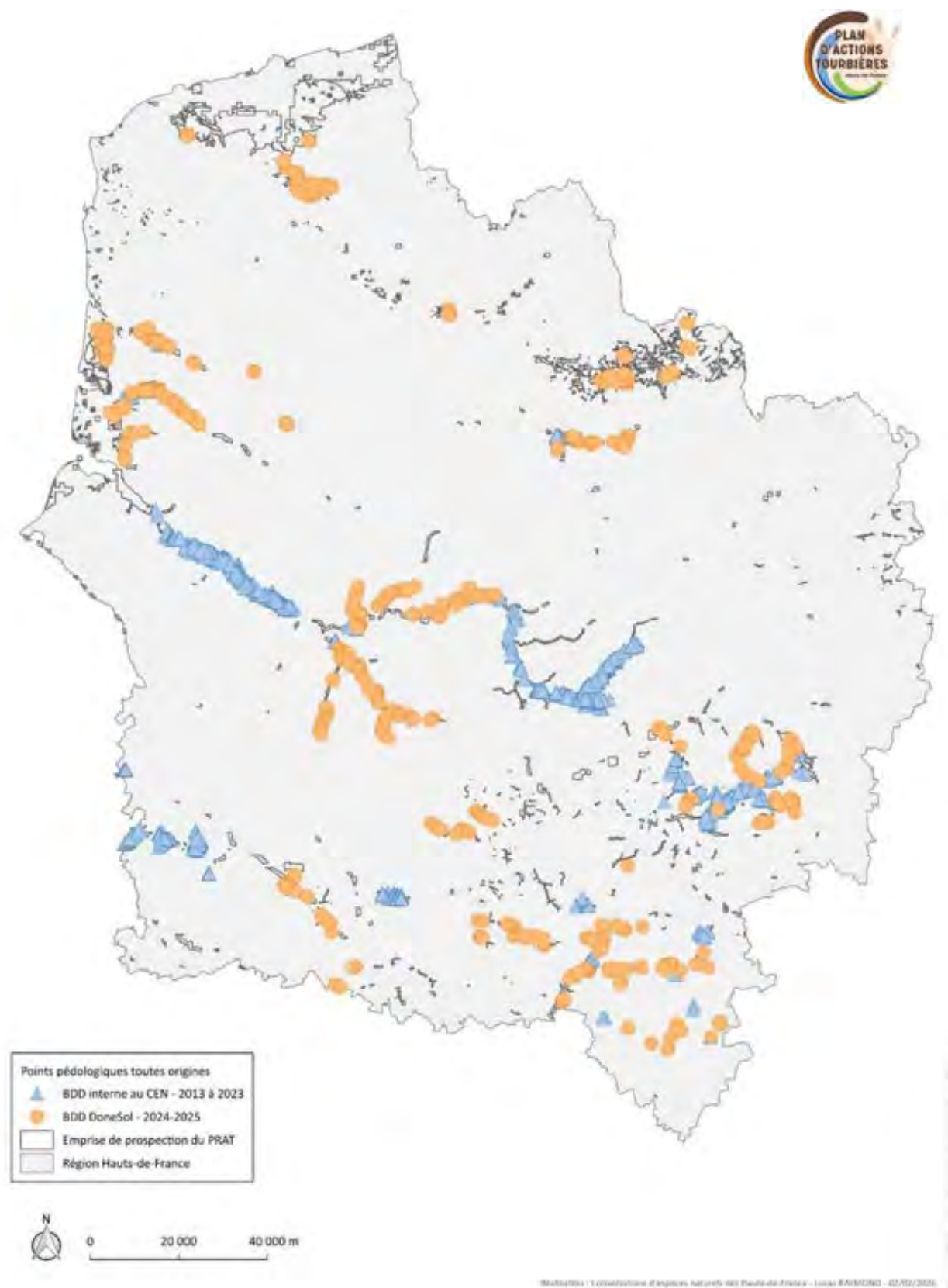
- Base de données des sondages 2013-2023 (Base A ; pré-PRAT)
- Base de données des sondages 2024-2025 (Base B ; PRAT)
- Base de données fusionnées 2013-2025 (Base C)

Les données saisies en base interne avant 2023 (données pré-PRAT **Carte 1**-triangles bleus) représentent l'ensemble des données récoltées, principalement en Picardie, dans le cadre des précédents plans d'inventaires, ou lors de la mise en place du PRAT. Les différences, notamment en termes de pression d'inventaire (plus forte pour pré-PRAT) et de précision de la données récoltées (plus faible pour pré-PRAT), ne permettent pas une fusion immédiate avec les données post 2023.¹

Les sondages réalisés à partir de fin 2023 et une partie des données récupérées auprès des partenaires (notamment dans l'Audomarois) ont pu être saisis de manière homogène dans une base de données pédologique nationale nommée DoneSol (**Carte 1**-Ronds orange). Son utilisation sera détaillée de manière plus approfondie dans le chapitre 4. Les extractions de cette base, réalisées tous les 6 mois, constituent la Base B. Ces sondages présentent un niveau d'information plus détaillé que les données disponibles dans la base de données A(pré-PRAT).

¹ Nous parlerons dans la suite de ce document de protocole et données *pré-PRAT* pour parler des données récoltées avant 2023 et enregistrées dans la base A et de protocole et de données PRAT pour les données récoltées selon la méthode PRAT à partir de 2023.

Carte 1 Répartition des sondages pédologiques réalisés en zones tourbeuses dans le cadre des inventaires tourbières (2013-2025)



Afin d'homogénéiser les informations et de limiter les erreurs, les sondages enregistrés dans les *Base A* et *B* ont été fusionnés dans une troisième base interne. Cette fusion a été réalisée autour des variables communes aux deux bases :

- Présence de tourbe
- Profondeur d'apparition de tourbe
- Epaisseur de tourbe totale

Le champ « *présence de tourbe* » correspond à un champs binaire dépendant d'une valeur non nulle dans les champs « *épaisseur* » ou « *apparition de la tourbe* » ou « *catégories déterminant* »². Ce champ binaire ('oui'/'non') permet seulement la visualisation de la répartition surfacique des enveloppes tourbeuses.

Au total, 1021 sondages issus de la *Base B* ont été combinés avec les 2782 sondages réalisés avant 2023 (*Base A*), formant un jeu de données ponctuel de 3803 sondages (*Base C*).

Un champs complémentaire « *dT_PRAT* » (**Tableau 1**) a été ajouté à la *Base C* et correspond à une traduction de l'ensemble des sondages selon les critères actuels de détermination du PRAT. Cette classification vise à apprécier la distribution verticale des horizons tourbeux dans le sondage. Les données provenant de la *Base B* ont déjà cette classification, nous utilisons donc les données métriques d'apparition et d'épaisseur de tourbe disponible dans la *Base A*, pour attribuer automatiquement les classes suivantes :

Tableau 1 Critères unifiés de classification des sondages réalisés

Classe PRAT	Critères
Non déterminant (NDT)	- Absence de tourbe - Apparition tourbe supérieur à 80 cm de profondeur
Déterminant tourbières (dT)	
dT3	- Apparition entre 40 – 80 cm de profondeur + épaisseur cumulée ≥ 40 cm + présence de dT1 et dT2 dans la même ZH
dT2	- Apparition entre 1 – 40 cm de profondeur + épaisseur cumulée ≥ 40 cm
dT1	- Apparition = Surface + horizon tourbeux de surface ≥ 10 cm
dT	- dT dans la classification 2013-2023 mais ne disposant pas d'informations suffisantes et/ou ne rentrant pas dans les catégories décrites ci-dessus (épaisseur de tourbe trop faible)

La classe 'dT4' (12 entités) est spécifique à la base B et correspond à la présence en surface des espèces de cœur turfigène (**ANNEXE 1**), mais sans l'épaisseur minimale de tourbe requise (< 10cm si en surface).

Enfin, une dernière catégorie, 'dT', a été ajoutée au champs « *dT_PRAT* » de la *Base C*. Il s'agit d'une classe charnière regroupant 725 sondages de la base A, classés comme « déterminants tourbeux » selon l'ancien protocole (pré-PRAT), mais dont les métriques d'apparition et

² Le champs « catégorie déterminant », qui spécifie si le sondage est déterminant tourbières pour la méthode d'inventaire donnée, est présent dans les deux bases (A et B), mais n'est pas considéré comme un champ commun du fait de différence entre les deux méthodes sur la qualification de sondages déterminant ou non.

d'épaisseur de tourbe ne permettent pas de les classer comme « déterminant tourbière » selon le PRAT. Ces sondages sont néanmoins conservés, car ils illustrent la présence de tourbe au sein même des zones humides inventoriées.

1.2. Avancement de la prospection des zones potentiellement tourbeuses des Hauts-de-France

Afin d'évaluer l'état d'avancement de l'inventaire des zones tourbeuses en région par rapport aux localisations issues de la précartographie, un taux de prospection par classe de potentialité a été calculé et discuté. Cette étape permet ainsi de vérifier que l'effort de prospection a bien été concentré sur les mailles à fort potentiel et d'identifier d'éventuelles lacunes d'inventaire qui nécessiteraient un inventaire complémentaire.

Le taux de prospection est calculé selon la formule :

$$\text{Taux de prospection} = \frac{\text{Nombre de mailles prospectées}}{\text{Nombre total de mailles de la catégorie}} \times 100$$

1.2.1. Avancement à l'échelle régionale

Au total, la région compte 2749 mailles à potentialité tourbeuse non nulle, parmi lesquelles 597 ont fait l'objet d'une prospection, soit un peu plus d'un cinquième (**Tableau 2**). Ce nombre de mailles monte à 676 en prenant en compte les mailles à potentialité nulle qui ont été prospectées pour affiner certaines enveloppes tourbeuses ou qui ont été identifiées à dire d'expert et non pas par la précartographie (micro-tourbières de l'Aisne).

Tableau 2 Taux de prospection par niveau de potentialité de présence de tourbe

Indicateur de potentialité tourbeuse de la maille	Nombre de mailles	Nombre de mailles prospectés	Taux de prospection (%)
Nulle	8799	79	0,90
Faible	1362	54	3,96
Moyen	1138	365	32,07
Fort	249	178	71,49
Total général	2749	676	24,59

Le taux global de prospection doit cependant être interprété à la lumière des niveaux de potentialité tourbeuse attribués aux mailles. Sur les 1140 km² de surfaces théoriquement concernées, les zones à faible potentialité représentent quasiment la moitié, soit 525 km². Elles ont volontairement été exclues des campagnes d'inventaires. Cette décision a permis de

concentrer les efforts sur les secteurs les plus favorables et donc avec les enjeux théoriquement les plus importants. Les rares sondages réalisés dans ces zones de moindre potentialité ont confirmé la pertinence de ce choix méthodologique.

71,5 % des mailles à forte potentialité ont ainsi été inventoriées. Les mailles à potentialité moyenne présentent un taux intermédiaire de prospection, avec 32 % des mailles validées par sondage. Enfin, les mailles à faible potentialité restent très peu prospectées (environ 4 %).

Parmi toutes les mailles inventoriées à l'échelle régionale, près de 30 % l'ont été au cours de la seule année 2025. La majorité de ces nouvelles données provient des campagnes de sondages de terrain, complétées par la bancarisation de données issues d'études hydro-écologiques antérieures, notamment dans les secteurs de l'Audomarois (62), de Marchienne et de Vred (59).

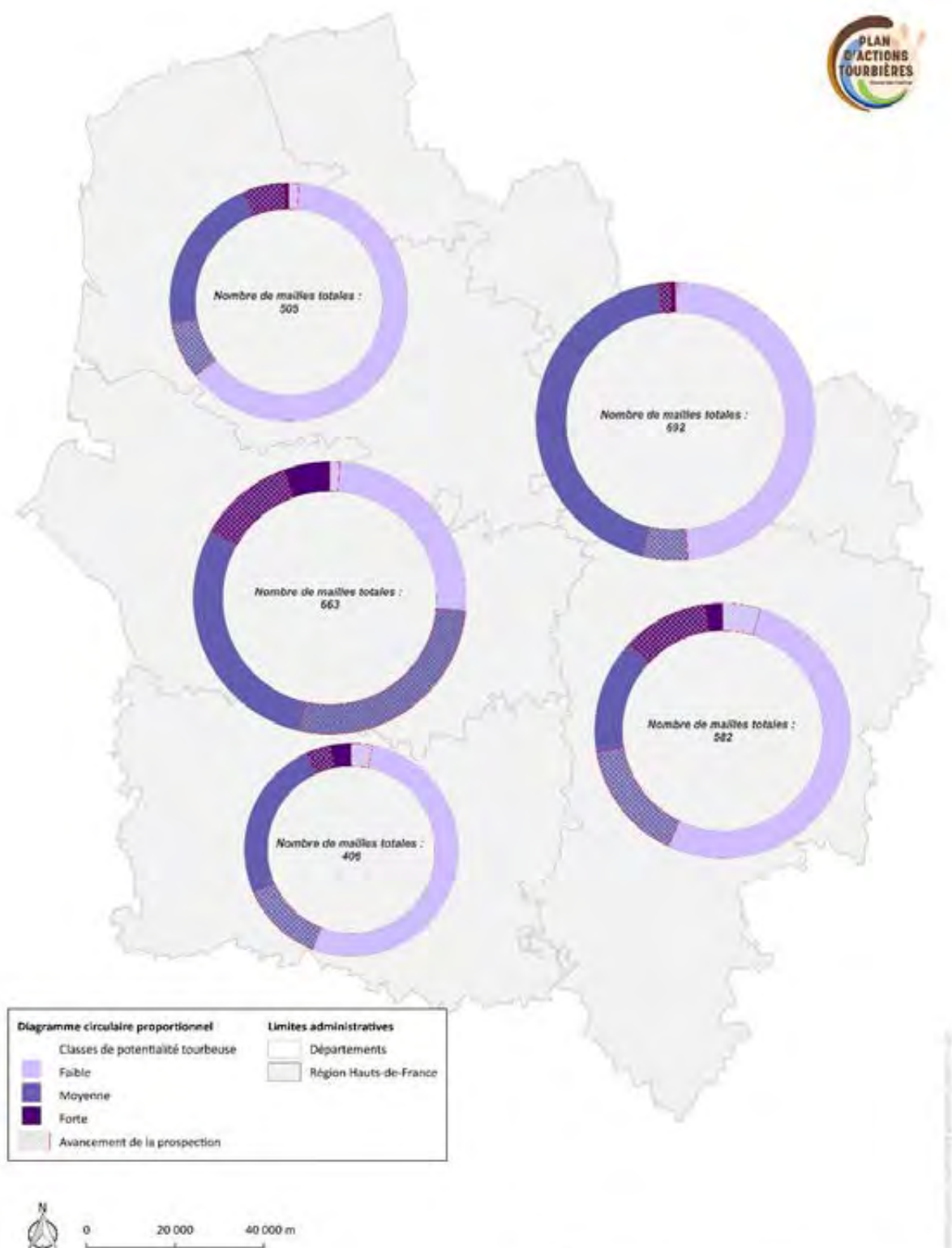
Pour comprendre ces taux de prospections, il convient de prendre une approche plus fine, à l'échelle départementale.

1.2.2. Avancement à l'échelle départementale

La carte de synthèse départementale des potentialités tourbeuses et de l'état d'avancement de la prospection (**Carte 2**) met en évidence que le nombre absolu de mailles à potentialités tourbeuses non-nulles se situe dans le même ordre de grandeur entre les départements. Le Nord et la Somme présentent le potentiel le plus élevé (environ 680 mailles) et l'Oise le potentiel le plus faible (406 mailles).

Carte 2 Synthèse départementale du niveau de prospection

La taille des diagrammes circulaires est proportionnelle au nombre de mailles par département. Les segments des diagrammes représentent les proportions de mailles par niveau de potentialité tourbeuse. Les segments hachurés indiquent l'état d'avancement de la prospection des mailles pour chaque catégorie



En revanche, les niveaux de potentialités tourbeuses diffèrent nettement selon les territoires. La Somme se distingue par une forte proportion de mailles à potentialité moyenne à forte, représentant environ 75 % des mailles à prospector pour ce département (**Carte 2**). Dans les quatre autres, ce sont plutôt les mailles à faible potentialité qui dominent.

Concernant l'état d'avancement de la prospection, la validation des mailles à fort potentiel est là aussi différente d'un département à l'autre. Alors qu'à l'échelle régionale 71 % de ce type de mailles a été validée, dans le cas de l'Oise c'est environ 54 % tandis que dans le Pas-de-Calais c'est plus de 90 % des effectifs. Pour les mailles à potentialité moyenne, la situation est encore plus contrastée : 32% à l'échelle régionale, la Somme présente un niveau d'avancement élevé de 48 %, l'Oise est à 33,8%, l'Aisne à 51,1% alors que le Nord semble en retrait avec seulement 5,8%.

Un effort plus important sur la Somme en 2025

La répartition des prospections réalisées en 2025 est hétérogène selon les départements. La Somme se distingue par un nombre élevé de nouvelles mailles inventoriées (101), contre 40 dans l'Oise, 30 dans l'Aisne, 23 dans le Nord et 16 dans le Pas-de-Calais. Cette disparité s'explique à la fois par l'extension plus importante des complexes tourbeux dans la Somme (663 mailles potentiellement tourbeuses), par une proportion plus élevée de mailles à potentialité moyenne et forte, ainsi que par un état d'avancement initial plus faible dans certaines vallées affluentes de la Somme (Avre, Noye, Ancre, Hallue) qui ont fait l'objet d'inventaires en 2025. Des facteurs logistiques ont également favorisé les prospections dans ce département, l'implantation du CEN HdF de Boves servant de base opérationnelle centrale pour cette année 2025.

Un faux retard d'inventaire dans le département du Nord

Le retard apparent de l'inventaire dans le Nord s'explique en grande partie par une sur-modélisation des potentialités sur le territoire du Parc naturel régional Scarpe-Escout (PNR-SE) dans le cadre de la précartographie. Les données de l'Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS), utilisées dans la construction de la précartographie, indiquent l'ensemble du PNR-SE comme présentant un potentiel tourbeux, auxquelles s'ajoute l'unité hydrologique issue de la BD LISA pour la vallée de la Scarpe-Escout, conférant automatiquement une potentialité moyenne aux mailles concernées. D'autres critères de construction de la précartographie, tels que la présence d'habitats caractéristiques et d'espèces floristiques préférentielles – souvent issues de données anciennes antérieures à 1990 – renforcent cette modélisation. La fonctionnalité hydrologique de surface et l'impact de siècles d'aménagements ne sont pas pris en compte dans la précartographie. Les zones tourbeuses dans le territoire du PNR-SE semblent limitées donc à des dépressions comme le site de Marchienne et Vred ou encore à des couches remaniées ou plus profondes et non atteignables par le protocole PRAT. Par exemple des

sondages du BRGM³ signalent la présence d'un horizon « tourbeux » dans la région de Pecquencourt mais dans des profondeurs supérieures à 1,2 m.

Continuités pédologiques et validation tacite

Les mailles à fort potentiels non encore inventoriées (à l'exception du département du Nord discuté ci-dessus) se situent généralement à proximité immédiate de secteurs déjà prospectés présentant des caractéristiques similaires. Elles feront l'objet de vérifications ultérieures, mais une continuité des conditions tourbeuses a été hypothésée. Une situation comparable est observée pour les mailles à potentialité moyenne bien que ce soit plus contrasté.

A l'inverse, certaines successions de mailles non tourbeuses permettent de réévaluer défavorablement certains bassins versants initialement considérés comme propices. C'est notamment le cas de la vallée du Thérain dans l'Oise, où, malgré la présence ponctuelle de lentilles tourbeuses, l'ensemble du cours demeure majoritairement non tourbeux⁴.

1.2.3. Rétrospective sur l'avancement

L'ensemble de ces résultats souligne l'efficacité d'une stratégie de prospection ciblée sur les secteurs à forte et moyenne potentialité, tout en mettant en évidence la nécessité de poursuivre les inventaires ponctuels ou opportunistes de terrain au cours des prochaines années du PRAT. Cet effort permettra de compléter la couverture régionale et de valider les dernières enveloppes à fort enjeu.

1.3. Sondages déterminants tourbeux

Au total, sur les 3803 sondages analysés, 1993 ne contiennent pas de tourbe tandis que les 1810 restant contiennent au moins un horizon tourbeux (**Carte 3**).

³ Bureau de Recherches Géologiques et Minières

⁴ Il peut, là aussi, s'agir de surmodélisation avec de la tourbe en profondeur mais qui n'est pas détectable via les sondages de 120 cm.

Carte 3 : Présence ou absence d'un horizon tourbeux au sein du sondage



Dans la plupart des cas, les sondages sans tourbe peuvent être associés aux limites de zones tourbeuses comme les hauts de pente ou encore les bordures de marais.

Une nuance est tout de même nécessaire ; la présence ou l'absence d'horizon tourbeux dans les sondages permet de dresser un rapide portrait de la répartition régionale et départementale des massifs tourbeux ; elle ne permet cependant pas d'apprécier finement les enjeux de conservation souvent liés la distribution de la tourbe dans la verticalité du sondage.

C'est pourquoi le PRAT propose une classification dépendante de la profondeur d'apparition de la tourbe et de l'épaisseur cumulée des couches tourbeuses au sein du sondage, sur une profondeur maximale de 120 cm (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). Nous estimons qu'une tourbe en surface aura des enjeux de conservation plus important, du fait des potentialités de restaurations et des espèces présentes. Les horizons tourbeux en subsurface, dont la fonctionnalité est souvent plus altérée, sont des horizons à conserver pour leur stockage de carbone, mais pour lesquels les enjeux espèces/habitats de bas marais alcalins est amoindris et leur potentialité de restauration nécessite plus de moyens.

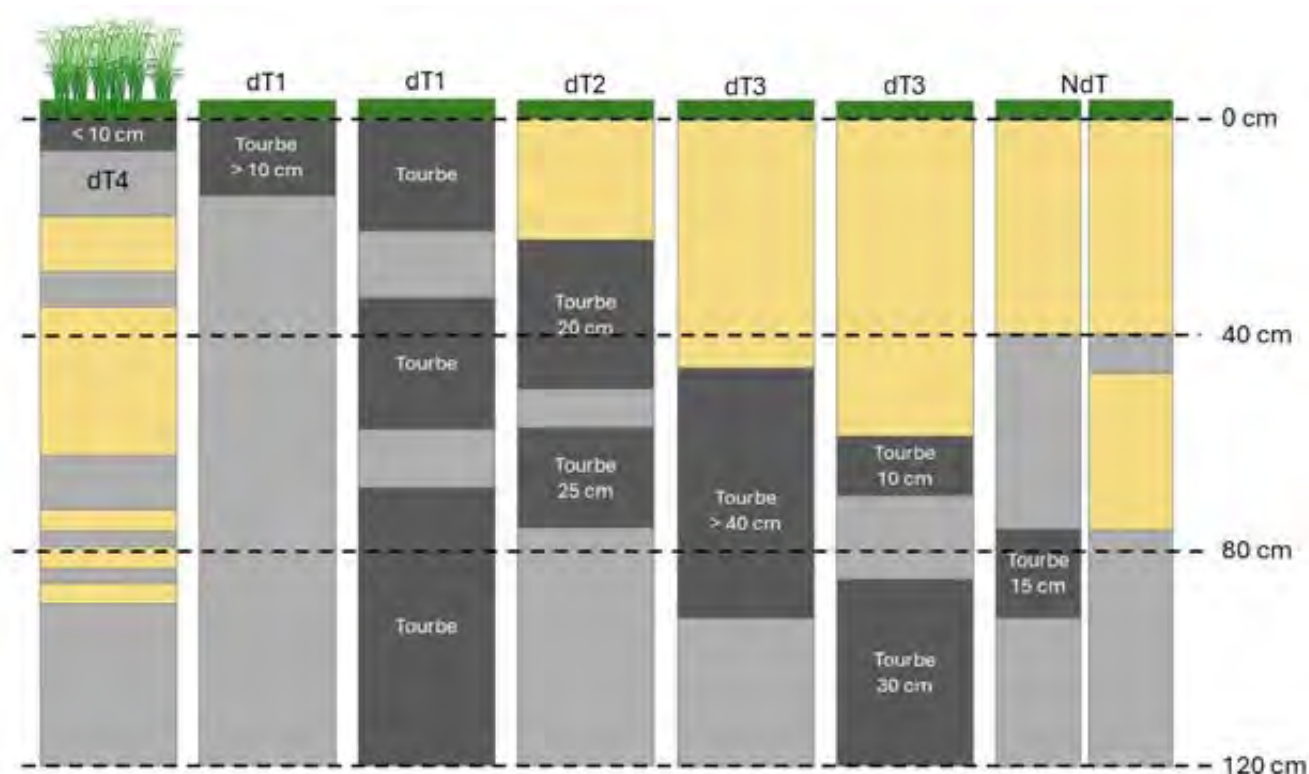


Figure 1 : Différents cas de figure pour l'attribution d'une catégorie « déterminant tourbeux » PRAT

La présence de tourbe n'est pas automatiquement synonyme de « déterminant tourbeux » par le PRAT (Erreur ! Source du renvoi introuvable.). Par exemple la présence d'horizons tourbeux en subsurface, mais dont l'épaisseur cumulée est inférieure à 40 cm sera classé en « non déterminant tourbeux (NdT) ».

Ainsi, parmi les 3823 sondages, 2098 (**Tableau 3**) sont classés « NdT » et 1 705 sont classés « dT-1-2-3-4 ».

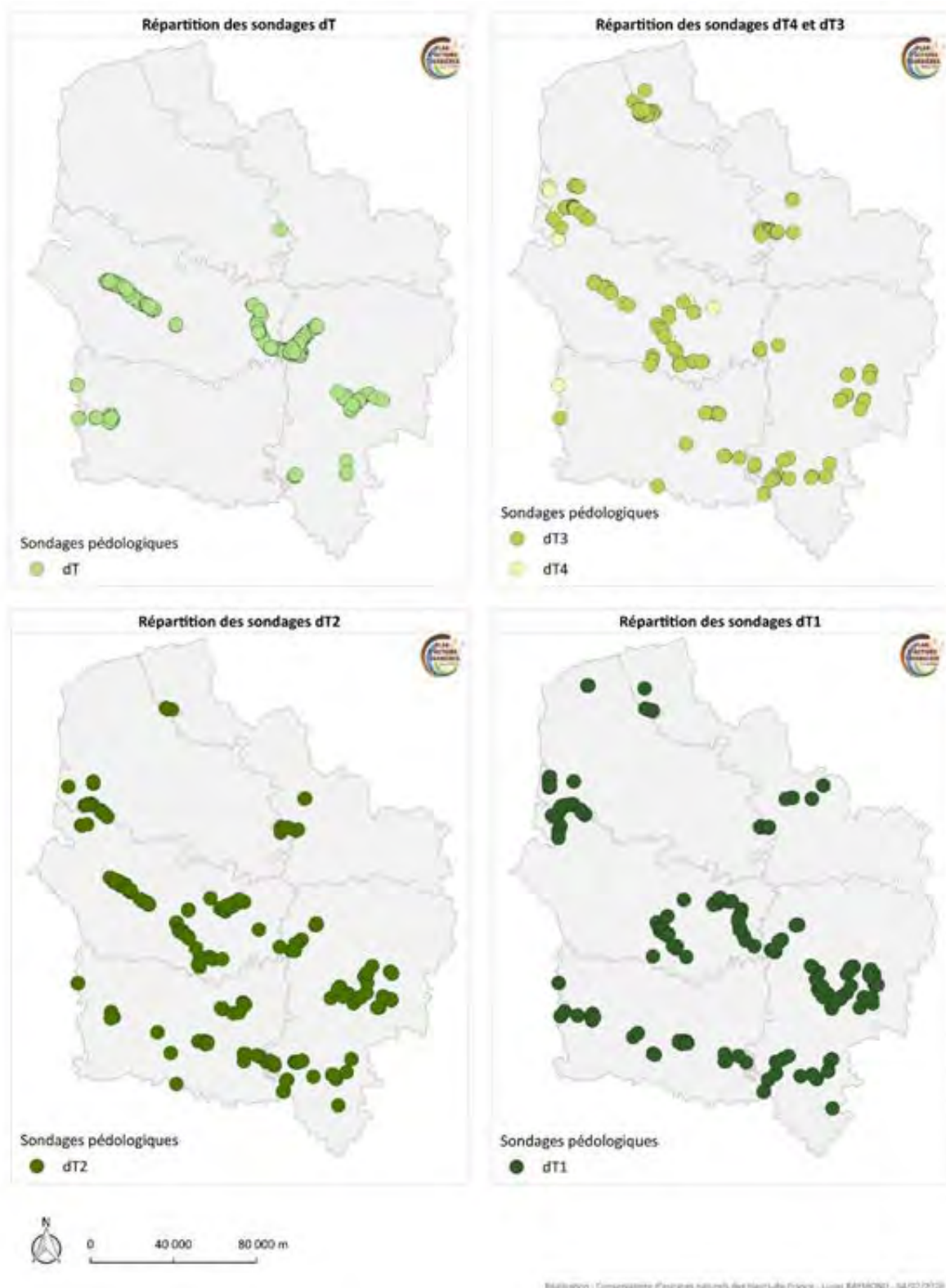
Tableau 3 Nombre de sondages affiliés aux différentes catégories PRAT

Classe PRAT	Nombre de sondages
NdT	2098
dT4	12
dT	725
dT1	443
dT2	318
dT3	207
Total	3803

Il ne semble pas y avoir de distinction claire en région en termes de profondeur d'appariation de la tourbe (**Carte 4**). Les sondages déterminants tourbeux ont une distribution plutôt homogène à cette échelle régionale. Le gradient tourbeux sera plus révélateur à l'échelle de l'enveloppe.

Les sondages dT, provenant de la base A, ne se retrouvent que dans les zones prospectées avant 2023. Aucuns sondages apparaissent en dT1 dans la basse Somme, certainement du fait des différences de protocoles et des métriques retenues qui n'ont pas permis de catégoriser les sondages dT selon les critères du PRAT.

Carte 4 Répartition des sondages en région selon leur catégorie au classement PRAT



La carte de synthèse de la distribution départementale des sondages par classes du PRAT (**Carte 5**) met en évidence une forte dichotomie entre les départements en termes de nombre de sondages réalisés et utilisés pour les analyses.

Le département du Nord ne compte que 145 sondages et le Pas-de-Calais 449. A l'inverse, la Somme et l'Aisne présentent des quantités beaucoup plus importantes, avec respectivement 1125 et 1306 sondages. L'Oise se situe dans une position intermédiaire, avec 772 relevés.

Cette variation importante n'est pas liée aux concentrations de mailles à forte ou moyenne potentialités tourbeuses (*cf. 1.2*) mais plutôt à l'origine des points. Les zones explorées entre 2013 et 2023 présentent une concentration de sondage au km² nettement supérieure à celles explorées après 2023. En se reportant à la carte de répartition des relevés et de leur origine, on constate que les sondages réalisés avant 2023 (*Base A, cf. 1.1*) concernaient majoritairement la Somme, le nord de l'Aisne et l'Ouest de l'Oise. Cela explique en grande partie la forte quantité de sondages observés dans l'Aisne et la Somme par rapport aux autres départements.

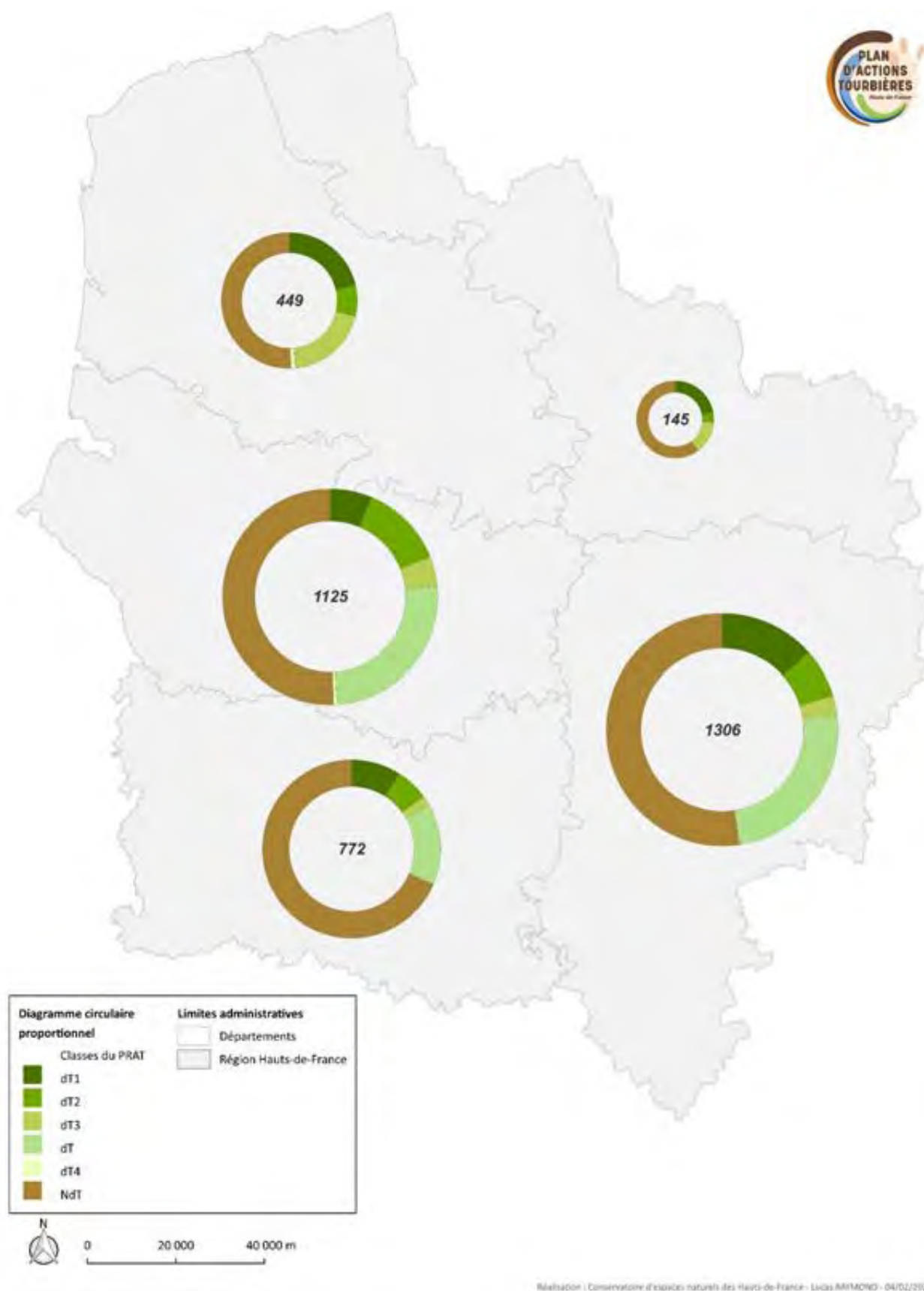
La concentration spatiale des sondages est radicalement différente entre l'ancien et le nouveau protocole. Le protocole mis en place entre 2013 et 2023 visait à une délimitation fine des enveloppes tourbeuses avec une concentration importante de sondages sur des surfaces plus limitées. Les sondages réalisés à partir de 2023 avaient, eux, plus pour objectif de confirmer des mailles identifiées par la précartographie et présentait une pression d'échantillonnage plus faible.

Pour chaque département, la proportion de sondages tourbeux représente entre 30 % et un peu moins de 50 % des sondages (**Carte 5**). Les résultats sont cependant à interpréter avec précaution.

En effet, à l'échelle du PRAT, cette différence de densité entre sondage de la *Base A* et de la *Base B* ne rend pas caduc nos analyses. La surface de tourbe reste la même. Ces analyses indiquent simplement que pour une même surface, l'effort d'échantillonnage avec les données prè-PRAT est bien plus important que la donnée ressentie. Il y a donc plus de chance de contacter au moins un horizon tourbeux avec les données antérieures à 2023.

A retenir : les sondages classés avec les critères du PRAT permettent bien de distinguer les gradients de tourbe et de délimiter les bordures des enveloppes tourbeuses dans leur horizontalité et leur verticalité. A l'échelle départementale et régionale comme présenté ci-dessus, ces observations sont moins évidentes du fait de la résolution de la donnée. L'ensemble des zones prospectées semblent renfermer tous les types de sondages.

Carte 5 Distribution départementale des classes de sondages PRAT



2. Délimitation et caractérisation des enveloppes tourbeuses en région

L'un des objectifs du Plan régional d'action est de mettre à disposition des différents acteurs du territoire une cartographie fine des enveloppes tourbeuses régionales.

La réalisation d'une cartographie fine à l'échelle régionale s'est toutefois révélée particulièrement complexe du fait notamment de l'effort d'échantillonnage très important et l'accessibilité réduite à de nombreux sites. Afin de répondre à cette contrainte, quatre documents cartographiques ont été produits.

- Le premier correspond à un état des lieux de la surface d'horizon tourbeux avec une résolution au km². Cette carte permet d'apporter des premiers éléments de réponse sur les surfaces tourbeuses, mais avec une résolution grossière surestimant les surfaces réelles. **Carte 6**
- Le deuxième document propose une « carte de chaleur », issue d'un travail d'interpolation⁵ à partir des données de sondages, qu'ils soient déterminants tourbeux ou non. Il a pour objectif de présenter les zones principales tourbeuse de la région. **Carte 7**
- Le troisième document repose sur une méthodologie similaire, mais se limite aux mailles du PRAT prospectées et précise la profondeur d'apparition de la tourbe (cf **Figure 1**). **Carte 8**
- Enfin, une quatrième carte, qualifiée de « carte de veille », a été élaborée. Présentée et détaillée au chapitre 2, elle constitue une mise à jour de la carte de potentialité initiale, retravaillée par des méthodes de machine learning à partir des sondages de terrain, avec une résolution spatiale affinée à un rayon de 25 m. **Carte 9**

Dans le présent chapitre, les résultats globaux des quatre cartes seront présentés, ainsi que la méthodologie pour l'élaboration des cartes de chaleurs. Les analyses statistiques ainsi que les protocoles de machine learning seront détaillé dans un prochain chapitre.

⁵ L'interpolation en cartographie est une méthode d'estimation spatiale qui permet de déterminer la valeur d'une variable en des points non échantillonnés à partir d'un ensemble de données ponctuelles connues. Elle repose sur le principe d'autocorrélation spatiale, selon lequel des points proches dans l'espace ont tendance à présenter des valeurs similaires.

2.1. Extrapolation grossière des surfaces tourbeuses de la région Hauts de France

L'estimation précise des surfaces à partir des données disponibles reste complexe, car celles-ci reposent sur des mailles de potentialité d'un km² et sur des sondages dont le diamètre est inférieur à cinq centimètres. Les surfaces proposées qui vont suivre sont donc en partie extrapolées. Elles reposent sur la résolution au km² des mailles et sur la robustesse à posteriori du modèle que nous avons utilisé pour réaliser la prospection⁶.

L'examen de la surface de toutes les mailles validées à ce jour par au moins un sondage déterminant tourbeux, mène à une estimation de 199,5 km² de surfaces tourbeuses en région (surface verte, **Carte 6**). Soit 7,4 % de la surface des Zones à Dominante Humide (ZDH) de la région.

Actuellement, grâce aux 3803 sondages analysés et comparés aux niveaux de potentialités tourbeuses des mailles, la précision de détection de la carte de potentialité est de 86 % pour les mailles à fort potentiel. Autrement dit, sur les 178 mailles à forte potentialité prospectées, 86 % d'entre elles se sont bien révélées tourbeuses avec la présence d'au moins 1 sondage déterminant tourbeux d'après les critères du PRAT. Cette précision diminue à 64 % pour les mailles à potentialité moyenne.

Si un rendement similaire était appliqué pour les mailles à potentialités moyenne et forte qui n'ont pas encore pu être confirmées par des données de terrain, la surface totale de zones tourbeuses monterait à 426 km² soit 15,7 % des ZDH des Hauts-de-France.

Ces 426 km² avancés permettent d'avoir un ordre d'idée de la superficie concernée par la présence de tourbe. Cette donnée va inévitablement évoluer avec les prospections à venir et l'affinement de certains paramètres. Aussi, à l'échelle du km², l'ensemble de la surface de la maille identifiée comme réellement tourbeuse est probablement bien plus limitée. De plus, l'extrapolation se base sur la précision d'un modèle qui a été vérifié par des sondages. Or, l'effort d'échantillonnage n'est pas homogène sur la région et a été fortement orienté dans des zones propices, augmentant artificiellement le taux de sondage déterminant tourbière.

Néanmoins, bien que la superficie réelle soit peut-être à revoir à la baisse, la région Hauts-de-France apparaît aujourd'hui comme une région à enjeux nationaux sur les stocks de tourbe. De plus, nous rappelons que le PRAT se concentre sur les 120 premier centimètres de sol. Des sondages profonds révèlent des surfaces de tourbe encore plus importante mais que nous ne pouvons traiter dans ce rapport.

Les cartes 7-8 et 9 visent à affiner ce travail de terrain en proposant, sur la base d'un travail cartographique d'interpolation et de machine learning, une cartographie des zones tourbeuses avec une résolution beaucoup plus fine.

⁶ Chapitre 2, partie 3. Evaluation des performances prédictives du modèle PRAT

Carte 6 : Localisation des zones tourbeuses avérées par un sondage en région (Résolution 1km²)



2.2. Elaboration des « cartes de chaleur » de la tourbe en Hauts-de-France

2.2.1. Méthode

L'interpolation IDW (outil natif de QGIS) permet, à partir d'une couche vectorielle (notre couche de point), de calculer un raster (une sorte de photo) où chaque pixel représente une valeur moyenne pondérée des points environnants (**Figure 2**). La méthode utilisée dans ce rapport ne tient pas compte de la réalité géomorphologique : tous les points interagissent entre eux, avec un poids décroissant en fonction de la distance.

L'interpolation dépend donc à la fois de la valeur numérique associée à chaque point et de la distance séparant le pixel de ce point. Ainsi, plus on s'éloigne d'un point, plus son influence diminue au profit d'un point plus proche (**Figure 2**). Cependant, cette influence n'est jamais nulle : par exemple, un sondage réalisé dans la vallée de l'Authie conservera une certaine influence, même sur un sondage effectué dans les marais de la Souche.

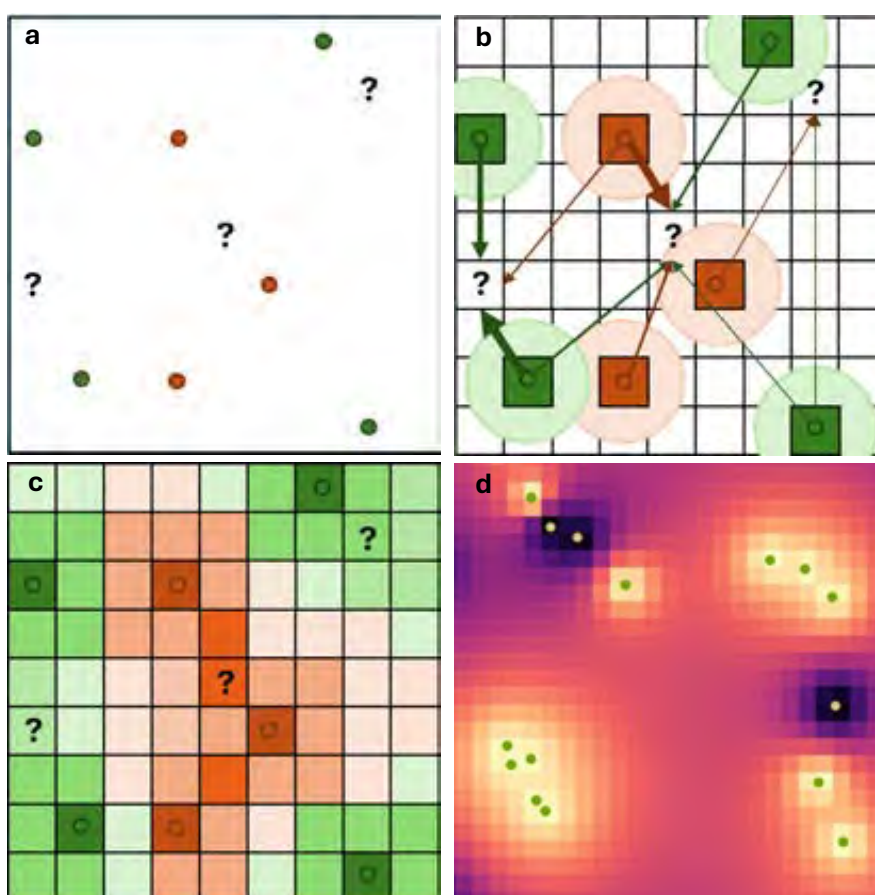


Figure 2 : schéma conceptuelle de l'interpolation IDW (a, b, c) ; exemple de résultats (d)

- a. Des points aux valeurs connues
- b. Interaction inversement proportionnelle à la distance entre deux points
- c. Chaque pixel se voit une valeur interpolée issue de tous les points et de la distance à ces derniers

Résolution des rasters de sortie

La résolution des rasters en sortie a été fixée à 100 mètres par pixel. Un sondage représente donc une zone homogène d'un diamètre de 100 mètres. Ce choix permet d'obtenir un compromis optimal :

- Un temps de calcul réduit
- Une résolution suffisamment fine pour des analyses à l'échelle du site
- Une résolution suffisamment fine pour supposer une pertinence du lien entre la donnée terrain et l'extrapolation qui en est faite

Numérisation des catégories PRAT

Les outils statistiques et de cartographies ne permettent pas l'analyse de données textuelles. Ainsi, les catégories du PRAT tel que 'NdT' ou encore 'dT1' sont inopérantes. Une transcription de la donnée textuelle en donnée numérique est donc nécessaire. Cette donnée numérique agit ici comme une catégorie, il n'y a pas de pondération, de priorité, donnée à une valeur numérique plutôt qu'à une autre

Des champs numériques, analogues des champs catégoriels, sont créés et permettent d'utiliser ces variables dans les différents outils QGIS et R (**Tableau 4a et 4b**).

Tableau 4 : Transformation des données en champs numériques

a. Champ binaire		b. Champ multimodale des catégories PRAT	
		Catégorie PRAT	Numérique
Déterminant tourbière	Numérique	NdT	0
non	0	dT4	1
oui	1	dT	2
		dT3	3
		dT2	4
		dT1	5

Création de sondages non tourbeux artificiels à dire d'expert

Pour contrôler les interactions entre sondages, nous utilisons un jeu de données incluant un maillage de points artificiels, espacés de 2 km et déployés sur l'ensemble de la région Hauts-de-France (**Figure 3**). Ces points artificiels ne sont pas appliqués dans les zones d'études, les mailles du PRAT⁷. Les mailles d'un km² prospectées par au moins un sondage contiennent donc que des points issus des campagnes de prospections pédologiques. Les points artificiels placés en dehors vont agir de leur côté comme des barrières neutres, limitant l'influence des sondages réels aux zones où leur représentativité est avérée.



Figure 3 : représentation du maillage de points artificiels couplé aux données de terrain

L'objectif initial étant d'indiquer artificiellement des sondages non tourbeux en dehors de toutes les zones humides de la région. Ces sondages sont codés 'non' et '0' (**Tableau 4a**) dans le cadre des sondages en catégorie binaire. Ils sont codés 'NdT' et '0' (**Tableau 4b**) dans le cadre de la classification PRAT.

Finalement, ce sont deux jeux de données qui sont utilisés pour ces différents outils et représentation cartographique :

1. Le jeu de données corrigé de 3803 sondages
2. Le jeu de données corrigé fusionné avec le maillage de sondages artificiels

Ces jeux de données sont utilisés dans le cadre des interpolations IDW.

⁷ Nous n'avons pas utilisé de lignes de ruptures dans cette interpolation. Ces points artificiels sont une solution alternative

2.2.2. Interpolation IDW selon la présence/absence de tourbe

La première interpolation réalisée s'appuie sur l'information binaire de présence ou absence de tourbe dans les sondages. De grands massifs tourbeux apparaissent bien distinctement et cela dans tous les départements. Les sondages déterminants tourbeux sont représentés en claire, les sondages non déterminants tourbeux en noir (**Carte 7**). Un gradient de couleur relie ensuite les zones tourbeuses aux non tourbeuses.

Le gradient d'interaction entre les sondages, bien que restreint, a tout de même tendance à déborder sur les plateaux calcaires surplombant les vallées tourbeuses. En effet, l'interpolation ne prend pas en compte la réalité morphologique du terrain. Cette carte doit donc être utilisée pour avoir, à une échelle régionale ou départementale, la répartition des enveloppes tourbeuses semblant continues et obtenir rapidement des massifs tourbeux distincts. Il faudra ensuite bien limiter aux bordures des zones humides si l'objectif final est d'utiliser l'interpolation à l'échelle d'un site. Aussi, il faut noter que les zones prospectées non-tourbeuses se confondent avec les zones notées arbitrairement non-tourbeuses. Enfin, la carte est dépendante des sondages numérisés à notre disposition, elle n'est en aucun cas prédictive. Elle n'indique donc pas, par exemple, les marais tourbeux de la RNN de Vesles-Et-Caumont ou encore quelques parties de la Somme où nous n'avons pas encore de sondage de réalisées alors que ces zones sont connues comme tourbeuses.

Remarque : Cette première interpolation de présence et d'absence de tourbe a pour but de représenter à grande échelles les sondages tourbeux et les massifs paraissant géographiquement homogènes. Elle sert de base à l'établissement des enveloppes tourbeuses proposée ci-après et plus en détail dans le chapitre 4. Elle n'a pas nécessairement vocation à être utilisée à l'échelle des sites.

Carte 7 Localisation des enveloppes de tourbe en région Hauts-de-France



• Principales enveloppes tourbeuses

Somme

La vallée de la Somme est sans doute le massif tourbeux le plus conséquent de la région auquel se rajoute un de ses affluents majeur, l'Avre. On retrouve également les marais arrière littoraux picards sur des communes telles que Quend, Romaine ou Ponthoile.

Les autres affluents de la Somme comme l'Hallue, l'Ancre et la Noye ne semblent eux pas présenter d'enjeux tourbeux majeurs en surface.

Oise

Les inventaires ont pu révéler la présence de stocks de tourbe importants en vallée de l'Automne qui vient compléter les données déjà récoltées sur le marais de Sacy. En complément, les vallées de l'Aronde et du Matz semblent également présenter des enveloppes tourbeuses relativement importantes au vu de la taille du cours d'eau. Quelques poches tourbeuses ont pu être également mises en évidence.

Pas de Calais

La localisation des enveloppes tourbeuses en vallée de l'Authie concerne principalement sa partie aval avec une distribution de la tourbe plus disparate que dans la Somme. La Canche, bien que présentant quelques poches de tourbe, reste principalement non tourbeuse (dans la limite des inventaires PRAT). Les marais de Balançon complètent la donnée existante dans l'Authie et la Canche. La bancarisation des études de l'Audomarois et de Guines a permis l'intégration de deux enveloppes majeures du département.

Nord

La vallée de la Sensée présente des enjeux tourbes important même si d'un point de vue fonctionnalités la vallée a été fortement impactée par l'aménagement du territoire. Des poches de tourbes localisées, comme les tourbières de Marchiennes et de Vred, subsistent également dans la partie ouest du Parc Naturel Scarpe Escaut et en font des sites tourbeux majeures du Nord.

Aisne

Des enveloppes sont réparties un peu partout dans le département de l'Aisne avec certaines enveloppes majeures comme la Haute Vallée de la Somme, les marais de la Souche, le ru des Barentons, les marais de Bièvre, la vallée de l'Ardon et la vallée de l'Ourcq. Le département de l'Aisne a également la particularité d'abriter un certain nombre de tourbières acides, micro-tourbières et tourbières de pente souvent plus complexes à localiser et à identifier par la prélocalisation du fait de leur faible superficie.

Cette carte de chaleur nous permet donc de représenter synthétiquement les grands massifs tourbeux de notre région, mais ne se suffit pas à elle seule pour réaliser une cartographie fine des surfaces tourbeuses, d'autant plus que nous ne pouvons pas apprécier la verticalité des horizons tourbeux.

C'est pourquoi une seconde interpolation, orientée sur les sondages et leur classification PRAT est présentée.

2.2.3. Interpolation IDW selon la classification PRAT

L'objectif de cette deuxième interpolation (**Carte 8**) est d'estimer la répartition verticale de la tourbe dans le premier mètre de profondeur, en s'appuyant sur la classification PRAT. Afin de maximiser la fiabilité des résultats, une partie du raster final est masqué : seules les zones validées par au moins un sondage réel sont conservées⁸.

L'interpolation IDW ne représentant pas une véritable cartographie de potentialité mais seulement une répartition spatiale des sondages et de leur influence surfacique, nous avons choisi de nous limiter aux mailles d'un km² contenant au moins un sondage réel. Cette approche conservatrice permet d'éviter une extrapolation excessive, mais réduit la couverture spatiale des résultats.

Plus précise, cette seconde interpolation nous permet de constater que les affluents de la Somme précédemment cités, comme l'Hallue, sont non déterminants tourbeux. Quelques sondages sont classés comme dT3 et laissent paraître un halo vert clair, témoins tout de même de quelques horizons tourbeux mais apparaissant minimum sous 40 cm de sol.

Les massifs tourbeux qui apparaissait bien distinctement sur la précédente carte ne dégagent pas automatiquement la même importance avec cette catégorisation. L'Audomarois s'avère en réalité avoir plutôt de la tourbe en subsurface, de même pour la Sensée, la basse Somme ou encore la Somme en amont de St-Quentin.

D'autres sites, comme les marais de la Souche, Sacy, Balançons ou certaines parties de l'Avre et de la Somme ont de la tourbe en surface et se démarquent tout aussi bien sur la carte 7 et la carte 8.

Dans l'ensemble nous avons donc plutôt des massifs tourbeux apparaissant sous la surface (entre 0 et 40 cm de profondeur), avec quelques enveloppes mieux conservées où de la tourbe est présente en surface.

⁸ Nous utilisons les mailles prospectées comme un pochoir pour ne garder que l'interpolation présentent dans les mailles validées.

Carte 8 Répartition verticale de la tourbe en région sur le premier mètre de profondeur



2.3. Carte de veille

2.3.1. Concept

L'objectif de cette carte de veille est d'être complémentaire à la carte de potentialité créé en 2020 (**ANNEXE 2**) mais avec une résolution bien plus fine, de 25m/px soit 625m², permise par l'inclusion des nombreux sondages réalisés dans le cadre du PRAT et un travail de machine learning. Il est cependant important de comprendre que cette carte de veille ne représente pas forcément la présence avérée de tourbe mais bien une potentialité renforcée et appuyée par la connaissance du terrain produite par le PRAT et les partenaires en région.

Un modèle statistique (de type Random Forest) a été utilisé dans l'objectif de prédire la présence potentielle de tourbe à partir de différentes variables environnementales sous forme de rasters (géologie, indice d'humidité, habitats, rugosité, texture, etc.)

Chaque pixel de ces rasters correspond à une zone du territoire pour laquelle le modèle dispose de valeurs numériques décrivant les conditions du milieu (*Figure 4*). A partir des points indiquant si le sondage est déterminant tourbeux ou non, le modèle « apprend » à reconnaître les combinaisons de valeurs caractéristiques des zones tourbeuses et non tourbeuses.

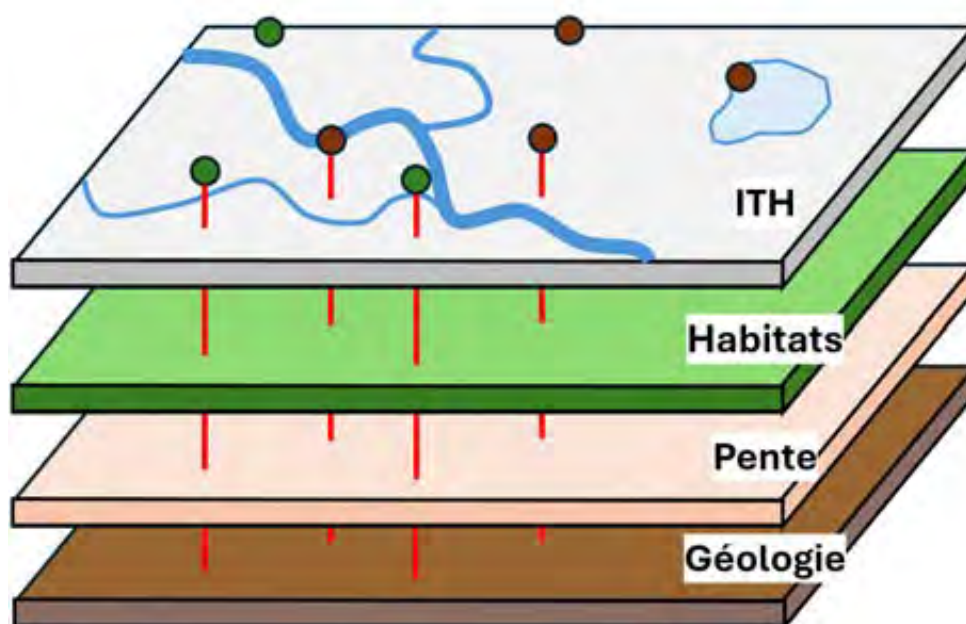


Figure 4 : Schéma conceptuel des variables environnementales utilisées en machine learning pour caractériser les sondages et autotClassifier à l'échelle régionale

Une fois entraîné, le modèle est appliqué à l'ensemble du territoire afin de produire une carte continue de probabilité de présence de tourbe, avec une résolution identique à celle des rasters d'entrée, soit dans notre cas, une résolution à 25 m.

NB : Cette partie n'a pas pour objectif de détailler la démarche de création de la carte, qui est présentée en détail dans le chapitre 2, mais uniquement de mettre en avant un résultat cartographique complémentaire à prendre en compte dans l'analyse de la localisation des enveloppes de tourbe.

2.3.2. Evaluation

Pour évaluer les performances du modèle, plusieurs sous-échantillons de points ont été utilisés afin de tester sa capacité à prédire correctement la présence ou l'absence de tourbe répondant aux critères du PRAT.

Trois indicateurs ont été utilisés pour mesurer la performance du modèle :

- **La sensibilité**, qui mesure la capacité du modèle à détecter les zones tourbeuses, c'est-à-dire le nombre de zones tourbeuses qui avaient été identifiées comme favorables
- **La précision**, qui indique la proportion de zones prédites comme tourbeuses qui le sont effectivement.
- **La fidélité (accuracy)**, qui représente la proportion globale de prédictions correctes, c'est-à-dire le nombre de mailles prédites non tourbeuses qui se sont avérées non tourbeuses ainsi que le nombre de mailles prédites tourbeuses qui se sont avérées tourbeuses.

La sensibilité et la précision sont particulièrement importantes dans ce contexte, car l'objectif est à la fois de ne pas manquer les zones tourbeuses existantes et d'éviter de classer à tort des zones non tourbeuses comme tourbeuses.

2.3.3. Production de la carte finale

Chaque pixel de couleur est un pixel classé comme potentiellement tourbeux d'après le modèle (**Carte 9**). Nous obtenons, avec la combinaison de quatre rasters (cf chapitre 2) une sensibilité moyenne à la classe tourbe de 61 % et une précision moyenne à la classe tourbe de 64 %. La classification des pixels n'est donc pas dû au hasard mais reste encore fragile. Autrement dit, le modèle détecte correctement 3 pixels tourbeux sur 5 (sensibilité) et lorsqu'il indique un pixel comme tourbeux il a raison 3 fois sur 5 (précision).

Afin de limiter la présence de faux positif, c'est-à-dire des pixels classés comme tourbeux alors qu'ils ne le sont pas, le choix a été fait de présenter la carte de confiance locale. Tous les pixels de couleurs sont tourbeux (il n'y a pas de différence à ce niveau, absolument tous les pixels représenter avec une couleur ont été classés comme tourbeux d'après le modèle). Cependant, le gradient de couleur mauve renseigne sur la robustesse locale de cette classification. Ainsi, un pixel de couleur bleu, aura une probabilité locale tourbeuse inférieure à un pixel de couleur

mauve foncé. Nous gardons donc une approche similaire à la précartographie où nous avons des mailles avec des niveaux de potentialité tourbeuse plus ou moins fort en fonction de la présence ou l'absence de certains critères.

Il en ressort alors que l'ensemble de la Somme, ainsi que quelque marais comme Sacy et la Souche sont classés comme tourbeux avec une assurance locale forte. La vallée du Thérain est quant à elle pratiquement invisibilisée.

Le modèle a néanmoins ses limites, le cas notamment des affluents de la Somme comme l'Hallue et l'Ancre qui sont classés comme tourbeux, avec une robustesse locale de tourbe probable, alors que les sondages démentent cette représentation.

C'est pourquoi nous considérons cette carte comme une carte de vigilance, le modèle a encore du mal à faire la distinction au sein des zones humides entre une zone réellement tourbeuse et une zone humide partageant une situation hydrologique similaire. Cependant, avec une résolution de 25 m au sol, cette carte est 40 fois plus précise en termes de résolution par rapport à la carte de prélocalisation initiale. De plus, elle prend en compte des réalités géomorphologiques que la précartographie n'utilisait pas. Les dépressions ou replats influencent donc ici la classification. La carte de veille nous permettra donc d'affiner les prospections.

Carte 9 Potentialité locale de la présence de tourbe en région Hauts-de-France par apprentissage automatique



Conclusion intermédiaire

Ce premier chapitre a eu pour objectif de poser les bases méthodologiques et analytiques nécessaires à la compréhension de la répartition des milieux tourbeux en région Hauts-de-France. Il s'appuie sur un important travail de bancarisation, d'harmonisation et d'exploitation de données pédologiques issues de plus de dix années de prospection de terrain. L'agrégation des 3 803 sondages pédologiques constitue aujourd'hui un socle de données robuste et représentatif à l'échelle régionale. La standardisation des variables clés – présence de tourbe, profondeur d'apparition, épaisseur cumulée et classification PRAT – ont permis d'obtenir une lecture homogène et exploitable de l'ensemble des relevés, tout en tenant compte de la verticalité des horizons tourbeux.

L'exploitation des sondages pédologiques confirme l'extension importante des complexes tourbeux régionaux, principalement structurés le long des grandes vallées fluviales et dans plusieurs marais emblématiques. Elle donne ainsi une bonne image de l'enjeu national que représentent les Hauts-de-France en termes de préservation des stocks de tourbe.

Toutefois, la simple distinction présence/absence de tourbe montre rapidement ses limites pour appréhender les enjeux de conservation et ou de restauration. La classification PRAT apporte à ce titre une information essentielle en distinguant les tourbes de surface fonctionnelles ou potentiellement restaurables, des horizons tourbeux enfouis présentant moins d'enjeux habitats mais qui conservent toutefois un rôle majeur dans le stockage du carbone et régulation hydrologique de par l'épaisseur minimale de 40 cm nécessaire pour être classé déterminant tourbière.

D'un point de vue méthodologique, l'analyse de l'avancement de la prospection à l'échelle des mailles de potentialité met en évidence l'efficacité d'une stratégie ciblée priorisant les secteurs à forte et moyenne probabilité de présence de tourbe. Des 178 mailles à forte potentialité tourbeuse prospectée, 86 % ont été validées par des sondages déterminants tourbeux, confirmant la pertinence globale de la précartographie initiale. Néanmoins, certaines disparités départementales soulignent les limites de la modélisation initiale, notamment dans des secteurs fortement anthropisés comme le Parc naturel régional Scarpe-Escaut où une sur-modélisation des potentialités apparaît liée à l'utilisation de données anciennes et à l'absence de prise en compte de la fonctionnalité hydrologique de surface.

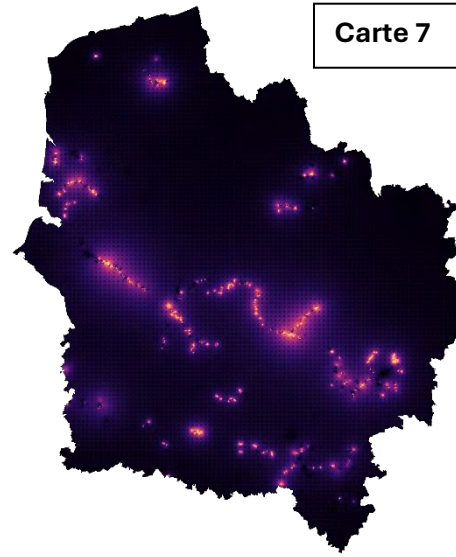
Enfin, ce chapitre a permis d'introduire les différentes productions cartographiques mobilisées pour représenter les enveloppes tourbeuses régionales, depuis les surfaces extrapolées à l'échelle kilométrique jusqu'aux cartes de chaleur issues d'interpolations spatiales et à la carte de veille à haute résolution fondée sur le machine learning et présentant une résolution de l'ordre de 25 m/px.

Ces éléments constituent le socle indispensable aux analyses cartographiques et statistiques plus avancées développées dans le chapitre suivant et ouvrent des perspectives concrètes pour orienter les politiques publiques, la gestion et la conservation des milieux tourbeux en Hauts-de-France.

Synthèse des productions cartographiques



Carte 6



Carte 7



Carte 8

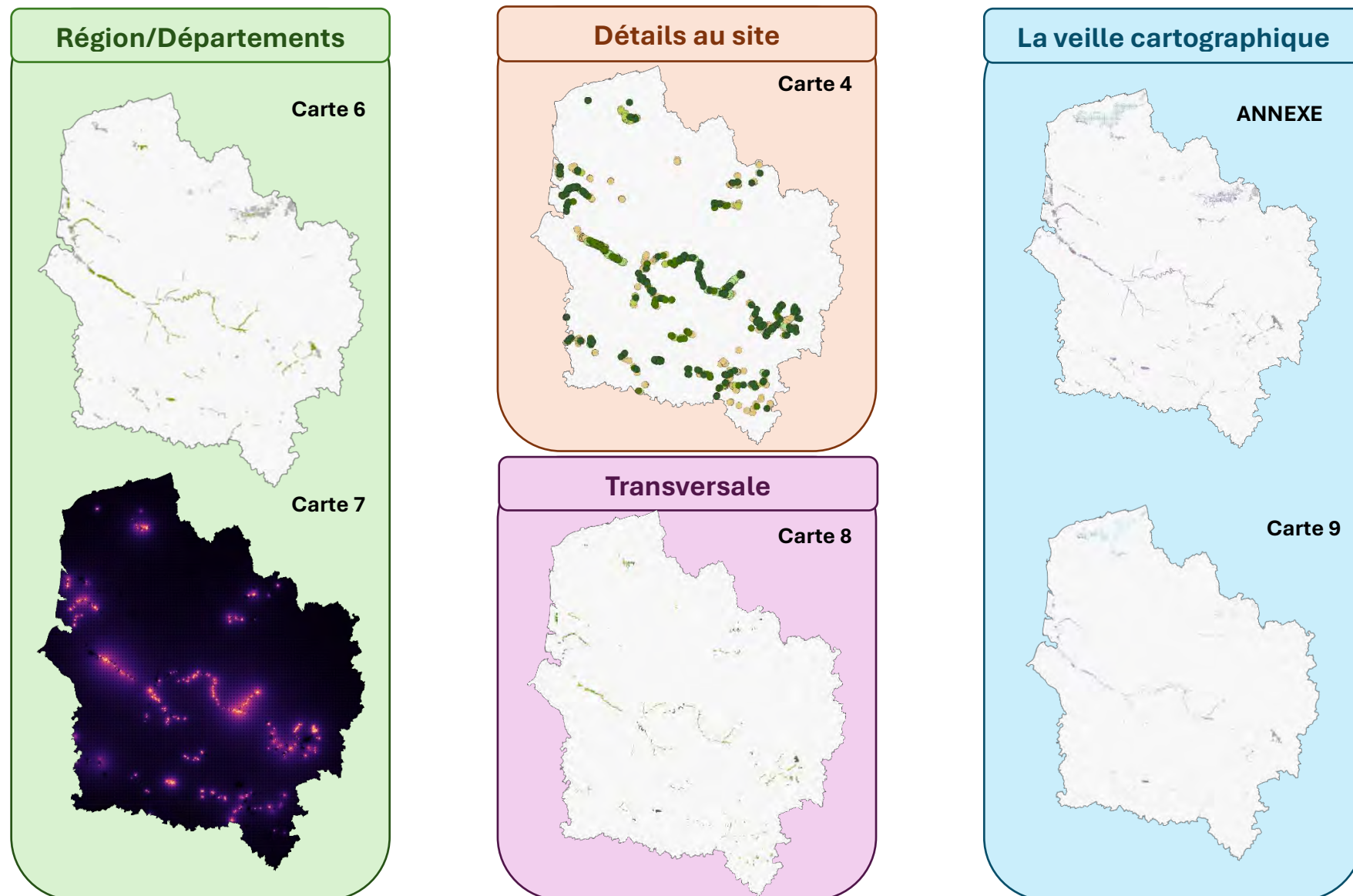
Une information binaire

Une information multimodale

Une résolution de 1 km/px

Une résolution de 100 m/px

Choix et utilisations des supports cartographiques



Chapitre 2 : Analyse des résultats de pré-cartographie et optimisation de la carte de veille régionale

Ce chapitre vise à détailler les méthodes d'analyses appliquées sur les 3 803 sondages afin, dans un premier temps, d'évaluer à posteriori la robustesse du modèle de précartographie et, dans un second temps, de présenter en détails toute la méthodologie de création de la carte de vigilance par machine learning. Avec maintenant plusieurs milliers de sondages à notre disposition nous pouvons déterminer à posteriori la robustesse du modèle proposé en croisant les milliers de sondages disponibles avec les mailles de potentialité et ainsi vérifier si les mailles proposées dans la précartographie se sont bien révélées tourbeuses ou si les horizons tourbeux se retrouvent aléatoirement dans les zones d'études proposées par le plan.

1. Contexte et évolution de la stratégie d'inventaire

Depuis la parution du Plan Régional d'Action en faveur des Tourbières (PRAT) en 2022, la prospection des surfaces tourbeuses en Hauts-de-France est orientée à partir d'un modèle de potentialité. L'objectif était alors d'optimiser l'utilisation des ressources allouées au PRAT tout en déterminant les principales enveloppes tourbeuses de la région.

La réalisation de ces sondages s'étale cependant sur pratiquement 15 ans de prospections avant même l'existence de la précartographie et avec certaines évolutions notamment dans la méthode et l'effort d'inventaire sur le terrain. De ce fait, des différences selon l'origine des sondages pourraient engendrer des biais dans l'analyse et la validation du modèle de précartographie.

Une première étape consiste donc à déterminer si la quantité de points pédologiques par maille est influencée par l'origine des sondages. Autrement dit, nous cherchons à évaluer l'existence d'un biais liés à l'effort d'échantillonnage entre les deux bases de données mobilisées (Base A et Base B).

Une analyse exploratoire a permis de mettre en évidence une différence significative de densité de sondages par maille entre la base A (moyenne : 8,05 sondages) et la base B (moyenne : 2,77 sondages). Ce biais d'effort d'échantillonnage, indépendant de la surface des mailles, est confirmé par un test de Wilcoxon ($p < 0,05$) et un modèle linéaire généralisé à loi binomiale négative (**ANNEXE 3**).

A l'échelle individuelle de la maille, cette hétérogénéité peut influencer la détection locale de la tourbe. A l'échelle régionale cependant, avec 676 mailles prospectées et avec plusieurs milliers de sondages, la loi des grands nombres atténue cet effet, garantissant la robustesse statistique des relations globales entre potentialité tourbeuse et résultats de prospection.

En somme, l'ancienne base contient nettement plus de sondages par mailles que la nouvelle (environ 3 fois plus à surface égale), ce qui peut faire varier les résultats de détection de tourbe pour chacune des mailles prises individuellement. Cependant, avec 676 zones prospectées, le grand nombre de données lisse ces irrégularités, rendant les tendances globales fiables. Les ordres de grandeurs sont donc justes, nous devons seulement être prudent sur les chiffres absolus de validation par maille, sans que cela n'affecte les analyses globales.

2. Relation entre potentialité tourbeuse et sondage déterminant tourbeux

2.1. Potentialité tourbeuse et présence effective de tourbe

2.1.1. Méthode

Cette relation a rapidement été abordé dans le chapitre un afin d'aider à l'évaluation des surfaces tourbeuses à l'échelle kilométrique des mailles (cf *Chapitre 1 partie 2.1*).

Si nous notons :

- T = la maille contient au moins un sondage déterminant tourbe
- P_{nulle} , P_{faible} , P_{moyen} , P_{fort} = le niveau de potentialité de la maille

Alors les probabilités conditionnelles sont :

$$P(T | P_{fort}) ; P(T | P_{moyen}) ; P(T | P_{faible}) ; P(T | P_{nulle})$$

Ces conditions sont vérifiées par le calcul suivant (exemple avec potentialité moyenne de tourbe) :

$$P(T | P_{moyen}) = \frac{\text{Nombre de mailles à potentiel moyen validées tourbeuses}}{\text{Nombre total de mailles à potentiel moyen prospectées}}$$

Les résultats sont compris entre $[0, 1]$. Plus la valeur est proche de 1, plus la probabilité d'avoir un sondage tourbeux est de 100 %. A l'inverse, plus la valeur est proche de 0, plus la probabilité d'avoir un sondage tourbeux est de 0 %.

Nous nous attendons, dans cette première analyse, à ce qu'il y ait bien un lien entre niveau de potentialité de la tourbe et le nombre de mailles validées par des sondage.

Avec la relation suivante :

$$P(T | P_{fort}) > P(T | P_{moyen}) > P(T | P_{faible}) > P(T | P_{nulle})$$

La robustesse de cette relation est vérifiée par les écarts-types.

2.1.2. Résultats

La proportion de mailles validées est dépendante de l'orientation de nos prospections c'est pourquoi nous avons validé en plus grande quantité les mailles à potentialité moyenne et forte. Néanmoins, le plus important ici ce sont les évolutions des taux de validations de mailles.

Nous faisons la distinction, au sein des niveau de potentialité, entre les mailles validées par la présence d'au moins un sondage déterminant tourbeux (OUI) et les mailles sans (NON). Le taux de validation des mailles à potentialité nulle est de 29% contre 86% pour les mailles à potentialité forte (**Figure 5**). Cette progression est monotone croissante (chaque classe a un taux supérieur à la précédente), ce qui indique que la potentialité est un bon prédicateur de la présence réelle de tourbe. Il est important de rappeler que le taux de validation présenté ici correspond au pourcentage de mailles prospectées qui sont validées comme tourbeuses et non pas l'ensemble des mailles prospectées par niveau de potentialité.

Le taux de 30%, relativement élevé pour des mailles identifiées comme nulle, est probablement en lien avec l'identification à dire d'experts de mailles non identifiées par le modèle (limites d'enveloppes, tourbières de pentes, micro-tourbières).

Le calcul des écarts types, soit de l'incertitude, permet toutefois d'ajouter une nuance. Entre nulle (29 % de validation) et faible (37 % de validation), l'augmentation est modérée voir même non distincte. En effet la superposition de l'incertitude ne permet pas de distinguer statistiquement ces deux niveaux de potentialité, qui traduisent donc des probabilités de validations relativement proches. Ces résultats suggèrent une capacité de détection encore limitée pour les bas niveaux de potentialité avec une difficulté à distinguer nulle et faible.

En revanche, le saut devient marqué pour les classes moyenne (64 %) et forte (86 %), avec une incertitude fine (environ $\pm 2,6$ %, **ANNEXE 4**) qui valide bien la transition nette entre les niveaux faible, moyen et fort. Cette distinction confirme ainsi la pertinence de la précartographie pour orienter les efforts de prospection et identifier les principales enveloppes tourbeuses régionales.

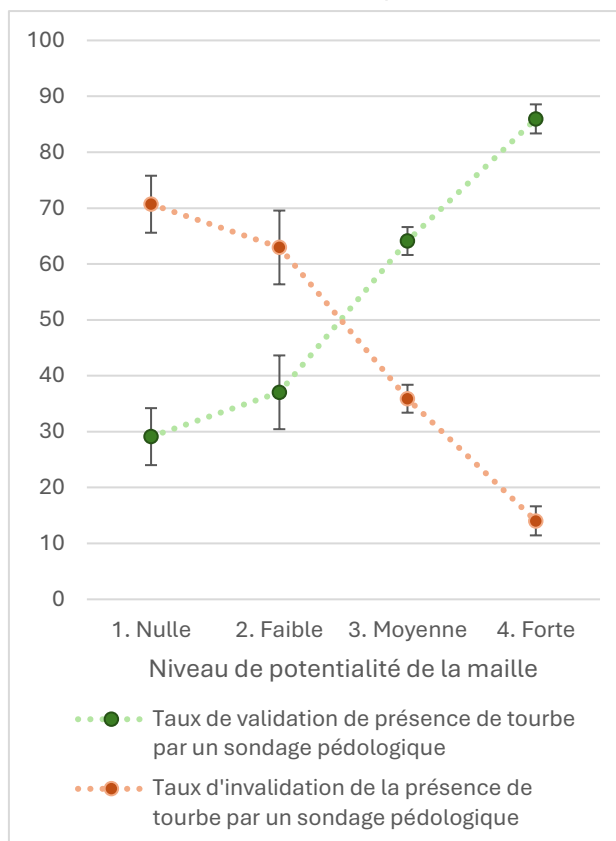


Figure 5 : Relation quasi monotone entre le taux de validation des mailles et leur niveau de potentialité tourbeuse

2.1.3. Conclusion

En conclusion, la relation positive continue observée entre les niveaux de potentialité et les taux de validation confirment la cohérence globale de la précartographie régionale. Si les classes nulles et faibles potentiel tourbeux apparaissent peu discriminantes entre elles, les niveaux moyens et forts présentent en revanche une forte capacité prédictive, justifiant leur priorisation dans les campagnes d'inventaire.

Par ailleurs, la faible incertitude indique une bonne stabilité du taux de validation. C'est pourquoi nous utilisons les taux de validation des mailles à potentialité tourbeuse moyenne et forte pour extrapoler la somme des surfaces tourbeuses en région Hauts-de-France.

2.2. Potentialités tourbeuses et catégories des sondages du PRAT

Cette analyse vise à évaluer une éventuelle corrélation entre la potentialité tourbeuse des mailles et les catégories pédologiques des sondages et vérifier dans le même temps que cette relation est bien observée malgré les différences d'échantillonnage entre base A et B.

2.2.1. Méthode

La relation entre les classes de sondages pédologiques (NdT, dT1, dT2, dT3 et dT4) et la potentialité tourbeuse des mailles (Nulle, Faible, Moyenne, Forte) a été analysées à l'aide de tests du χ^2 d'indépendance.

- ❖ L'hypothèse nulle (H_0) correspond à une indépendance entre la classe de sondage et la potentialité tourbeuse de la maille, impliquant une distribution aléatoire des types de sondages entre les niveaux de potentialité des mailles.
- ❖ A l'inverse, l'hypothèse alternative (H_1) stipule au contraire l'existence d'une dépendance entre ces deux variables, traduisant une structuration non aléatoire de la composition des sondages selon la potentialité tourbeuse.

L'interprétation des résultats s'appuie sur les résidus standardisés du test du χ^2 . A un seuil de significativité de 5 % ($\alpha = 0.05$), des valeurs de résidus comprises entre [-1.96 ; 1.96] indiquent une fréquence compatible avec l'hypothèse d'indépendance, donc de distribution aléatoire.

Des valeurs supérieures à 1.96 traduisent une sur-représentation significative, tandis que des valeurs inférieures à -1.96 indiquent une sous-représentation significative d'une classe de sondage dans une catégories de maille donnée, donc d'une présence non dû au hasard.

Lorsque les effectifs attendus ne respectaient pas les conditions classiques d'application du test du χ^2 (effectifs théoriques inférieur à cinq), les résultats ont été interprétés avec prudence.

Dans le cadre de cette analyse, nous nous attendons à observer une dépendance marquée entre la catégorie de sondage et la potentialité de la maille : plus le potentiel tourbeux d'une maille est élevé, plus les sondages déterminants tourbière devraient être sur-représentés, traduisant une structuration cohérente avec la logique de précartographie.

2.2.2. Résultats

Une vérification des effectifs attendus indique que la classe dT4 ne satisfait pas pleinement les conditions d'application du test du Chi². Cette catégorie ne comprend en effet que 12 sondages au total, avec des effectifs théoriques inférieurs au seuil recommandé de cinq dans certaines classes de potentialité. Les résultats associés à cette classe doivent donc être interprétés avec prudence et sont présentés à titre indicatif (**Tableau 5**).

Tableau 5 : Résidus standardisés du test du Chi² de la relation entre catégorie de sondage et niveau de potentialité tourbeuse.

Indicateur de potentialité tourbeuse de la maille	NdT	dT1	dT2	dT3	dT4	dT
Nulle	5,39	-4,65	-3,52	7,6	-0,92	-6,9
Faible	4,28	-2,79	-0,54	-1,07	0,1	-3,88
Moyen	3,84	-2,51	-0,73	-1,6	-1,29	-2,78
Fort	-9,24	6,55	2,76	-0,99	1,97	8,43

Les tests du Chi² mettent en évidence une dépendance statistiquement significative entre la composition des classes de sondages pédologiques et la potentialité tourbeuse des mailles (**Tableau 5**), conduisant au rejet de l'hypothèse d'indépendance (H0) au profit de l'hypothèse alternative (H1).

Structuration des potentialités 'extrêmes'

Les résidus standardisés révèlent une structuration nette de la distribution des types de sondages le long du gradient de potentialité tourbeuse, traduisant une spécialisation progressive des contextes pédologiques (**ANNEXE 5**).

Les mailles classées à potentialité nulle présentent une sur-représentation significative des classes NdT (5.39) et dT3 (7.6), associées à l'absence de tourbe et à une expression en profondeur de celle-ci, ainsi qu'une sous-représentation marquée des classes dT1 (-4.65) et dT2 (-3.52), caractéristiques de contextes tourbeux. Cette distribution met ainsi en évidence une polarisation nette vers des conditions majoritairement non tourbeuses. Les surreprésentations dT3 peuvent certainement être du fait des mailles à potentialité nulle prospectées en limite d'enveloppes tourbeuses

A l'inverse, les mailles à fort potentiel tourbeux, se caractérisent par une sur-représentation significative de la classe dT1 (6.55), indicatrice de tourbe affleurante, accompagnée d'une sous-représentation marquée de la classe NdT (-9.24). Cette configuration traduit une spécialisation inverse, fortement associée à la présence de tourbe dès les horizons de surfaces.

Structuration des potentialités 'moyennes'

Les classes de potentialité faible et moyenne présentent une structuration nettement moins contrastée. Aucune catégorie de sondage n'y apparaît fortement sur-représentée, à l'exception d'une sur-représentation relative de la classe NdT(4.28 et 3.84), associée à une sous-représentation des sondages dT1 (-2.79 et -2.51). Les autres classes présentent des fréquences compatibles avec une distribution aléatoire.

Cette composition intermédiaire suggère l'existence de zones de transition, caractérisées par une coexistence de signatures tourbeuses et non tourbeuses, sans dominance statistique nette d'un type de sondage particulier. Ces mailles correspondent vraisemblablement à des contextes pédologiques plus hétérogènes, où la tourbe peut être absente, discontinue, ou localisée en profondeur variable.

Remarque : Les zones à fort potentiel tourbeux correspondent majoritairement à des secteurs où la tourbe est présente en surface. Il s'agit également, dans de nombreux cas, de sites déjà bien identifiés et gérés par le Conservatoire d'espaces naturels, notamment en raison de leurs enjeux en termes d'habitats et de flore. Cette convergence entre expertise de terrain, gestion écologique et résultats statistiques conforte la cohérence globale de la précartographie.

3. Évaluation des performances prédictives du modèle PRAT

Afin d'aller plus loin dans l'évaluation de la capacité discriminante de l'indicateur de potentialité issu de la précartographie différents seuils de potentialité ont été testés. L'objectif étant de voir si les niveaux de potentialités proposés dans la précartographie ont bien été performant ou si des pistes d'améliorations sont possibles.

L'analyse est conduite exclusivement sur les mailles ayant fait l'objet d'au moins une prospection pédologique, pour lesquels la présence ou l'absence de tourbe est connue à partir des sondages de terrain. Les mailles non prospectées sont volontairement exclues de cette évaluation.

3.1. Méthode

3.1.1. Modalités testées

La performance du modèle a été évaluée pour 3 modalités. Ces dernières ont été constituées en assimilant certaines classes de potentialité à des conditions favorables à la présence de tourbe. Nous avons ainsi 3 seuils :

- Uniquement les mailles à potentialité forte
- Les mailles à potentialité moyenne et forte
- Les mailles à potentialité faible, moyenne et forte

Pour chaque modalité testée :

- Les mailles⁹ appartenant aux seuils retenus sont considérées comme favorables (prédites positives)
- Les mailles appartenant aux classes non retenues sont considérées comme défavorables (prédites négatives).

Une maille à potentialité nulle est ainsi systématiquement considérée comme défavorable.

La confrontation entre la prédiction issue de la précartographie et l'observation issue des sondages permet de distinguer quatre situations, uniquement au sein des mailles prospectées :

Tableau 6 Catégories de performance du modèle

Catégories	Description
Vrai Positif (VP)	Mailles prédite favorable dans laquelle au moins un sondage déterminant tourbeux est observé
Faux Positif (FP)	Maille prédite favorable ne contenant aucun sondage déterminant tourbeux
Vrai Négatif (VN)	Maille prédite défavorable ne contenant aucun sondage déterminant tourbeux
Faux Négatif (FN)	Maille prédite défavorable contenant au moins un sondage déterminant tourbeux

La **Figure 6** illustre le principe de construction des matrices de confusion appliquées aux mailles prospectées du PRAT. Les niveaux de potentialité sont interprétés comme une prédiction de caractère favorable ou défavorable à la présence de tourbe (lignes), tandis que la présence d'au moins un sondage déterminant tourbeux constitue l'observation de référence (colonnes). Cette approche permet de distinguer les mailles correctement identifiées, les surestimations et les omissions (cases), et d'évaluer le compromis entre détection et fiabilité selon le seuil de potentialité retenu.

Observation terrain (PRAT)

	Avérée tourbeuse (≥ 1 sondage dT)	Non avérée tourbeuse (Aucun sondage dT)
Maille favorable (Potentialité retenu)	VP <i>Bonne détection</i>	FP <i>Surestimation du potentiel</i>
Maille défavorable	FN <i>Tourbe manquée</i>	VN <i>Bonne exclusion</i>

Figure 6 : Principe de construction des matrices de confusion

⁹ Donc à potentialité faible et/ou moyenne et/ou forte

3.1.2. Indicateurs de performance

A partir de cette matrice de confusion, trois indicateurs ont été calculés :

- **Sensibilité** : proportion de mailles réellement tourbeuses correctement identifiées comme favorables

$$\text{Sensibilité} = \frac{VP}{VP + FN}$$

- **Précision** : proportion de mailles prédites favorables effectivement tourbeuses

$$\text{Précision} = \frac{VP}{VP + FP}$$

- **Spécificité** : proportion de mailles réellement non tourbeuses correctement identifiées comme défavorables

$$\text{Spécificité} = \frac{VN}{VN + FP}$$

Cette approche permet d'évaluer, à partir des seules mailles prospectées, dans quelle mesure les classes de potentialité issues de la précartographie peuvent être interprétées comme un indicateur probabiliste de présence de tourbe. Elle met en évidence le compromis entre capacité de détection des zones tourbeuses et fiabilité des prédictions selon le seuil de potentialité retenu, sans chercher à produire une nouvelle cartographie.

3.2. Résultats

La construction des matrices de confusion et le calcul des indicateurs de performance ont été réalisés sous R, à partir des 676 mailles prospectées et disposant d'au moins un sondage pédologique. Les trois hypothèses de seuils ont été testés :

Tableau 7 : Sensibilité, précision et spécificité du modèle précartographique

Potentialité tourbeuse	Sensibilité	Précision	Spécificité
Forte	0,36	0,86	0,9
Moyenne + Forte	0,9	0,71	0,37
Faible + Moyenne + Forte	0,94	0,68	0,23

Lorsque seules les mailles à forte potentialité sont considérées comme favorables, le modèle de précartographie apparaît très conservateur. La sensibilité est faible (0,36), indiquant qu'une part importante des mailles réellement tourbeuses n'est pas détectée. En revanche, la précision élevée (0,86), montre que les mailles identifiées comme favorables correspondent, dans la grande majorité des cas, à des mailles effectivement tourbeuses.

L'intégration des mailles à potentialité moyenne, constitue un point de bascule majeur. La sensibilité augmente fortement pour atteindre 0,90, traduisant une capacité accrue à identifier les mailles réellement tourbeuses. Cette amélioration s'accompagne toutefois d'une diminution de la précision (0,71), indiquant une augmentation des faux positifs. Autrement dit, le modèle détecte davantage de tourbe, mais au prix d'une moindre fiabilité individuelle des mailles classées comme favorables.

L'élargissement du seuil aux mailles à faible potentialité n'apporte qu'un gain marginal de sensibilité (+4 points, pour atteindre 0,94), tandis que la précision continue de diminuer (0,68) et que la spécificité chute fortement (0,23). Dans cette configuration, le modèle propose un grand nombre de mailles comme potentiellement tourbeuses, avec environ une maille sur trois seulement effectivement tourbeuse. Cette stratégie de « ratissage large » maximise la détection mais dégrade nettement la capacité d'exclusion des zones non tourbeuses.

Dans l'ensemble, plus la condition favorable est élargie, plus la sensibilité augmente, au détriment de la précision et de la spécificité. Ce compromis est attendu dans un contexte de précartographie, où l'objectif principal est d'orienter l'effort de prospection vers les zones les plus susceptibles de contenir de la tourbe.

Un point méthodologique important doit toutefois être souligné : les mailles à faible potentialité ayant été prospectées ne constituent pas un échantillon aléatoire du territoire. Elles se situent majoritairement dans la continuité spatiale des mailles à potentialité moyenne ou forte, ce qui introduit une dépendance spatiale entre les classes de potentialité. Cette configuration contribue à expliquer la sensibilité élevée observée pour les seuils larges, ainsi que le maintien d'une précision relativement correcte (0,68), malgré l'élargissement du critère favorable.

3.3. Affinement des seuils de potentialité tourbeuse

L'orientation de la prospection aurait pu néanmoins être améliorée. En effet, nous nous appuyons ici sur des niveaux de potentialité qui regroupent en réalité différentes notes (Lebrun 2020, MAJ Jacek, 2024). Une question légitime consiste alors à s'interroger sur le caractère arbitraire des regroupements initiaux des niveaux de potentialité tourbeuse. Ceux-ci reposent sur des classes discrètes (nulle, faible, moyen et fort) dérivées d'un score ordinal continu (0 à 7), ce qui peut conduire à des effets de seuils marqués dans l'évaluation des performances.

Afin d'explorer cette question, nous avons reconstruit les matrices de confusion en nous appuyant directement sur la note de potentialité tourbeuse (comprise entre 0 et 7), et en testant un seuil alternatif de favorabilité. Nous avons ainsi considéré une redéfinition de la classe de

potentialité forte, étendue aux notes comprises entre 3 et 7, au lieu de 4 à 7 dans la classification initiale.

Ce simple ajustement conduit à une amélioration nette des performances en termes de détection. La sensibilité associée aux mailles à forte potentialité passe ainsi de 0.36 à 0.61, traduisant une capacité accrue à identifier correctement les mailles réellement tourbeuses. Cette hausse substantielle de la sensibilité ne s'accompagne que d'une perte limitée de précision, qui ne diminue que de trois points, passant de 0.86 à 0.83. Autrement dit, le gain en capacité de détection est obtenu sans dégradation majeure de la fiabilité des prédictions.

Ces résultats sont particulièrement encourageants. Ils montrent que la structure du score de potentialité contient une information discriminante fine, et que les performances de la précartographie peuvent être sensiblement améliorées par un ajustement raisonné des seuils, sans modifier les données sources ni la logique générale du modèle. Cette approche ouvre la voie à une représentation cartographique plus fidèle des gradients de potentialité tourbeuse et permettrait, à terme, d'orienter plus efficacement les prospections, tout en réduisant le risque de non-détection dans les zones marginales.

Conclusion

La relation observée entre les mailles de potentialité tourbeuse forte et les sondages pédologiques de catégorie dT1 (présence d'horizon tourbeux en surface) et dT2 (tourbe de subsurface apparaissant avant 40 cm de profondeur) valide l'efficacité des indicateurs employés dans la précartographie, tels que la flore et les habitats naturels considéré comme exclusivement turfifères dans les Hauts-de-France. Leur résolution fine permet une discrimination précise des niveaux de potentialité à l'échelle kilométrique, établissant certainement une relation logique entre les indicateurs de surface et la confirmation de tourbe superficielle par sondage.

Cependant, cette approche révèle aussi les limites de la précartographie pour l'évaluation en profondeur, limitée ici aux 120 premiers centimètres. Les indicateurs comme la carte géologique à l'échelle 1 :50 000^e, de nature plus généraliste, manquent certainement de résolution verticale pour différencier les horizons. Ainsi, si les indicateurs de surface permettent de détecter les couches tourbeuses superficielles, ils s'avèrent moins performant pour identifier les mailles où la tourbe est présente exclusivement en subsurface (mixte de dT2 et dT3).

A l'échelle régionale, ces résultats confirment que la stratégie de précartographie, combinée à une prospection prioritaire des mailles à potentialité moyenne et forte, a été pertinente. Ce seuil initial permet d'identifier environ 90 % des mailles tourbeuses avérée, tout en conservant une précision acceptable dans un objectif d'orientation des inventaires. Il convient néanmoins de garder à l'esprit que dans ces conditions le modèle tend encore à ne pas détecter environ 10 % des mailles tourbeuses, principalement situées dans des secteurs à plus faible potentialité.

L'analyse complémentaire fondée sur un affinement des seuils de potentialité montre qu'une amélioration de la prospection est envisageable sans remise en cause du cadre méthodologique

initial. En redéfinissant la classe de potentialité forte pour inclure les notes comprises entre 3 et 7, la sensibilité du modèle pour cette classe double, tandis que la précision demeure élevée (environ 83 %). Cette configuration permet ainsi de détecter un peu plus de six mailles tourbeuses sur dix (sensibilité) tout en conservant une fiabilité élevée des prédictions (quand la précartographie indique que c'est tourbeux elle a « raison » quatre fois sur cinq, précision). Cette proposition de seuil constitue un compromis particulièrement intéressant dans un contexte de précartographie.

Dans cette perspective, les mailles de potentialité 1 et 2 peuvent être maintenues respectivement comme classes de faible et moyenne potentialité, tandis que les mailles de note 3 basculent dans la classe de forte potentialité. Un tel ajustement améliore la représentation des gradients de favorabilité tourbeuse et offre un levier concret pour affiner les orientations de prospection futures, en réduisant le risque de non-détection dans les zones marginales tout en limitant l'extension excessive des zones classées comme favorables.

Ces résultats confirment enfin que les performances de la précartographie ne doivent pas être considérées comme absolues, mais comme conditionnelles aux choix de seuils et à la stratégie d'échantillonnage. Ils montrent toutefois que le score de potentialité tourbeuse contient une information discriminante robuste, susceptible d'être optimisée par des ajustements, renforçant ainsi son intérêt comme outil d'aide à la décision dans le cadre du PRAT.

Chapitre 3 : Carte de veille par machine learning

1. Introduction

La cartographie des milieux tourbeux repose sur des dynamiques spatiales et environnementales complexes, résultant de l'interaction de facteurs topographiques, pédologiques et biologiques (Cubizolle 2019). Les analyses présentées dans les chapitres précédents ont permis de caractériser les relations entre la potentialité tourbeuse des mailles kilométriques et les résultats des sondages pédologiques, tout en soulignant certaines limites inhérentes aux approches fondées exclusivement sur les observations de terrain.

Dans ce troisième volet, nous adoptons une démarche conceptuellement inversée par rapport à la précartographie. En effet, cette dernière reposait sur une approche à dire d'expert fondée sur des variables environnementales auxquelles étaient attribuées des valeurs supposées être associées aux contextes tourbeux, leur combinaison aboutissant à un indice de potentialité. A l'inverse, nous partons ici directement des observations pédologiques elles-mêmes, en distinguant les sondages tourbeux et non tourbeux. A partir de cette information binaire de présence / absence, nous interrogeons la capacité des variables environnementales disponibles à expliquer et prédire cette distribution.

Cette inversion du raisonnement nous conduit naturellement vers des méthodes d'apprentissage automatique. Les processus contrôlant la formation et le maintien des tourbières reposent sur de multiples combinaisons environnementales, tant du biotope (géologie, hydrologie, topographie) que de la biocénose. Ces relations sont souvent non linéaires, multi-échelles et potentiellement interactives. Les algorithmes de machine learning, et en particulier les méthodes de Random Forest (Breiman 2001), sont particulièrement adaptés à ce type de problématique car ils permettent de modéliser automatiquement des interactions complexes (Sheykhmousa *et al.* 2020) sans imposer d'hypothèse a priori sur la forme des relations entre variables explicatives et variable réponse.

L'ensemble des variables environnementales mobilisées est structuré sous forme de rasters harmonisés à une résolution spatiale de 25 m. Ce choix correspond à un compromis entre finesse spatiale et puissance de calcul à l'échelle régionale étudiée. Contrairement à la précartographie initiale, construite sur des mailles de 1 km², l'approche raster permet ici de restituer l'hétérogénéité des paysages. Là où la maille kilométrique produisant un aplat homogène, la résolution de 25 m permet de révéler une mosaïque de conditions géomorphologiques plus fines (dépressions, replats, ruptures de pente, zones d'accumulation hydrique), déterminantes dans l'expression des milieux tourbeux (Graham *et al.* 2020).

Nous avons ainsi développé une carte de veille fondée sur un algorithme d'apprentissage supervisé ayant pour but d'estimer la probabilité de présence de tourbe. Cette approche ne cherche pas à se substituer à la validation de terrain, mais à la compléter, en fournissant un outil d'aide à la décision permettant d'identifier des secteurs à enjeux. La carte produite s'inscrit alors dans une logique opérationnelle de priorisation des investigations et de suivis.

Ce troisième chapitre présente successivement les données mobilisées, la méthodologie de modélisation mise en œuvre, l'évaluation des performances des modèles testés, ainsi que les résultats cartographiques obtenus. Les limites de l'approche et les perspectives d'amélioration sont également discutées, afin de replacer cet outil de veille dans une démarche globale intégrant à la fois expertise de terrain et modélisation spatiale.

2. Méthode

2.1. Données d'entrée et sélection des variables explicatives

2.1.1. Données mobilisées

Les données utilisées dans cette étude combinent un jeu d'observations pédologiques géoréférencés et un ensemble de variables environnementales rastérisées. L'environnement technique est précisé en annexe (**ANNEXE 6****ANNEXE 5**)

Le jeu de sondages constitue la variable réponse du modèle. Chaque point est associé à une variable binaire indiquant la présence (1) ou l'absence (0) de tourbe. Cette information est issue des relevés pédologiques réalisés sur le terrain et sert de base à l'apprentissage supervisé.

Les variables explicatives sont issues de rasters environnementaux décrivant différents compartiments du milieu : topographie, hydrologie, géologie et habitats (**Tableau 8**). L'ensemble des rasters a été harmonisé spatialement (même système de projection, même résolution et même emprise) afin de garantir la cohérence des extractions et des modélisations¹⁰.

Tableau 8 : Rasters mobilisés pour les tests et le modèle finale

Type de raster	Nom du raster	Description
Monobande	Pente	Pente , exprimée en degré
	WI	Wetness Index , Indice d'humidité topographique
	CarHabT	Cartographie d'habitats , origine CBN, valeur du raster issu de la concaténation du code physio et code biotope
	GEO050K	Géologie au 1:50 000, origine BRGM, valeur du raster issu du champ 'code'
	TPI	Indice de Position Topographique . Représente l'écart entre l'élévation du pixel actuel et l'élévation moyenne de son voisinage (utilise l'outil QGIS Multi Scale TPI)
Multibande	TRI	Indice de Rugosité du Terrain
	r2bWI	CarHabT et WI
	r3bWI	CarHabT, GEO050K et WI
	r4b25m	CarHabT, GEO050K, TPI et TRI
	r4bWI	CarHabT, GEO050K, TPI et WI
	r5b25m	CarHabT, GEO050K, TPI, TRI et WI

¹⁰ Le détail des rasters est présenté dans la partie 2.2.

Les combinaisons multivariées permettent d'évaluer l'apport conjoint de plusieurs descripteurs environnementaux dans la performance du modèle. Ils résultent d'une première phase de test sur les rasters monobandes afin d'optimiser les relations multibandes.

2.1.2. Sélection des variables explicatives

Les algorithmes d'apprentissage supervisé, et notamment le Random Forest, peuvent être influencés par la redondance d'information entre variables explicatives. Lorsque plusieurs variables décrivent un même phénomène écologique, leur corrélation peut conduire à une pondération implicite excessive de ce facteur dans le processus de classification et donc entraîner le modèle d'apprentissage à répondre en s'appuyant préférentiellement sur ces variables.

Afin de limiter cet effet, une analyse de corrélation a été réalisée en amont de la modélisation. A partir du package '*terra*', 10 000 pixels ont été échantillonnés aléatoirement sur l'emprise d'étude. Les valeurs correspondantes des rasters monobandes ont été extraites puis soumises à un test de corrélation de Spearman, calculé à l'aide de la fonction '*cor*' (méthode = "*spearman*"). Les résultats ont été visualisés sous forme de matrice graphique à l'aide du package '*corrplot*'.

Le coefficient de corrélation de Spearman (ρ) varie entre $[-1;1]$. L'interprétation retenue est détaillée dans le **Tableau 9**.

Tableau 9 : Seuil du test Spearman utilisé pour l'analyse de corrélation

 ρ Spearman	Interprétation
< 0.2	Corrélation très faible / négligeable
0.2 - 0.4	Corrélation faible
0.4 - 0.6	Corrélation modérée
0.6 - 0.8	Corrélation forte
> 0.8	Corrélation très forte

Ces seuils s'appliquent indifféremment aux corrélations positives et négatives, l'interprétation reposant sur la valeur absolue du coefficient.

En pratique, lorsqu'une corrélation forte à très forte est observée ($|\rho| \geq 0.6$), une des variables concernées est écartée afin d'éviter la redondance d'information dans les modèles. Cette étape permet de stabiliser l'apprentissage, de limiter le poids artificiel de certains gradients environnementaux et de faciliter l'interprétation écologique des résultats.

2.1.3. Stratégie d'apprentissage, bootstrap et validation croisée

L'apprentissage du modèle repose sur un algorithme de type Random Forest, une méthode d'apprentissage supervisée fondée sur l'agrégation d'arbres de décision (**Figure 7**) (Belgiu et Drăguț 2016; Sheykhou et al. 2020). Ce type de modèle est particulièrement adapté aux jeux de données environnementaux complexes, car il permet de capter des relations non linéaires ainsi que des interactions entre variables explicatives, sans hypothèse paramétrique préalable.

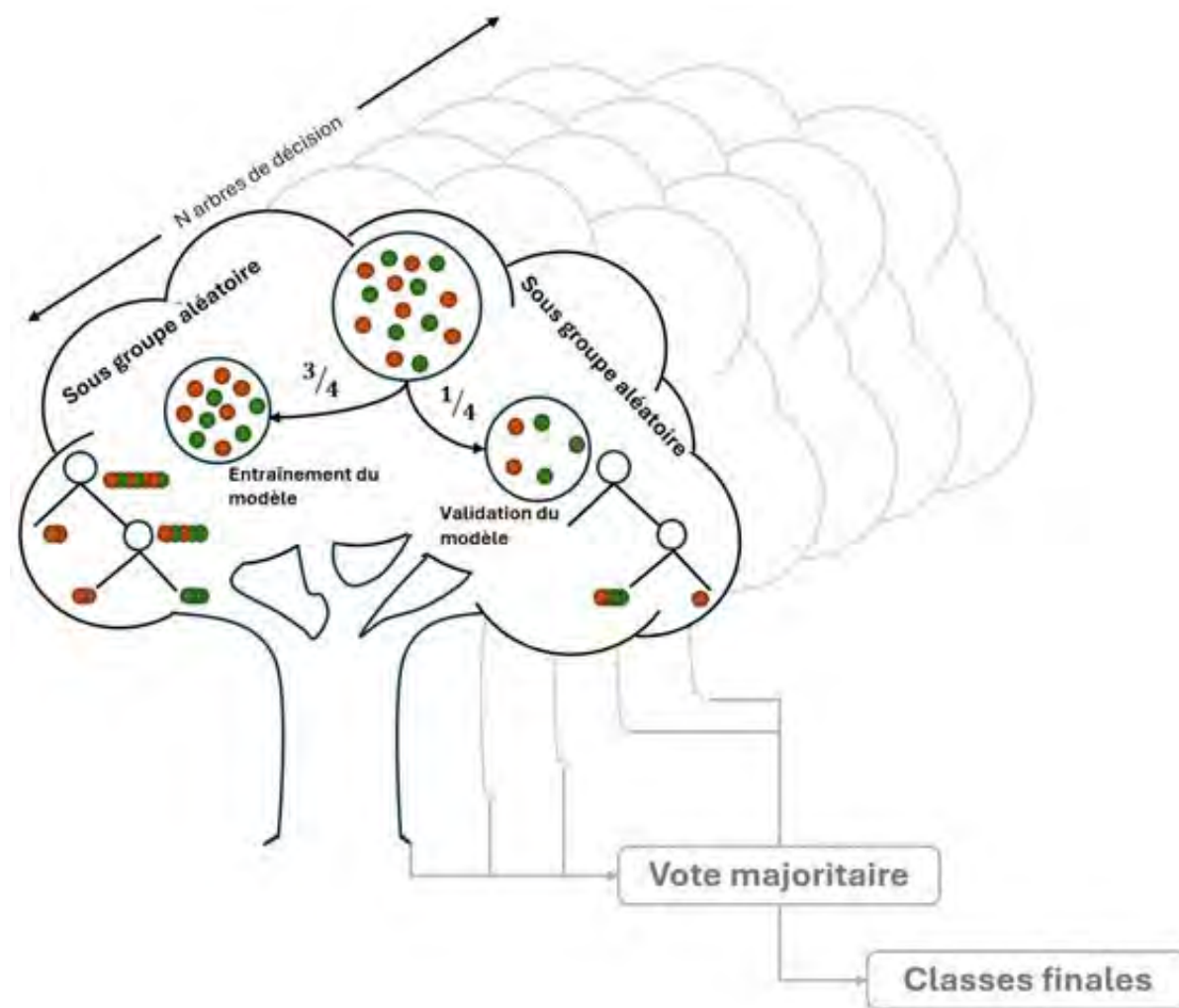


Figure 7 : Schéma conceptuel du Random Forest. Traduit de « Sheykhou et al.: Support vector machine versus random forest for remote sensing image classification ».

Afin d'évaluer la robustesse du modèle et la stabilité de ses performances en fonction de la taille de l'échantillon d'apprentissage, nous avons mis en place une procédure de Bootstrap itératif¹¹ avec validation croisée interne.

¹¹ Méthode statistique consistant à répéter de nombreux rééchantillonnages aléatoires d'un même jeu de données afin d'évaluer la stabilité et la robustesse des résultats obtenus.

Cinq tailles d'échantillons d'apprentissage ont été testées :

- $n = 5$ (jeu extrêmement réduit),
- $n = 38$ (~1 % du jeu de données),
- $n = 950$ (~25 %)
- $n = 1\,900$ (~50 %)
- $n = 2852$ (~75 %)

Ces proportions ont été choisies afin d'explorer un gradient complet allant d'un apprentissage minimal à un apprentissage quasi exhaustif.

L'objectif de cette démarche est double. Elle permet dans un premier temps d'observer l'évolution de la stabilité du modèle à mesure que la taille du groupe d'apprentissage augmente. Elle permet, dans un second temps, d'identifier un éventuel « effondrement » des performances lorsque le nombre de points d'apprentissages devient trop faible.

L'effondrement des performances pour les petits échantillons suggère que les variables explicatives sont « finement » discriminantes et que la relation présence-environnement nécessite un nombre substantiel d'observations pour être correctement apprise. A l'inverse, une stabilité des performances, même avec de très petits échantillons indiquerait que les variables capturent des gradients environnementaux particulièrement généraux, permettant au modèle d'identifier les structures principales avec peu d'information, mais n'allant pas jusqu'à une discrimination fine.

L'analyse de cette dynamique permet donc de qualifier indirectement la nature du signal écologique porté par les variables environnementales.

Pour chaque taille d'échantillon n , 1 000 itérations indépendantes ont été réalisées. Pour chaque itération un échantillon d'apprentissage est tiré aléatoirement de manière stratifiée¹², afin de conserver la proportion initiale de présence (1) et d'absence (0) de tourbe. Le reste des données est utilisé comme jeu de validation indépendant. Un modèle Random Forest est alors entraîné sur le jeu d'apprentissage. Les prédictions sont ensuite réalisées sur le jeu de validation. Une matrice de confusion est enfin calculée afin d'estimer les performances du modèle.

Cette procédure permet d'obtenir, pour chaque taille d'apprentissage, une distribution des performances et non une valeur unique. Les métriques sont ensuite synthétisées sous forme de moyennes et d'écarts-types, permettant d'évaluer la stabilité inter-itérations. Les matrices de confusions moyennes sont ainsi exploitées sous formes graphiques *via* le package 'ggplot2'.

2.1.4. Evaluation des performances du modèle

L'évaluation des performances repose sur l'analyse des matrices de confusion, selon une approche comparable à celle utilisée pour la validation du modèle de précartographie (cf. Chapitre 2, partie 3).

¹² C.a.d que l'on sélectionne les sondages en prenant en compte leur catégorie

Pour chaque itération, la matrice de confusion distingue les pixels tourbeux correctement classé (VP), les pixels non tourbeux correctement classé (VN), les pixels non tourbeux pourtant classés tourbeux (FP) et enfin les pixels tourbeux pourtant classé non tourbeux (FN).

A partir de cette matrice, trois métriques principales ont été calculées :

- Sensibilité (Recall), mesure la capacité du modèle à détecter les pixels tourbeux

$$\text{Sensibilité} = \frac{VP}{VP + FN}$$

- Précision, indique la fiabilité des prédictions positives

$$\text{Précision} = \frac{VP}{VP + FP}$$

- Exactitude globale (Accuracy), reflète la proportion totale de classifications correctes

$$\text{Accuracy} = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN}$$

Le choix de ces métriques permet d'évaluer simultanément la capacité du modèle à identifier correctement la tourbe (sensibilité), la fiabilité des détections positives (précision) et enfin la performance globale de classification.

L'évolution conjointe de ces indicateurs en fonction de la taille d'apprentissage constitue un élément central de l'analyse, permettant de déterminer si le modèle converge vers une performance stable ou s'il demeure fortement dépendant du volume de données disponibles.

Le choix d'utiliser jusqu'à 75 % des sondages pour l'entraînement du modèle et les 25 % restant pour la validation correspondent aussi aux paramètres standard pour la validation globale d'un modèle. Ainsi, nous ne cherchons pas uniquement à optimiser un score mais aussi de produire un outil de veille spatialement robuste et interprétable.

2.2. Outils, logiciels et traitements

Données sources géoréférencées

Trois jeux de données sources ont été mobilisés pour produire les rasters environnementaux utilisés dans la modélisation de la potentialité tourbeuse.

En premier lieu, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu du BD Alti® (IGN) a été utilisé. Le MNT, disponible à une résolution spatiale de 25 m, constitue la base des calculs topographiques et hydrologiques. Cette résolution correspond à celle retenue pour l'ensemble des analyses spatiales afin d'assurer une cohérence méthodologique.

En complément, deux couches vectorielles ont été intégrées. La cartographie des habitats naturels et tourbeux produite par le Conservatoire Botanique National des Hauts-de-France (CBNHDF) à la demande du CEN, ainsi que la couche géologique au 1 :50 000 fournie par le BRGM. Ces couches vectorielles, comportant des informations attributaires textuelles et numériques associées à chaque entité géométrique, ont été rastérisées afin d'être intégrées aux modèles.

Les traitements topographiques et hydrologiques ont été réalisés à l'aide de la boîte à outils WhiteboxTools intégrée à QGIS.

Correction des dépressions

Le MNT (**Figure 8**) brut peut contenir des artefacts altimétriques, notamment dans les zones de faible précision ou au niveau des surface en eau. Afin d'assurer la cohérence des calculs hydrologiques, une correction des dépressions a été effectuée à l'aide de l'outil *FillDepressionsPlanchonAndDarboux*. Cette étape permet de supprimer les cuvettes artificielles en ajustant l'altitude des pixels concernés, produisant ainsi un MNT hydrologiquement cohérent.

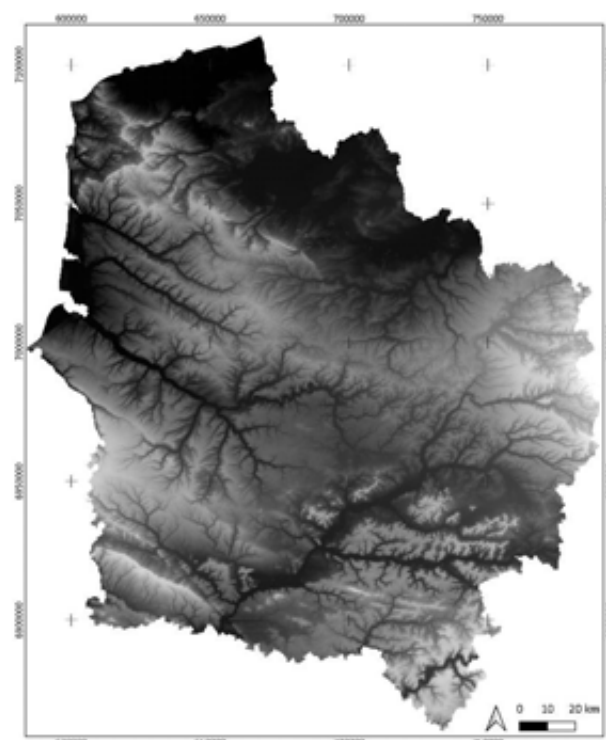


Figure 8 : MNT de la région Hauts-de-France, BD-Alti 25 m IGN

Calcul des indices topographiques et hydrologiques

A partir du MNT corrigé, plusieurs dérivés topographiques et hydrologiques ont été calculés afin de caractériser la morphologie du terrain et les conditions potentielles d'accumulation hydrique :

Nous avons commencé par le calcul de la pente (*Slope*, **Figure 9a**). Calculée en degrés à l'aide de l'outil *Slope* de WhiteboxTools, la pente constitue un facteur structurant dans les dynamiques d'écoulement et d'accumulation des eaux de superficielles. S'en est suivi le calcul de l'Accumulation de flux (*D ∞ Flow Accumulation*, **Figure 9b**). Cet algorithme modélise la direction et la concentration de écoulements surfaciques en tenant compte de la dispersion du flux vers plusieurs cellules adjacentes. Ce raster représente ainsi la convergence potentielle des écoulements.

De ces deux premiers rasters calculés, nous avons pu en ressortir l'Indice Topographique d'Humidité (ITH, **Figure 9c**), aussi connu sous le nom de Wetness Index (WI). Cet indice permet d'identifier les zones susceptibles de concentrer ou de retenir l'eau superficielle, conditions déterminantes dans le développement des milieux tourbeux.

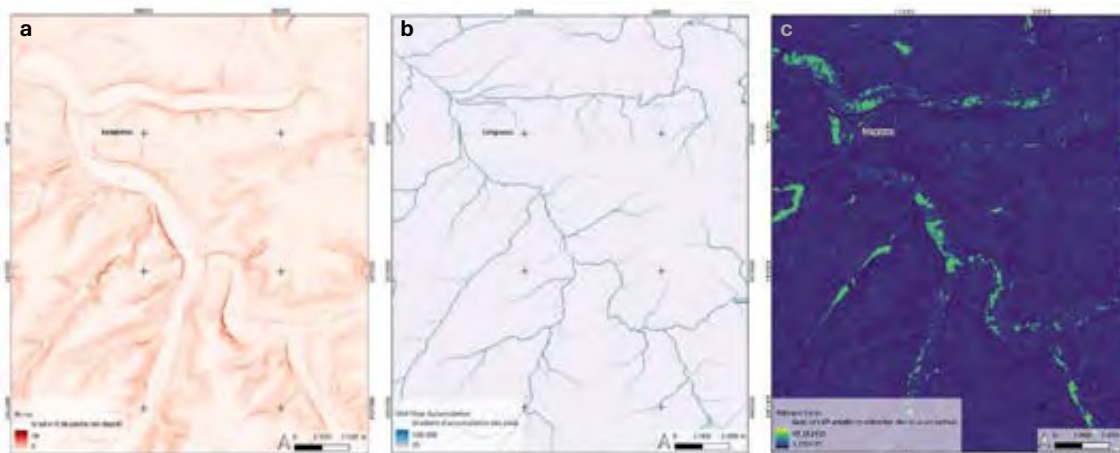


Figure 9 : rasters calculés et mobilisés comme variable environnementale (a. Pente ; b. Accumulation des flux ; c. Indice Topographique d'Humidité)

En plus de ces rasters hydrographiques s'ajoute l'Indice de Position Topographique (TPI) et l'Indice de Rugosité du Terrain (TRI).

Le TPI (**Figure 10a**) mesure l'écart entre l'altitude d'un pixel et l'altitude moyenne de son voisinage défini par une fenêtre d'analyse. Il permet de distinguer les positions relatives dans le paysage (dépressions, replats, crêtes). Les valeurs négatives traduisent des positions en creux, les valeurs positives des positions en relief. Cet indice est particulièrement intéressant pour identifier les dépressions favorables à l'accumulation d'eau. Afin de prendre au mieux le contexte avoisinant le sondage nous avons utilisé l'outil *Multi-Scale Topographic Position Index* disponible avec SAGA Next Génération. Cet outil ne va pas se limiter à une seule fenêtre d'analyse mais à plusieurs niveaux de voisinage. Cela permet ainsi de prendre la variation locale, comme la variation paysagère.

Enfin, le TRI (**Figure 10b**), quantifie la variabilité altimétrique locale en mesurant l'amplitude des différences d'altitudes entre un pixel et ses voisins immédiats. Il renseigne sur le degré d'hétérogénéité morphologique du terrain. Les faibles valeurs correspondent à des surfaces planes ou homogènes tandis que les valeurs élevées traduisent un relief accidenté.

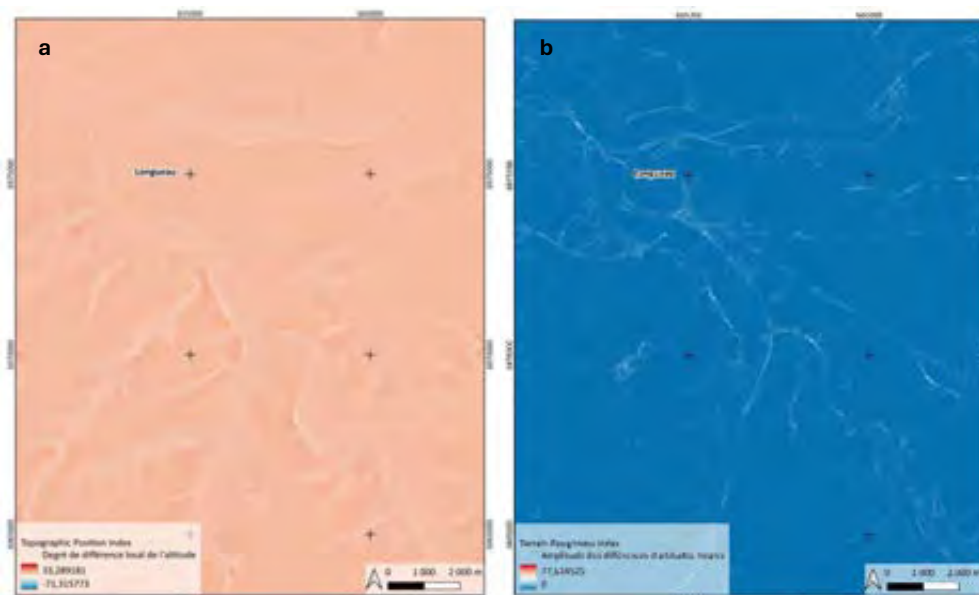


Figure 10 : a. Indice de Position Topographique (TPI) ; b. Indice de Rugosité du Terrain (TRI)

L'ensemble de ces dérivés permet de caractériser à la fois la structure morphologique du terrain (TPI, TRI, Pente) et les dynamiques potentielles d'accumulation hydrique (WI), deux dimensions liées aux conditions d'apparition et de maintien des milieux tourbeux (Cubizolle 2019).

Rastérisation des données vectorielles

Deux couches vectorielles ont été rastérisées à la résolution de 25 m afin d'être intégrées aux modèles (**Figure 11**).

Cartographie des habitats : Deux couches CarHab sont utilisées. La première correspond à tous les habitats naturels, la seconde au travail conjoint entre le CBN et la Stratégie Aires Protégées pour obtenir une cartographie des habitats tourbeux à l'échelle régionale. Ces deux couches ont été fusionnées en accordant la priorité aux habitats tourbeux. Un champ numérique a ensuite été créé par concaténation du 'code_physio' et du 'code_biotope'. Cette opération permet d'attribuer une valeur unique à chaque type d'habitat lors de la rastérisation en prenant en compte la plus grande variation possible d'habitat.

Géologie au 1:50 000 : Les couches géologiques départementales (GEO050K) ont d'abord été fusionnées afin d'obtenir une couverture régionale homogène. La couche résultante a ensuite été rasterisée à 25 m de résolution. Chaque pixel hérite de la valeur issue du champ attributaire 'code', représentant l'unité géologique la plus fine.

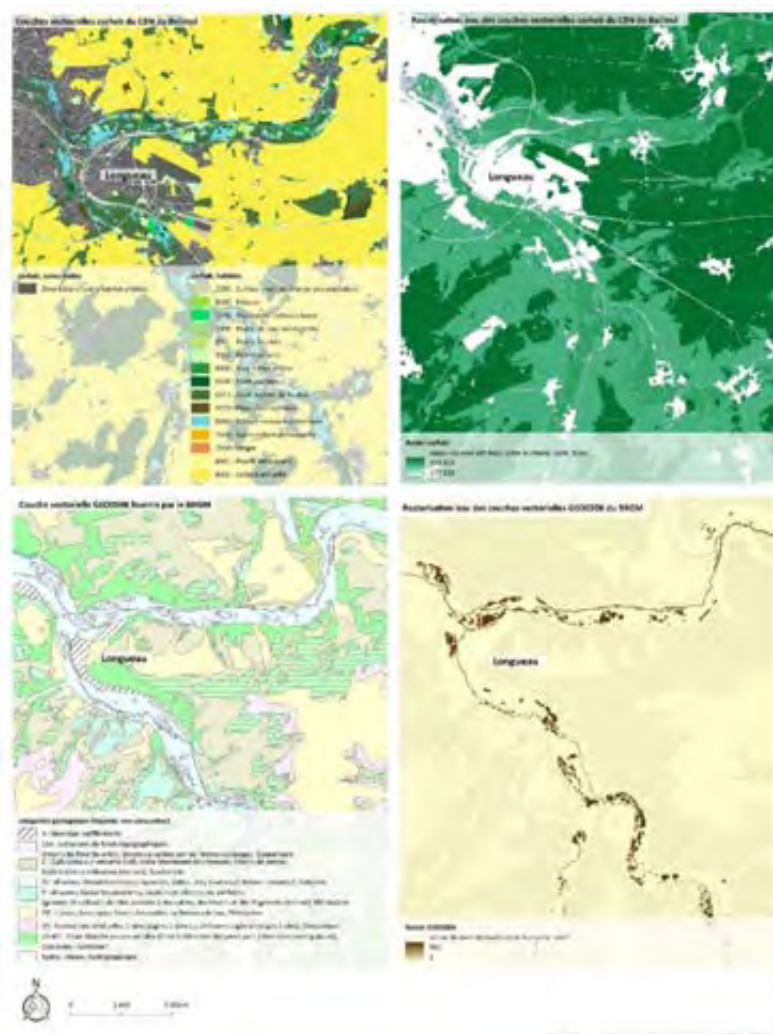


Figure 11 : Haut gauche, Cartographie des habitats vectorisée ; Haut droite, Cartographie des habitats rasterisée ; Bas gauche, couche géologique GEO050K vectorisée, Bas droite couche géologique GEO050K rasterisée

Modélisation sous R et visualisation cartographique

Les rasters prétraités sous QGIS ont été importés dans l'environnement R à l'aide du package *terra*, tandis que les données ponctuelles de sondages ont été importées via le package *sf*. La modélisation a été réalisée à l'aide de l'algorithme *Random Forest* provenant du package éponyme. Les procédures de bootstrap et les tests comparatifs entre configurations de variables ont été développés sous forme de fonctions personnalisées. Les calculs ont été parallélisés grâce aux packages *foreach* et *doParallel*, permettant d'optimiser les temps d'exécution compte tenu du nombre élevé d'itérations réalisées. Les résultats statistiques (évolution des métriques, comparaison des modèles, stabilité des performances) ont été visualisés sous forme graphique à l'aide du package *ggplot2*. Les prédictions spatiales issues des modèles retenus ont été exportées au format *GeoTIFF*. Les traitements cartographiques finaux (classification, mise en forme, légende, composition cartographique) ont été réalisés sous QGIS.

3. Résultats

3.1. Corrélation des variables environnementales

Les rasters environnementaux utilisés pour l'apprentissage supervisée présentent dans la majorité des situations des corrélations faibles à très faibles entre eux ($|\rho| < 0.4$, **Figure 12**). Ces corrélations nous renseignent sur la complémentarité des informations apportées. Cependant certaines corrélations sont problématiques. La pente est en effet fortement corrélée (0.76) avec la rugosité ou à l'inverse en corrélation négative forte (-0.82) avec le WI. Un comportement similaire (-0.72) est aussi observé entre la rugosité et le WI.

L'indice topographique d'humidité renseigne sur les zones d'accumulation des eaux de surface et est construit en partie avec le calcul de la pente. Nous décidons donc de retirer le raster 'pente' des tests suivant au profit du WI. Nous gardons les cinq autres rasters. Le jeu final de variables raster retenue permet ainsi de limiter les redondances tout en conservant des prédicteurs physiquement et écologiquement pertinents pour la modélisation de la potentialité de présence de tourbe. Le TRI et le WI devront par ailleurs ne pas être utiliser dans la même combinaison de rasters du fait de leur corrélation.

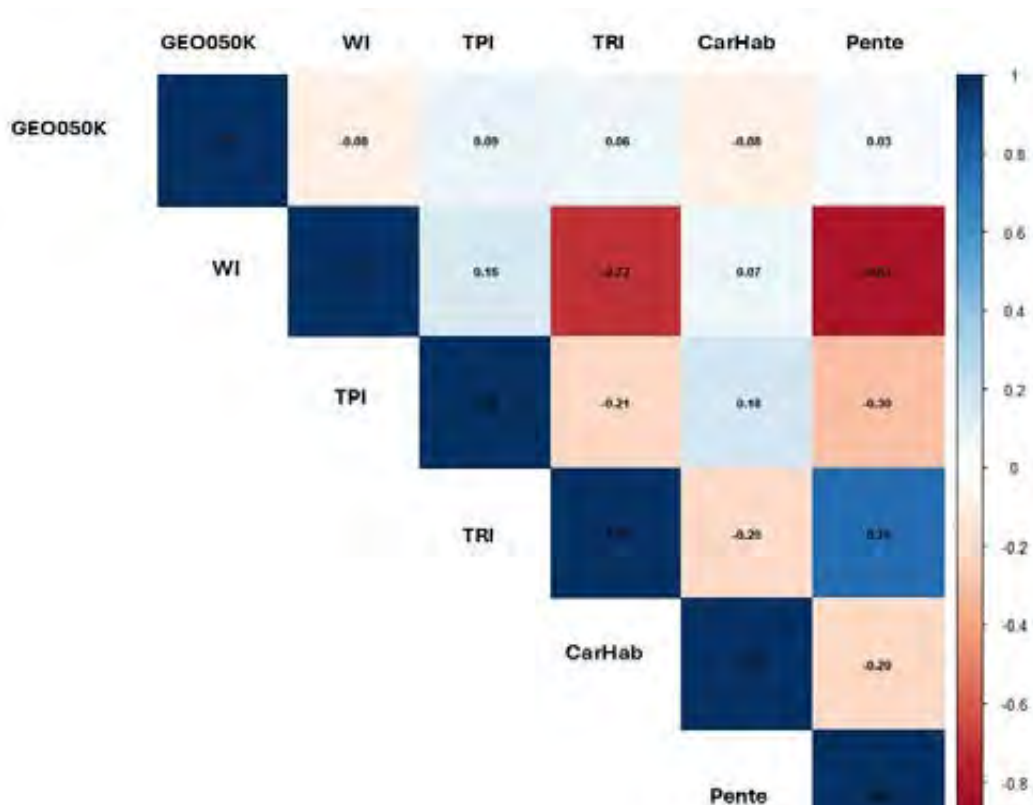


Figure 12 Matrice de corrélation des variables environnementales utilisées

3.2. Performances des modèles fondés sur les rasters monobandes

L'analyse des performances des modèles entraînés à partir de rasters monobandes met en évidence des comportements différenciés selon la variable environnementale considérée et la taille de l'échantillon d'apprentissage.

3.2.1. Effet de la taille d'apprentissage

De manière générale, l'augmentation de la taille d'apprentissage s'accompagne d'une amélioration progressive des performances et d'une diminution des écarts-types, traduisant une stabilisation du modèle. Pour l'ensemble des rasters, les performances obtenues avec $n = 5$ présentent une forte variabilité (écarts-types élevés, **Figure 13** **Figure 14**), indiquant une instabilité marquée lorsque l'apprentissage repose sur un nombre très restreint d'observations.

A partir de $n = 950$ (soit 25 % du jeu de données pour l'entraînement), les métriques se stabilisent plus nettement, et les gains supplémentaires observés pour $n = 1900$ et $n = 2852$ deviennent plus marginaux. Cette dynamique suggère qu'un volume intermédiaire de données suffit à capter l'essentiel du signal porté par les variables environnementales testées.

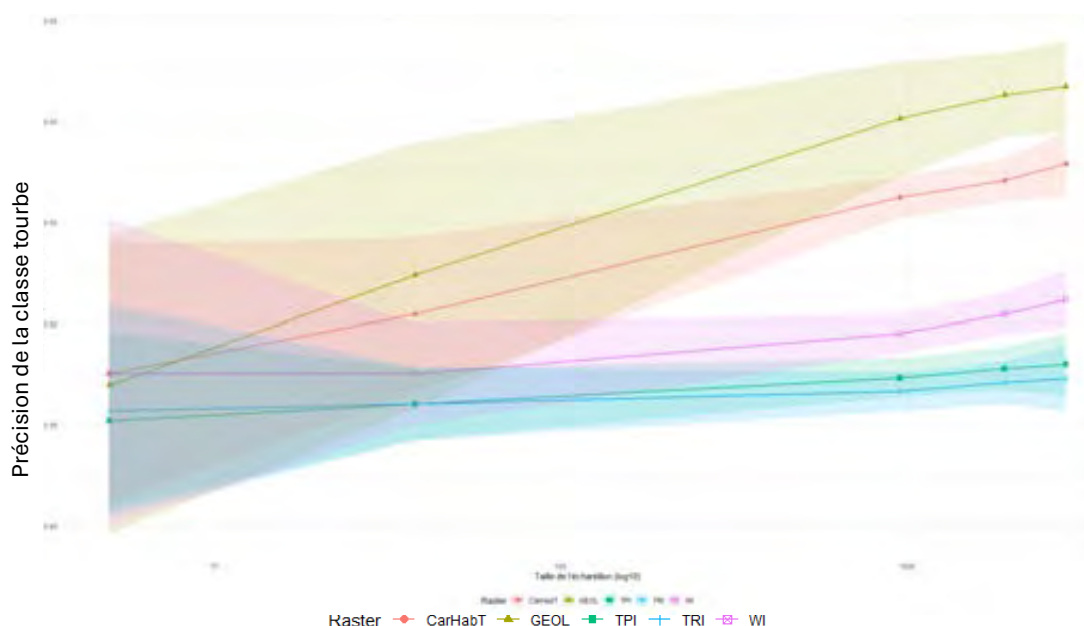


Figure 13 : Evolution de la précision pour la classe tourbe ; en abscisse tailles des échantillons en log10, en ordonnée performance moyenne du modèle, l'aplatissement de couleur représente l'évolution de la variance.

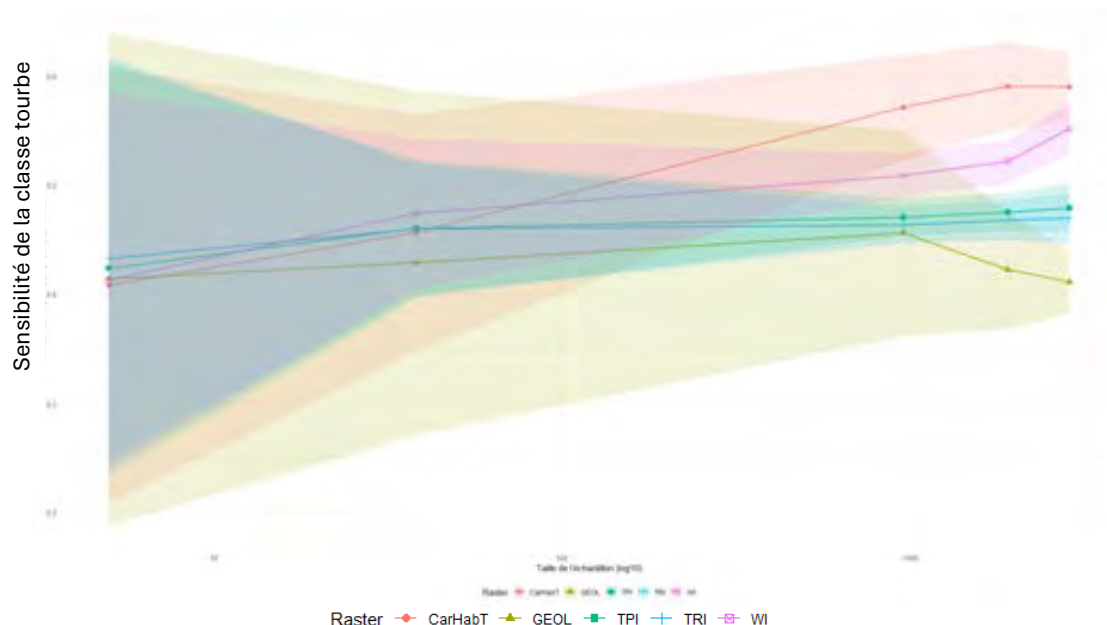


Figure 14 : Evolution de la sensibilité pour la classe tourbe ; en abscisse tailles des échantillons en log10, en ordonnée performance moyenne du modèle, l'aplatissement de couleur représentent l'évolution de la variance.

3.2.2. Comparaison des variables explicatives

Parmi les rasters monobandes, *CarHabT* (cartographie des habitats) présente les performances globales les plus élevées. L'accuracy progresse de 0.53 (n= 5) à 0.62 (n = 2852), tandis que la sensibilité atteint 0.59 et la précision 0.58 pour la plus grande taille d'apprentissage (Graphique supplémentaire en **ANNEXE 7**). Cette variable apparaît donc comme la plus discriminante pour distinguer les contextes tourbeux des contextes non tourbeux.

Le raster *Wetness Index* (WI) a également une progression régulière avec la taille d'apprentissage. L'accuracy augmente de 0.53 à 0.56 entre n= 5 et n= 2850, avec une amélioration notable de la sensibilité (0.41 à 0.55, **Figure 14**). Cette évolution indique que l'information hydrologique contribue de façon importante à la détection des zones tourbeuses, bien que ses performances restent inférieures à celles issues de la cartographie des habitats.

A l'inverse le raster *GEOL* présente un comportement contrasté. Si la précision atteint des valeurs relativement élevées (jusqu'à 0.62), la sensibilité diminue légèrement lorsque la taille d'apprentissage augmente (0.46 à n= 950 contre 0.41 à n= 2852). Ce profil suggère que la géologie permet d'identifier certains contextes favorables, mais qu'elle demeure insuffisante pour capter l'ensemble des situations tourbeuses.

Enfin, les indices morphologiques TPI et TRI affichent les performances les plus faibles et les plus stables, la sensibilité plafonne à 0.47-0.48 pour n= 2852. Ces résultats indiquent que, pris isolément, les descripteurs morphologiques ne permettent pas de discriminer efficacement la présence de tourbe à l'échelle régionale.

3.2.3. Stabilité du signal et interprétation écologique

L'analyse conjointe des performances et de leurs évolutions en fonction de la taille d'apprentissage met en évidence un signal environnemental variable selon les facteurs considérés.

La cartographie des habitats (CarHabT) apparaît comme la variable la plus structurante, suggérant que l'information biotique intègre déjà, de manière indirecte, une combinaison de conditions écologiques favorables aux milieux tourbeux. A l'inverse, les indices purement morphométriques (TPI, TRI) semblent porter un signal plus diffus, insuffisant pour expliquer à eux seuls la distribution observée.

Enfin, l'absence d'effondrement brutal des performances pour les tailles intermédiaires d'apprentissage suggère que les variables les plus informative (notamment CarHabT et WI) capturent des gradients environnementaux relativement généraux. Ce qui ferait écho à la mauvaise performance des indices morphométriques étant donné que la tourbe est parfois dépendante de la microtopographie. Néanmoins, l'amélioration progressive avec l'augmentation du nombre de points indique que la relation entre environnement et présence de tourbe demeure structurée par des interactions complexes nécessitant un volume de données substantiel pour être pleinement stabilisée.

3.3. Performances des modèles fondés sur des rasters multibandes

L'intégration simultanée de plusieurs variables environnementales dans des rasters multibandes améliore les performances des modèles par rapport aux approches monobandes. Cette amélioration se manifeste de manière cohérente pour l'ensemble des tailles d'apprentissage.

3.3.1. Effet de la taille d'apprentissage.

Comme observé pour les rasters monobandes, l'augmentation de la taille d'apprentissage entraîne une amélioration progressive des performances et une diminution des écarts-types. Les modèles entraînés avec $n=5$ présentent une variabilité importante, traduisant une instabilité liée au faible volume d'information disponible (**Figure 15**).

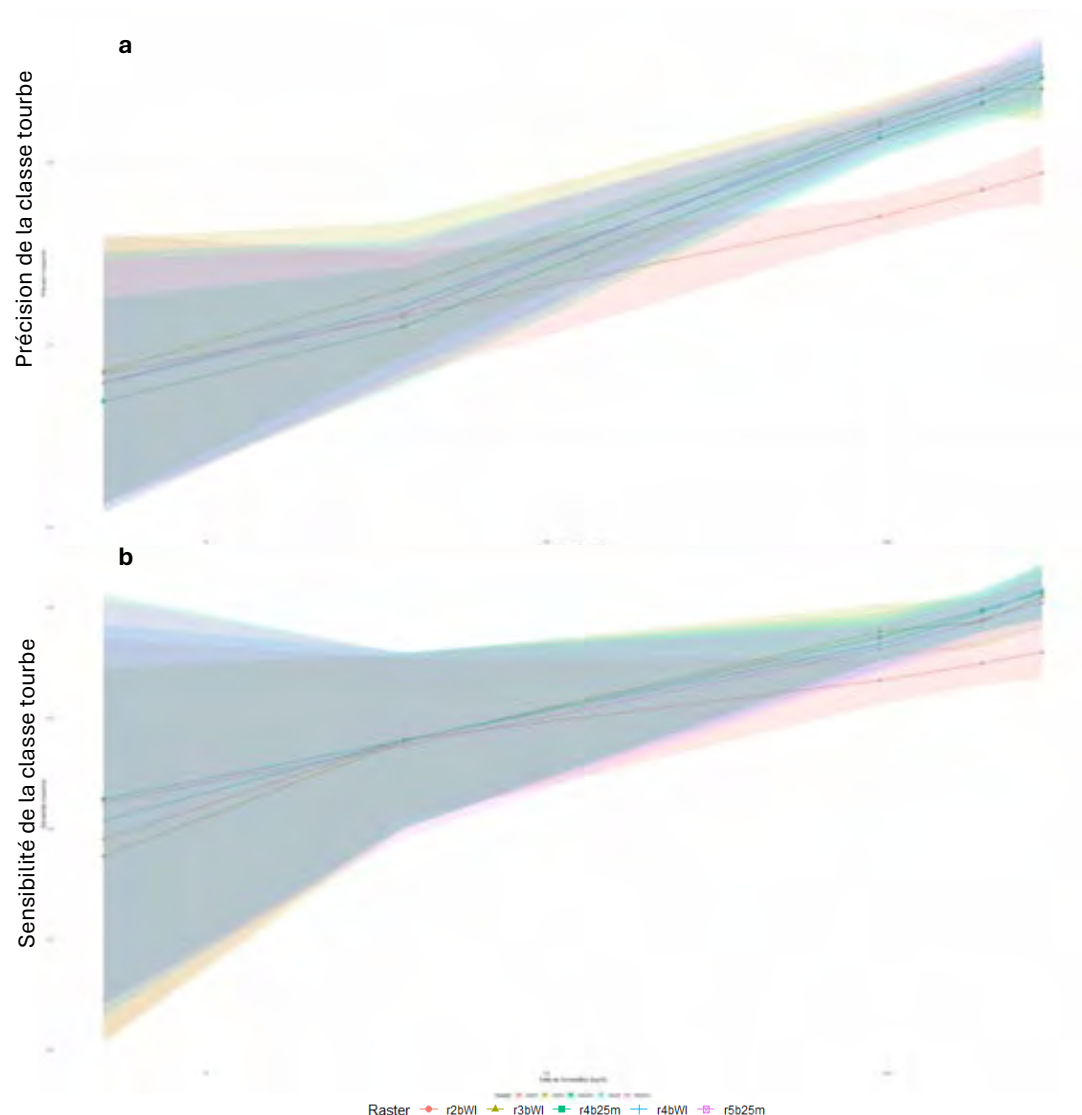


Figure 15 : Evolution des performances du modèle sur les rasters multibande. En abscisse tailles des échantillons en log10, en ordonnées performance moyenne des 1 000 répétitions, l'aplatissement de couleur représente la variance. **a.** Précision du modèle pour la classe tourbe ; **b.** Sensibilité du modèle pour la classe tourbe.

Le même cas de figure se retrouve à $n = 950$ (soit 25 % du jeu de données pour l'entraînement), les métriques deviennent nettement plus stables, et les gains supplémentaires entre $n = 1900$ et $n = 2852$ sont plus modérés. Cette convergence indique que les relations environnement-présence de tourbe sont captées de manière « robuste » dès lors qu'un volume intermédiaire de données est disponible.

Tableau 10 : comparaison des combinaisons multibandes, a taille d'apprentissage maximale (n= 2852)

Raster	Sensibilité	Précision	Accuracy
r2bWI	0.559	0.594	0.631
r3bWI	0.609	0.640	0.671
r4b25m	0.613	0.646	0.676
r4bWI	0.615	0.649	0.678
r5b25m	0.604	0.653	0.678

Il en ressort que la combinaison de 3 voire 4 rasters améliore la sensibilité et la précision pour la classe tourbe (**Tableau 10**). On gagne en effet 5 points en sensibilité comme en précisions avec la combinaison de variable biologique comme CarHabT avec des variables morphologiques.

3.3.2. Interprétation écologique et gain lié à la combinaison des variables.

Comparativement aux rasters monobandes, les combinaisons multibandes permettent un gain de performance (+2 points en sensibilité et +5 points en précision par rapport au simple raster CarHabT et en prenant en compte d'autres variables). Cette amélioration confirme que la distribution des milieux tourbeux ne peut être expliquée par un seul facteur environnemental, mais résulte de l'interaction entre la géologie, des conditions hydrologique, morphologiques et surtout ici par l'expression écologique intégrée dans la cartographie des habitats.

Utiliser systématiquement la cartographie d'habitats et la géologie et jouer sur le type de raster géomorphologique n'engendre pas de très grandes différences. En effet, entre l'utilisation du WI ou bien du couple TPI et TRI, il n'y a pas de réelle amélioration dans la classification des pixels en tourbe.

Il s'avère surtout que CarHabT semble conditionner à elle seule la classification des pixels en tourbe ou en non-tourbeux et que les rasters supplémentaires ne permettent qu'une légère discrimination.

3.4. Raster multibande retenu

Au regard des performances globales, les configurations à quatre bandes et celles à cinq bandes présentent les résultats les plus performants (sensibilité ~0.61 et précision ~0.65). Les écarts-types se recoupent néanmoins, laissant supposer que la variation de performance observée entre ces trois combinaisons n'est pas significativement différente les unes des autres. D'autant plus que r5b25m est surtout calculé à titre informatif car il combine, entre autres, WI et TRI, deux rasters fortement corrélés.

Nous avons donc retenu la combinaison r4b25m. Cette combinaison permet de simplifier les manipulations. En effet elles nécessitent, CarHabT, GEO050K ainsi que TPI et TRI. Ces deux derniers sont plus simples à obtenir que le Wetness-Index et moins sujet à des erreurs étant directement calculé du MNT. Ainsi, dans un souci de reproductibilité et de mise à jour nous considérons ce compromis comme acceptable.

4. Discussion

4.1. Limites de l'accuracy comme indicateur unique de performance

L'accuracy ou précision globale, constitue un indicateur synthétique largement utilisé pour évaluer les performances des modèles de classification. Toutefois, prise isolément, elle peut conduire à une interprétation biaisée des résultats, en particulier dans le cas de phénomènes spatiaux relativement rares ou spatialement hétérogènes.

Dans le contexte de la modélisation de la présence de tourbe, une accuracy élevée peut en partie refléter la capacité du modèle à identifier correctement les zones non tourbeuses, majoritaires dans le jeu de données. Un modèle pourrait atteindre une performance globale satisfaisante tout en restant insuffisamment performant pour détecter les contextes réellement tourbeux, qui constituent pourtant la cible principale de la démarche.

C'est pourquoi l'analyse conjointe de la sensibilité et de la précision est essentielle. La sensibilité renseigne sur la capacité du modèle à détecter effectivement les zones tourbeuses, tandis que la précision informe sur la fiabilité des prédictions positives. Dans une logique de veille environnementale, la sensibilité revêt une importance particulière, car l'enjeu principal réside dans la détection des secteurs potentiellement tourbeux, quitte à accepter une certaine proportion de faux positifs.

4.2. Pertinence d'un modèle détectant environ 60 % des occurrences de tourbes

Le modèle retenu (r4b25m) présente une sensibilité d'environ 0.61 et une précision d'environ 0.65. Autrement dit, un peu plus de 60 % des occurrences tourbeuses servant à la validation sont détectées, et 64 % des pixels prédits comme tourbeux le sont véritablement.

Ces performances apparaissent modérées au regard de certains travaux publiés dans la littérature, ou en règle générale, les classifications se font avec des précisions et sensibilité dépassant les 80 %. Toutefois, plusieurs éléments contextuels doivent être considérés.

Premièrement, les modèles très performants décrits dans la littérature s'appuient souvent sur des jeux de données plus homogènes, des contextes écologiques restreints ou des variables environnementales de très hautes résolution (par exemple issues de LiDAR). A notre échelle régionale, l'hétérogénéité géomorphologique, pédologique et hydrologique est particulièrement marquée, ce qui complexifie la discrimination. D'autant plus que nous ne cherchons pas à

discriminer les zones humides des zones sèches, mais des zones tourbeuses présentent dans des zones humides.

De plus, les rasters mobilisés dans cette étude capturent essentiellement des gradients environnementaux généralistes (géologie, humidité topographique sur 625 m², habitats générales). Ils permettent de modéliser des tendances régionales mais ne rendent pas compte de la microtopographie fine, des variations locales de nappe ou de dynamiques hydriques saisonnières. Or, la formation et le maintien des milieux tourbeux peuvent dépendre de conditions micro-topographiques très localisées (microdépressions, replats imperceptibles à 25 m, discontinuités hydrauliques fines).

Cette déduction est par ailleurs étayée du fait de la stabilité des modèles lorsque l'on utilise seulement 25 % du jeu de données pour l'entraînement du modèle. Les rasters utilisés permettent de déterminer des combinaisons de paramètres qui permettent d'orienter la classification du modèle vers des zones préférentiellement tourbeuses mais n'a pas de variables assez fines pour améliorer les paramètres de classification.

La résolution spatiale de 25 m, bien qu'adaptée à une analyse régionale, peut donc lisser des structures déterminantes à plus petite échelle. Il est probable qu'une amélioration des performances passerait par l'intégration de données altimétriques plus fines, permettant de mieux caractériser la microtopographie et les indices d'humidité locaux.

Dans cette perspective, les performances obtenues doivent être interprétées non comme une limite méthodologique, mais comme le reflet du compromis entre emprise régionale, résolution spatial et disponibilité des données.

4.3. Complémentarité avec la précartographie kilométrique

La carte de veille issue du machine learning ne se substitue pas à la précartographie réalisée à l'échelle de la maille kilométrique. Elle en constitue un prolongement opérationnel.

La précartographie reposait sur une approche experte et déductive, produisant un indice de potentialité tourbeuse synthétique à l'échelle de un km². Cette approche permettait une lecture stratégique du territoire, mais homogénéisait l'information à l'intérieur de chaque maille.

A l'inverse, la carte de veille produite à 25 m restitue une mosaïque de conditions environnementale 'fines' au sein même des mailles kilométriques. Elle permet ainsi d'identifier, à l'intérieur d'une maille classée comme potentiellement favorable, les secteurs les plus susceptibles d'abriter de la tourbe.

Dans cette logique, les deux outils sont complémentaires. La précartographie fournit un cadre spatial stratégique et synthétique tandis que la carte de veille affine l'information et oriente les investigations de terrain à une échelle plus opérationnelle.

Ainsi, même avec une sensibilité de l'ordre de 60 %, le modèle remplit son rôle d'outil d'aide à la décision. Il ne vise pas à produire une cartographie exhaustive et définitive des milieux tourbeux, mais à hiérarchiser spatialement les probabilités de présence et à optimiser l'effort de prospection.

Chapitre 4 : Valorisation des données et réseau d'acteurs

1. Bancarisation des données pédologiques : DoneSol

1.1. Présentation générale

La base de données DoneSol, coordonnée par l'INRAE, constitue un outil central pour la bancarisation et la structuration des données pédologiques. Conçue pour harmoniser les pratiques de saisie et de gestion des informations relatives aux sols, elle permet de décrire de manière standardisée les profils pédologiques en intégrant à la fois des données générales de site et des informations détaillées sur les horizons. Cette structuration favorise la comparabilité des données saisies par différentes structures et leur valorisation dans des analyses à différentes échelles.

Dans son fonctionnement, DoneSol repose sur une organisation hiérarchique des informations. Chaque profil de sol est identifié de manière unique et décrit dans un premier temps par des variables générales relatives au contexte de surface (localisation, environnement, conditions d'observation...). Dans un second temps, la base permet une description fine des horizons pédologiques, enregistrés individuellement selon leur succession verticale. Pour chaque horizon, un ensemble de variables normalisées est renseigné, telles que la profondeur, la couleur selon la charte de Munsell, la texture, ou encore des indicateurs d'état hydrique et redoxique. Ces informations permettent une caractérisation précise des propriétés physiques et morphologiques du sol et de rendre compte de certains gradients dans des horizons similaires.

Dans le cadre du PRAT, l'utilisation de DoneSol s'inscrit dans une démarche de standardisation des données collectées sur le terrain ainsi que d'une diffusion simplifiée et une valorisation nationale des données produites. La saisie des données reste cependant limitée au formulaire de saisie initiale pour caractériser le profil puis le formulaire de saisie pour caractériser chacun des horizons. La saisie initiale est réalisée à partir d'un bordereau papier (**ANNEXE 8**), structuré de manière à distinguer clairement les informations générales du profil et celles spécifiques à chaque horizon. Ces données sont ensuite intégrées dans la base, assurant leur homogénéité et leur compatibilité avec d'autres jeux de données pédologiques à l'échelle nationale. Ce protocole garantit la robustesse des analyses ultérieures et facilite le partage des données entre acteurs.

Cependant, certaines variables spécifiques aux milieux tourbeux ne pouvant pas être prises en charge nativement par DoneSol des adaptations ont été nécessaires. Il s'agit des indicateurs spécifiques aux horizons histiques liés à la présence de la matière organique tels que

« l'altération de la matière organique »¹³, « la caractérisation des macrorestes végétaux » ou encore le « test de Von Post ». Afin de pallier cette limitation, ces informations sont stockées dans une base de données interne au conservatoire. L'interconnexion entre les deux systèmes est assurée par l'utilisation d'un identifiant unique, le « numéro profil base » issu de DoneSol, qui permet de relier l'ensemble des données dans le logiciel QGIS.

L'articulation entre DoneSol et la base interne permet de combiner standardisation nationale et prise en compte de spécificités locales. Cette approche hybride garantit à la fois la compatibilité avec les référentiels institutionnels et la richesse descriptive nécessaire à l'étude approfondie des sols tourbeux, renforçant ainsi la qualité et la valorisation des données produites dans le cadre du projet.

Tableau 11 : variables utilisées pour caractériser les horizons du sondage pédologique (les variables avec un * sont exclusivement enregistré en interne)

Code	Définition	Unité
Prof.	Profondeur : renseigne sur la profondeur d'apparition et de disparition de l'horizon	La profondeur est exprimée en centimètre
Couleur	Renvoie à l'atlas de Munsell, un système d'identification des couleurs des horizons	La couleur est exprimée en code Munsell
Texture	Estimation <i>in situ</i> des composants du sol (argile, sable, limon, organique).	En pourcentage et en lettre : A60l10s30 (Argile 60 %, limon 10 % et sable 30 %). Peut aussi directement être rattaché au triangle de texture à 16 classes de l'Aisne (cf code du triangle de texture de l'Aisne)
Structure	Renseigne sur la forme des composants. <i>Un horizon limoneux peut par exemple être grumeleux ou massique selon les paramètres environnants</i>	1 : particulière, horizon non cohérent sans agrégats constitué de particules individualisées et libres
		2 : grumeleuse, agrégats
		3 : massive, horizon cohérent sans agrégats
		4 : autre
%EG	Pourcentage d'éléments grossiers, teneur totale en éléments grossiers dans l'ensemble de l'horizon et de plus de 2 mm	Exprimé en pourcentage <i>Remarque : la nature des éléments grossiers peut-être intéressante à renseigner</i>
Tac.	Tâche , renseigne sur la présence et la nature des tâches dans l'horizons	1 : Oxydation
		2 : Réduction
		0 : Pas de tâche
Abo.	Abondance , renseigne sur le pourcentage de tâches d'oxydoréductions observées dans l'horizons	1 : < 5 %
		2 : 5 à 15 %
		3 : 15 à 40 %
		4 : > 40 %
Hum.	Humidité , appréciation de l'état d'humidité de l'horizon au moment de la description	1 : Sec
		2 : Frais
		3 : Humide
		4 : Saturé
Comp.		1 : pénètre sans effort

¹³ L'altération de la matière organique est renseignable dans DoneSol mais pas dans le même formulaire sur la caractérisation de l'horizon. Son enregistrement nécessite au préalable la création d'UTS.

	Compaction , renseigne sur la compacité de l'horizon	2 : avec effort 3 : incomplètement 4 : pas ou quelques mm
Friab.	Friabilité de l'échantillon	1 : ne s'effrite pas 2 : sous forte pression 3 : s'effrite facilement 4 : très légère pression
Alt. MO*	Altération de la Matière Organique , renseigne sur l'état de la MO présente dans l'horizon	1 : végétaux identifiables 2 : identifiable avec des traces de décomposition 3 : peu d'organes végétaux identifiables 4 : non identifiable
MacrR*	Macrorestes , renseigne sur les types de matériaux végétaux morts et identifiables dans l'horizon	Chaine de texte
VPost*	Von Post , test permettant d'estimer l'état de conservation/dégradation de l'histosol	Code H1 à H10, cf test Von Post

Remarque :

- La **texture** est normalement une approche granulométrique de l'horizon. Le référentiel est construit sur des horizons minéraux, donc sur la fraction de sable, limon et argile présent. Lorsqu'il y a une fraction organique, la texture devient caduque. Nous renseignons alors 'ND' dans DoneSol. Nous avons cependant des horizons bien spécifique tel que des limons fibriques ou encore des tourbes en mélange avec une fraction minérale de sédiment. Nous indiquons en interne la texture de l'horizon en considérant la fraction organique comme une texture au même titre que l'argiles, le sable et le limon.
- La **structure '4 : autre'**, quand elle est attribuée à un horizon histique, est enregistré dans DoneSol avec le numéro '**14 : Fibreuse, développées à partir d'un matériel essentiellement végétal, composé surtout de résidus organiques fibreux**'.

1.2. Retour d'expériences, limites et leviers d'améliorations DoneSol

La bancarisation des données constitue une étape essentielle pour obtenir des jeux de données standardisés, transmissibles et exploitables avec un minimum de retraitement. Dans ce cadre, DoneSol permet effectivement de produire des tables structurées, facilitant les analyses ultérieures. Notre expérience d'utilisation met cependant en évidence plusieurs limites, notamment en termes d'ergonomie, de temps de saisie et d'accessibilité des données.

Un processus de saisie fragmenté

Le processus de saisie est étroitement lié à l'interface de DoneSolWeb4, qui impose un enregistrement manuel sans possibilité, à l'heure actuelle, d'import automatisé. Cette contrainte entraîne une double saisie des informations (relevées terrain sur support papier, puis intégration numérique), augmentant mécaniquement le temps de traitement ainsi que le risque

d'erreurs. A titre de comparaison, des dispositifs permettant l'import de tables attributaires comme dans le cadre du SINP, offriraient des perspectives d'automatisation intéressantes, notamment *via* l'utilisation de formulaires numériques directement sur le terrain et un module d'import de CSV sur DoneSolWeb4.

La procédure de bancarisation reste également très segmentée et manque de perméabilité entre les outils. Ainsi la saisie des données nécessite successivement : la saisie des informations dans un bordereau, la géolocalisation des sondages, le passage par QGIS pour l'extraction des coordonnées en Lambert 93, la création du profil et des horizons dans DoneSolWeb4, la récupération du « numéro de profil base » et son apport dans QGIS. Il permet ainsi d'enregistrer les variables non prises en compte dans DoneSol. A cela s'ajoute la nécessité de solliciter le service géo-informatique du CEN pour effectuer les extractions et les jointures entre tables. Ces multiples étapes et allers-retours constituent une source potentielle d'erreurs et représentent un investissement temporel non négligeable pour des informations en grande partie redondantes.

Affiliation interne des données

L'attribution des sondages repose sur plusieurs éléments (auteur, structure, numéro d'étude). Dans le fonctionnement actuel, si ces informations ne sont pas explicitement renseignées et validées lors de l'enregistrement, le sondage reste accessible uniquement *via* le compte de la personne l'ayant saisi. Il ne remonte alors pas lors des extractions réalisées à l'échelle de la structure.

Cette situation a entraîné une forme de perte « fonctionnelle » de données, dans la mesure où celles-ci sont bien enregistrées en base mais difficilement mobilisables par les autres membres de l'équipe. Des évolutions ergonomiques pourraient être envisagées pour limiter ce type de situation, par exemple au travers une validation implicite que le compte qui saisit est automatiquement l'auteur visible si rien n'est renseigné ou, de manière plus contraignante, en rendant obligatoire la complétion de ces informations avant tout enregistrement suivant.

Un accès conditionné aux données

Bien que la base administrée et hébergée sur une infrastructure publique, les données pédologiques restent la propriété des structures qui les produisent. Leur diffusion nécessite donc des démarches spécifiques, ce qui limite leur mobilisation dans des contextes d'études ou de gestion nécessitant une certaine réactivité.

Malgré ces contraintes, il convient de souligner que les données produites en sortie sont structurées et homogènes, constituant un atout réel pour les analyses et la valorisation scientifique des informations pédologiques.

2. Valorisation des données cartographiques et flore

Les productions cartographiques seront pour la plupart déposées en libre accès sur Géo2France, une plateforme du service public de la donnée en région Hauts-de-France. Il s'agira des deux rasters d'interpolations ainsi que la carte de veille et la précartographie. La donnée vectrice, plus complexe par la nature des formulaires d'enregistrement et plus « sensible », seront transmis à la demande. Ces points contiendront les informations essentielles et communes aux 3803 sondages, c'est-à-dire : *présence/absence de tourbe ; épaisseur de tourbe ainsi que son classement PRAT*. Un shapefile supplémentaire contenant les horizons des profils enregistrés sur DoneSol pourront aussi être transmis.

Dans le cas des observations ponctuelles de la flore et des habitats, une valorisation automatique est effectuée. Que ce soient des espèces caractéristiques des tourbières alcalines ou des végétations associées, leurs enregistrements sont faits dans la base de données interne du conservatoire. Ces enregistrements suivent les formulaires de saisie du SINP, la donnée est ainsi transmise régulièrement aux services de l'état et est rapidement accessible par le CBN ou d'autres structure naturaliste.

3. L'animation du réseau d'acteurs

3.1. Démarchage de contacts internes au CEN

En croisant la précartographie d'orientation des prospections du PRAT avec les sites du CEN, une centaine d'espaces naturels en convention ont pu être identifiés. Une vérification manuelle au sein des plans de gestions (PDG) a permis de mettre en évidence la présence éventuelle de tourbe ou de relevés pédologiques présent dans les PDG qui n'aurait pas été renseigné en base.

Lorsque les données étaient manquantes ou nécessitaient des précisions, des échanges ont été menés avec les chargés de mission territoriaux (CMT) ou les chargé d'études scientifiques (CES). Cette étape a permis d'identifier et de renseigner plusieurs sites comme celui de Daours (80) où plusieurs dizaines de sondages avaient été réalisés il y a quelques années mais n'avaient jamais été renseignés en base.

En interne ces données ont été valorisées au sein d'une base de données pédologiques permettant une pérennisation des données produites notamment dans le cadre d'une utilisation future au sein des plans de gestion.

3.2. Démarche sur des sites gérés (hors sites CEN)

Des échanges ont été engagés avec plusieurs structures partenaires afin de croiser les connaissances et affiner la prospection (**Tableau 12**), que ce soient des institutions publiques comme les Syndicat Mixte ou les Parc naturels régionaux ou des professionnels privés.

Ces prises de contact ont permis de renforcer les liens entre les différents acteurs du territoire sur les thématiques tourbières, de partager les connaissances existantes (notamment dans le cadre du PRAT) avec la présentation de la carte de précartographie afin d'orienter la prospection et avoir leurs avis d'experts sur les secteurs à enjeux.

Un exemple marquant est celui d'une mare circulaire, de 100 m de diamètre, située en forêt domaniale de Saint-Amand-les-Eaux. Ce secteur, signalé par le PNR Scarpe-Escaut, s'est révélé particulièrement atypique : présence de boulaies noyées, de tremblants de sphaignes et de joncs en contexte forestier tempéré de chênes et de hêtres.

Les structures contactées dans le cadre de cette étude constituent également des partenaires privilégiés pour la diffusion des résultats, la valorisation des données produites et la mise en œuvre d'actions futures sur les trois prochaines années.

Un plus large panel d'acteur est susceptible d'être contacté ultérieurement, notamment les SAGE et structures GEMAPI afin de sensibiliser sur la présence de tourbe dans leur secteur. Cette démarche pourra aussi être menée auprès des commissions locales de l'eau (CLE) afin de sensibiliser directement des élus.

3.3. Accès aux terrains et relevés en zones privées

La très grande majorité des sondages ont cependant été réalisés en dehors des sites en gestion, sur tout un panel de parcelles privées et publics, sans gestions et gestionnaires identifiés, plus ou moins faciles d'accès.

Dans ces zones l'accès aux parcelles publiques a été privilégié. Dans certains cas les communes ont été contactées afin de faciliter l'accès dans le cadre de contexte local particulier (e.g. pratique cynégétiques) ou des contextes potentiellement complexe soulevés par les partenaires. Ce contact de proximité a permis un inventaire de terrains plus fin comme sur la commune de Quend où la commune a permis la mobilisation d'un technicien communal. Ces prises de contacts ont permis également l'accès à des sites fermés (ENS des Malvaux ; Grand Marais ; 59) ou l'accès à la circulation sur des voies interdites au public (Voies Navigables de France (VNF) berges le long de la Sensée).

Un travail similaire a été mené lorsque cela était possible avec les propriétaires privés. Ainsi lors de la réunion de rentrée sur le terrain en 2025 plusieurs propriétés privées en vallée de l'Automne nous ont été rendues accessibles pour l'inventaire révélant, des enjeux tourbeux notables.

Une co-prospection nous a aussi permis d'accéder aux marais du Lys (Oise – 60) en compagnie de Mélanie Poirier de la fédération de chasse de l'Oise qui réalisait dans le même temps le suivi de la Gesse des marais. Les sondages ont ainsi permis de mettre en évidence quelques poches tourbeuses mais avant tout un marais paratourbeux avec un ressuyage estival.

Tableau 12 : Récapitulatif des structures et acteurs du territoire contactés en 2025 pour la prospection du PRAT

Type de structure	Nom de la structure	Personnes	Pourquoi contacté	Sites concernés
Interne	CEN Hauts-de-France	—	Analyse des données existantes (présence de tourbe, relevés pédologiques, PDG), identification des besoins d'information	Environ 100 sites présent dans les mailles de prospection du PRAT n'avaient pas de sondages numérisés voir aucun
Institution publique	Syndicat mixte de la baie de Somme	Benjamin Blondel	Échange d'informations / expertise locale / orientation de prospection	Baie de Somme et marais arrière littoraux autour de Rue
	PNR Oise-Pays de France	Thibaud Daumal, Jean-Luc Hercent		Territoire PNR Oise-Pays de France
	PNR Caps et Marais d'Opale	Céline Dubreuil Charlotte Valantin Alexis Kheiter Mathieu Lorthiois		Caps et Marais d'Opale, Guines et Audomarois
	PNR Scarpe-Escaut	Camille Palopoli Aurélien Thurette Bruno Lame		Plaine de la Scarpe-Escaut
	Eden 62	Vincent Pillon Nicolas François		Guines, Estuaire de Canche, Condette
	Département (59)	Morgane Jacob Corine Sauvage	Autorisation d'accès	ENS Les Malvaux – Grand Marais (vallée de la Sensée)
	VNF (Voies Navigables de France)	Julien Avonts Manuel Bas		Berge du canal de la Sensée
Collectivité locale	Mairie de Quend	Secrétariat (puis technicien)		Marais communale du Paradis
	Mairie de Forest-Montier Mairie de Favières Mairie de Ponthoile	Maire Maire Maire		Marais communale de Neuville Marais communale de Favières Marais communale de Ponthoile
Privé	Propriétaire foncier	—		Vallée de l'Automne (200 ha forêt et marais)
	Garde-chasses	—		Près des étangs Marais de Saily Bray Marais communale de Favières
	Ecométrum	Romain Dupéré	Echange d'informations	Pas-de-Calais et Nord
Institution / réseau	Fédération de chasse du 60	Mélanie Poirier (OIZH'EAU)	Mise en relation pour accès site, couplage suivis écologiques et sondages	Marais du Lys

Tableau 13 : Liste des contacts de 2025

Nom Prénom	Structure	Poste	Mail
Benjamin Blondel	SMBSGLP	Chargé d'études Milieux Naturels/Référent scientifique	benjaminblondel@baiedesomme.fr
Thibaud Daumal,	PNR OPF	Chargé de mission Patrimoine naturel, Natura 2000, eau et carrières	t.daumal@parc-oise-paysdefrance.fr
Jean-Luc Hercent	PNR OPF	Chargé de mission Patrimoine naturel	jl.hercent@parc-oise-paysdefrance.fr
Céline Dubreuil	PNR CMO	Coordinatrice planification écologique	CDubreuil@parc-opale.fr
Charlotte Valantin	PNR CMO	Chargée de mission agriculture et préservation des milieux PMAZH Marais Audomarois	cvalantin@parc-opale.fr
Alexis Kheiter	PNR CMO	Animateur Natura 2000	AKheiter@parc-opale.fr
Mathieu Lorthiois	PNR CMO	Chargé de missions préservation du patrimoine – marais Audomarois Site Ramsar – Réserve de biosphère du marais Audomarois	MLorthiois@parc-opale.fr
Camille Palopoli	PNR SE	Chargé de projet Life Anthropofens	c.palopoli@pnr-scarpe-escaut.fr
Aurélien Thurette	PNR SE		Aurelien.thurette@pnr-scarpe-escaut.fr
Bruno Lame	PNR SE	Technicien – SAGE Scarpe aval	b.lame@pnr-scarpe-escaut
Vincent Pillon	Eden 62	Chargé de mission Boulonnais / Calaisi Sud	Vincent.pillon@eden62.fr
Nicolas François	Eden 62	Chargé de mission RNN Baie de Canche, RNR Marais de Condette et Dunes du Mt-St-Frieux	Nicolas.francois@eden62.fr
Morgane Jacob	Département 59	Chargé de mission Valenciennois – ENS des Malveaux	Morgane.jacob@lenord.fr
Corine Sauvage	Département 59	Garde responsable de l'ENS des Malveaux	Corine.sauvage@lenord.fr
Julien Avonts	VNF	Responsable adjoint de l'unité territoriale Escaut – St Quentin	Julien.AVONTS@vnf.fr
Manuel Bas	VNF	Responsable territoire du côté de Féchain	—
Romain Dupéré	Ecométrum		contact@eco-metrum.fr
Mélanie Poirier (OIZH'EAU)	Fédération des Chasseurs de l'Oise	Chargée d'études Zones humides	m.poirier@fdc60.fr
Mr Jean-Luc Martin	Mairie de Forest-Montiers	Maire	—
Election, nouveau maire	Mairie de Favières	—	—
—	Mairie de Quend	—	—
Mr. Amara	Prés des étangs	Garde-chasse	—
Michael (Pas le nom entier)	Marais de Sailly Bray	Garde-chasse	—
Election, nouveau maire	Marais de Ponthoile	—	—

FICHES ENVELOPPES TOURBEUSES

Carte 10 : Localisation des enveloppes tourbeuses travaillées sous forme de fiche en 2025



Légende des sondages pédologiques schématisés (Référentiel pédologique 2008, extrait) :

Couleur	Acronyme	Intitulé
#ffffcc	A	Horizons A
#806745	A-h	Horizons A plus humifère que la norme
#a9d8ea	G	Horizons réductiques G
#4f7478	G-h	Horizons réductiques G plus humifère que la norme
#c7eae5	g	Horizons rédoxiques
#000000	Ha	Histosols assainis
#d78c00	Hf	Histosols fibriques
#b97800	Hm	Histosols mésiques
#332304	Hs	Histosols sapriques
#543005	H ND	Histosols non déterminé
#31454a	Mli	Matériaux non holorganique
#e0e0e0	ND	Non déterminé

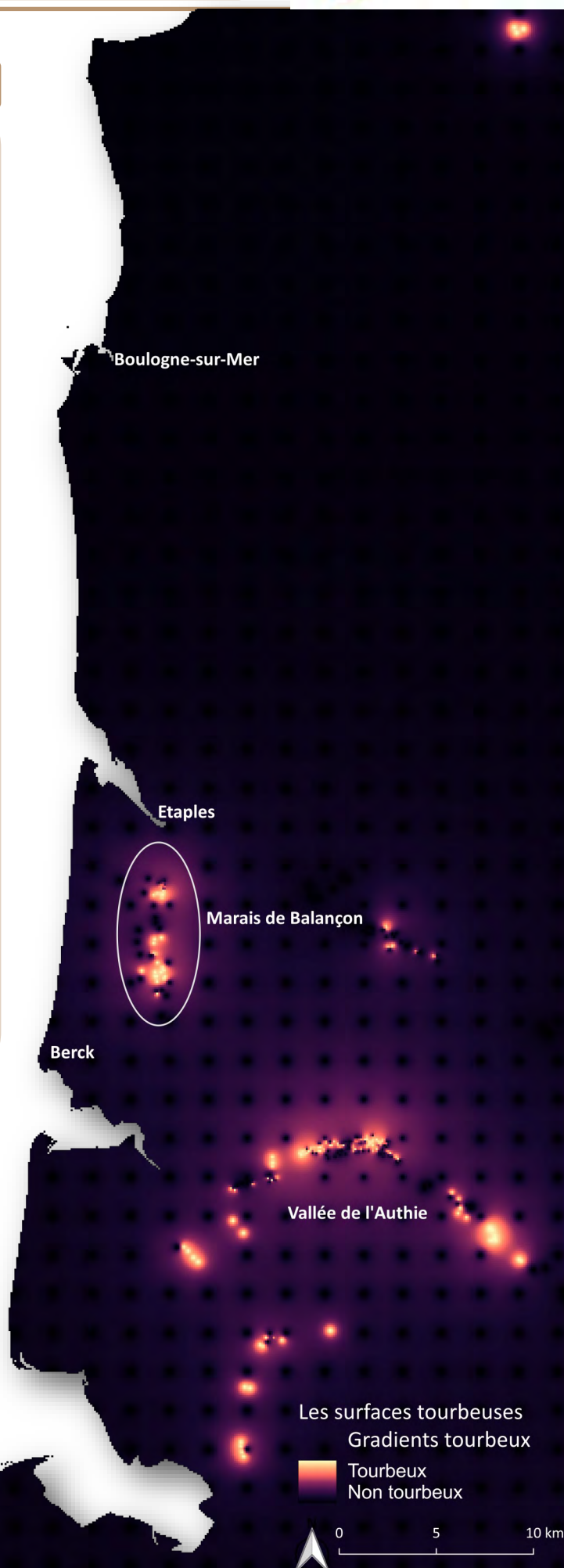
Les couleurs ont été sélectionnées arbitrairement dans le cadre de la schématisation et ne s'appuie sur aucun référentiel

Enjeux régionaux

Les marais de Balançon constituent le complexe tourbeux arrière-littoral le plus important de la côte d'Opale et l'un des mieux conservés des Hauts-de-France. Dans un contexte régional de plaines calées entre falaises fossiles et cordons dunaires, ce site s'inscrit dans le continuum des grands systèmes tourbeux picards et du Boulonnais (Life Anthropofens, s.d.-a). Il se distingue par un fonctionnement des nappes et des eaux de surfaces encore relativement bon, contrairement aux marais voisins de Rue ou du Vieux-Quend, plus morcelés et dégradés.

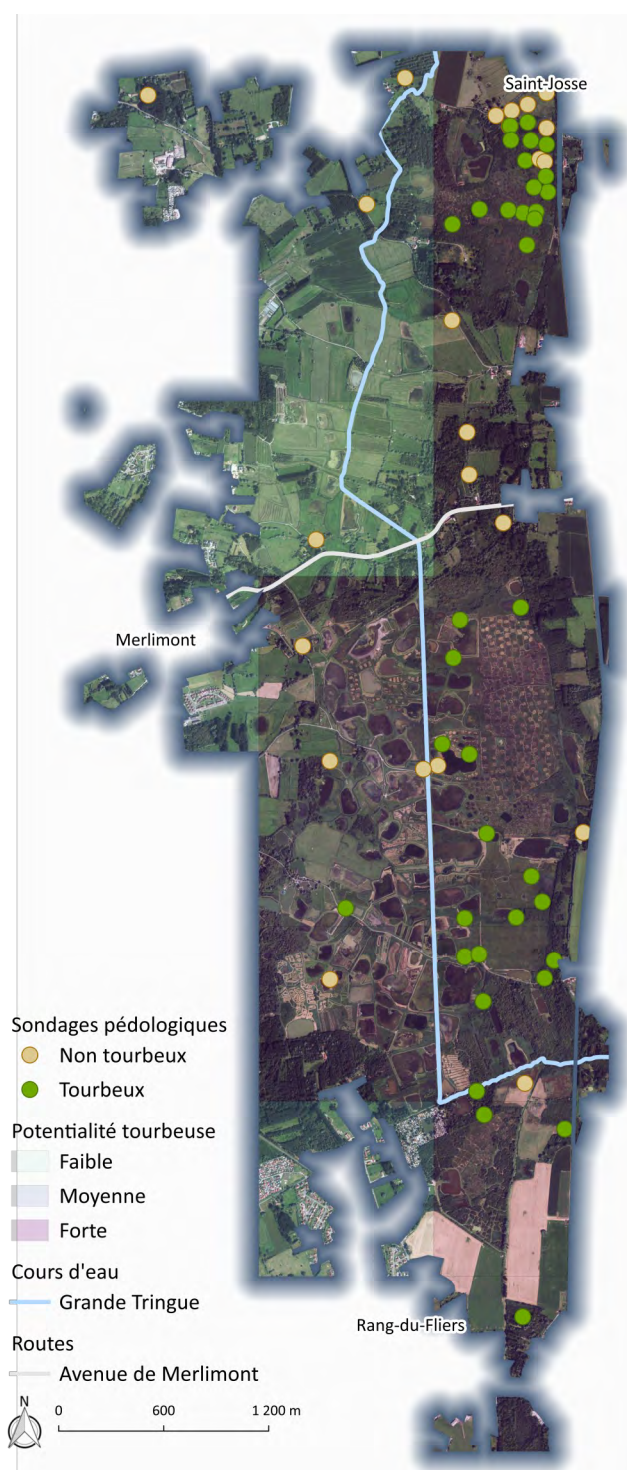
Ceinturés par les estuaires de la Canche et de l'Authie, deux vallées anciennement tourbeuses mais aujourd'hui fortement dégradées par drainage et eutrophisation, les marais de Balançon conservent un fonctionnement écologique permettant le maintien d'espèces végétales turfigènes rares (*C. hostiana*, *S. scorpioides* ou encore des végétations de tremblants tourbeux alcalins) et la production de tourbes absentes ou résiduelles dans les enveloppes voisines. Ces enjeux pédologiques et spécifiques renforcent son rôle dans les objectifs de conservation des tourbières alcalines.

Néanmoins, l'équilibre reste fragile face à la dégradation de la qualité des approvisionnements hydriques, et les drainages liés aux activités périphériques (urbanisation, agriculture intensive etc....).



I. Situation générale du site

- Marais arrière littoral de la côte d'opale, les marais de Balançon se répartissent sur la commune de Saint-Josse pour la moitié Nord et la commune de Merlimont pour la moitié Sud. Cette grande zone humide est bloquée à l'Est par les falaises fossiles du rebord du plateau Artois et à l'Ouest par le cordon dunaire de la côte.
- Ce site Natura 2000 est « composé de zones drainées dans sa périphérie et de zones tourbeuses au centre principalement utilisées pour la chasse à la hutte où plans d'eau, tremblants, roselières, gouilles et fossés s'entremêlent. » (LIFE Anthropofens). Le canal de la Grande Tringue découpe le marais dans son axe Nord-Sud et permet l'évacuation des eaux en direction de l'estuaire de la Canche (au Nord). Les marais sont coupés au centre dans un axe Est-Ouest par l'avenue de Merlimont.



II. Prospection du PRAT

- **14 mailles** ont été prospectées en 2025

Potentialité tourbeuse des mailles	Mailles prospectées validées tourbeuses	Mailles prospectées invalidées tourbeuses
Faible	Ø	1
Moyenne	Ø	2
Forte	7	4

- La superficie prospectée est de 10,88 km² dont **5,87 km²** considérés comme **avérés tourbeux**.
- **59 sondages** ont été réalisés, dont 33 sont déterminants tourbeux.

La **distribution** des sondages est **hétérogène**. Les sondages **déterminants tourbeux** se concentrent dans la **partie Est des marais**. Les sondages **non-déterminants** sont plutôt présents en **périphérie** et **d'autres séparent les deux pôles tourbeux**.

III. La pédologie

Catégorie PRAT*	Nombre de sondages
Non tourbeux	26
Tourbe de surface (dT1)	29
Tourbe de subsurface (dT2)	1
Tourbe 'profonde' (dT3)	0
Para-Tourbière (dT4)	3

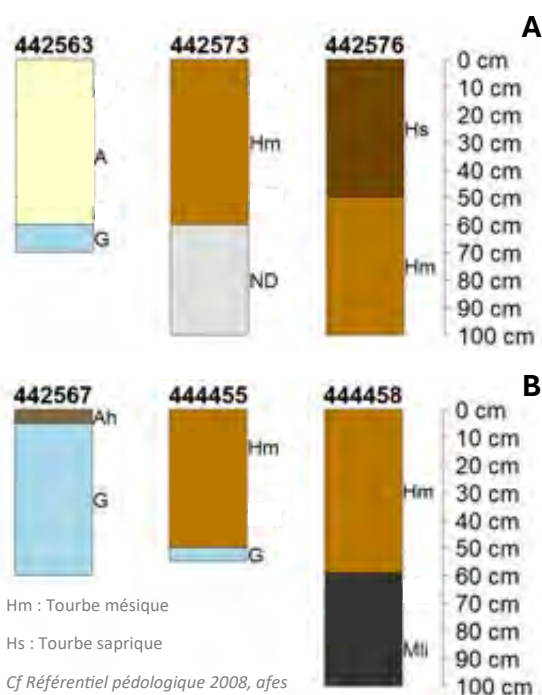
*Cf le rapport d'activité du PRAT 2025

Les marais de Balançon semblent retenir deux types de sol de surface séparés schématiquement par la Grande Tringue.

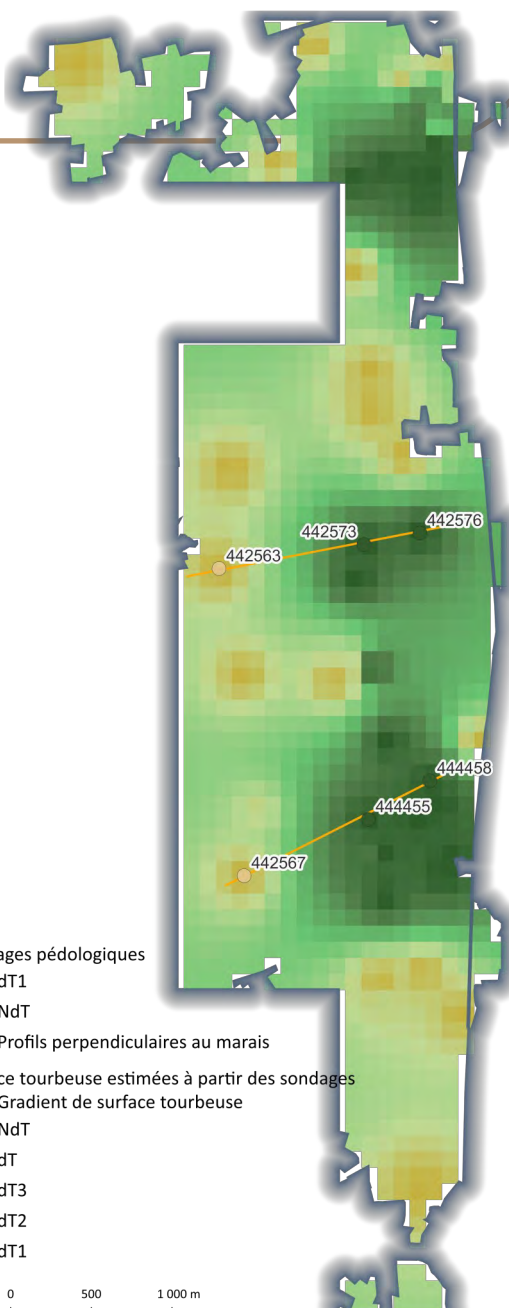
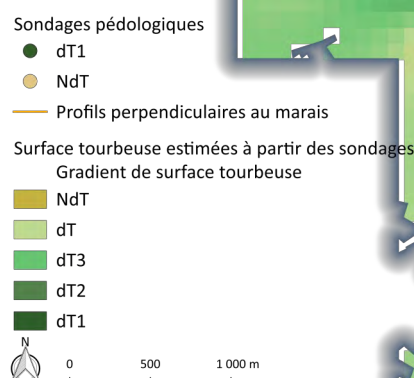
A l'Ouest, un sol de surface sableux, avec rapidement du sable limoneux bleu, caractéristique des zones humides saturées en eau de manière permanente permettant la mise en place de phénomène de réduction. Bien que non tourbeux, nous retrouvons dans ces horizons de subsurfaces, de nombreuses fibres végétales (*Carex* sp., fibres non déterminées).

A l'Est, les sols semblent présenter des conditions plus favorables à la formation de tourbe et/ou au maintien de cette dernière. D'importantes enveloppes tourbeuses très bien conservées (fibrique)s à dégradées (sapriques) se répartissent dans un axe Nord-Sud, coincé entre la ligne de chemin de fer à l'Est et la Grande Tringue à l'Ouest.

Ces enveloppes tourbeuses s'accompagnent par des végétations et espèces typiques des zones turfigènes des Hauts-de-France.



- Les sondages déterminants 1 se caractérisent pas une épaisseur de plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur dès la surface.
- Si certains sondages vont être tourbeux sur tout le premier mètre (442576), d'autres vont reposer sur des limons (442573).
- Il apparaît y avoir un gradient tourbeux, avec la moitié Est tourbeuse et la moitié Ouest plus sablo-limoneuse.



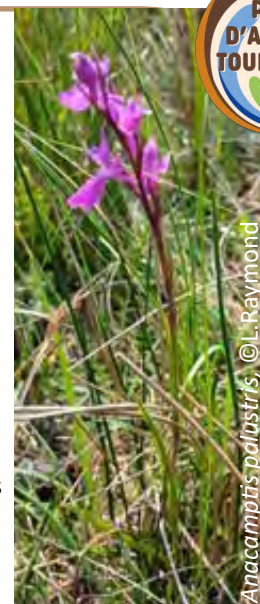
IV. Flore et habitats tourbeux de la région Hauts-de-France

Les marais de Balençon sont des marais arrières littoraux à la flore riche et typique des tourbières de la région. De nombreuses espèces du Lot1 (cœur turfigène) sont retrouvées régulièrement.

Les espèces présentées ici ont toutes été aperçues sur les 10 dernières années. Les espèces en gras ont été aperçues en 2025.

Lot 1 : Espèces de cœur turfigène

Les données espèces sont majoritairement concentrées dans le marais de Villiers (au Nord des marais de Balençon). Il s'agit de la zone la mieux connue du marais du fait de sa gestion par le conservatoire depuis 1999. Elle a également fait l'objet de travaux de restauration dans le cadre du projet Life Anthropofens.



Anacamptis palustris, © L. Raymond

Taxon*	Nom commun	Rareté	Menace	enjeux_reg
Anacamptis palustris (Jacq.) R.M.Bateman, Pridgeon & M.W.Chase, 1997	Orchis des marais	E	VU	3,00
Campylium stellatum (Hedw.) Lange & C.E.O.Jensen	Campylie étoilée ; Hypne en étoiles	R	LC	1,00
Carex diandra Schrank, 1781	Laïche arrondie	RR	VU	4,00
Carex hostiana DC., 1813	Laïche blonde	RR	VU	3,00
Carex lasiocarpa Ehrh., 1784	Laïche filiforme	R	NT	3,00
Carex lepidocarpa Tausch, 1834	Laïche à fruits écailleux	AR	LC	1,00
Cladium mariscus (L.) Pohl, 1809	Marisque	AR	LC	1,00
Comarum palustre L., 1753	Comaret des marais	RR	VU	3,00
Eleocharis quinqueflora (Hartmann) O.Schwarz, 1949	Scirpe pauciflore ; Héléocharis pauciflore	R	NT	2,00
Eriophorum angustifolium Honck., 1782	Linaigrette à feuilles étroites (s.l.)	R	NT	1,00
Eriophorum angustifolium subsp. angustifolium Honck., 1782	Linaigrette à feuilles étroites	R	NT	1,00
Menyanthes trifoliata L., 1753	Trèfle d'eau ; Ménéyanthe trèfle-d'eau	R	NT	2,00
Pedicularis palustris L., 1753	Pédiculaire des marais (s.l.)	R	NT	2,00
Philonotis calcarea (Bruch & Schimp.) Schimp.	Philonotis du calcaire	E	EN	3,00
Plagiomnium elatum (Bruch & Schimp.) T.J.Kop.	Mnie élevée	RR	VU	3,00
Potamogeton coloratus Hornem., 1813	Potamot coloré	AR	LC	1,00
Scorpidium cossonii (Schimp.) Hedenäs	Scorpidie verdâtre	RR	VU	4,00
Scorpidium scorpioides (Hedw.) Limpr.	Scorpidie scorpion ; Hypne scorpion	RR	VU	4,00
Sparganium natans L., 1753	Rubanier nain	R	NT	3,00
Sphagnum subnitens Russow & Warnst.	Sphaigne presque brillante	R	LC	1,00
Utricularia bremii Heer ex Köll., 1839	Utriculaire de Bremi	RR	NT	3,00



Sparganium natans, © L. Raymond

Des espèces du lots 1 sont également retrouvées dans le reste du marais de Balençon comme *Anacamptis palustris* ou *Sparganium natans* localisées dans la partie Sud du marais de Balençon.

IV. Flore et habitats tourbeux de la région Hauts-de-France



Schoenus nigricans, ©L.Raymond

Lot 2 : espèces retrouvées associées aux milieux tourbeux (mais pas uniquement)

Taxon*	Nom commun	Rareté	Menace	Enjeux reg
Aneura pinguis (L.) Dumort.	Aneure grasse	AR	LC	1
Baldellia ranunculoides (L.) Parl., 1854	Baldellie fausse-renoncule	AR	LC	1
Calamagrostis canescens (Weber) Roth, 1789	Calamagrostide blanchâtre (s.l.)	AR	LC	1
Calamagrostis canescens subsp. canescens (Weber) Roth, 1789	Calamagrostide blanchâtre	AR	LC	2
Campylium protensum (Brid.) Kindb.	Campyllie allongée	R	LC	2
Carex appropinquata Schumach., 1801	Laïche paradoxale	R	NT	3
Carex nigra (L.) Reichard, 1778	Laïche noire (s.l.)	PC	LC	1
Carex pulicaris L., 1753	Laïche puce	RR	NT	1
Dactylorhiza incarnata (L.) Soó, 1962	Orchis incarnat (s.l.) ; Dactylorhize incarnat (s.l.)	AR	NT	2
Drosera rotundifolia L., 1753	Rosolis à feuilles rondes	RR	NT	1
Epipactis palustris (L.) Crantz, 1769	Épipactis des marais	AR	NT	2
Fissidens adianthoides Hedw.	Fissident faux-adiante	AR	LC	1
Hydrocotyle vulgaris L., 1753	Hydrocotyle commun ; Écuelle d'eau	PC	LC	1
Juncus subnodulosus Schrank, 1789	Jonc à tépales obtus ; Jonc noueux	AC	LC	2
Liparis loeselii (L.) Rich., 1817	Liparis de Loesel	RR	VU	3
Liparis loeselii var. loeselii (L.) Rich., 1817	Liparis de Loesel (var.)	E	VU	2
Lysimachia tenella L., 1753	Mouron délicat	AR	LC	1
Ranunculus lingua L., 1753	Grande douve	AR	LC	3
Schoenus nigricans L., 1753	Choin noirâtre	R	NT	2
Taraxacum palustre (Lyons) Symons, 1798	Pissenlit des marais	RR?	DD	2
Thelypteris palustris Schott, 1834	Fougère des marais	PC	LC	1
Valeriana dioica L., 1753	Valériane dioïque (s.l.)	AR	LC	1

Juncus subnodulosus, *Hydrocotyle vulgaris* et *Thelypteris palustris* se retrouvent communément dans tout le marais.



Lysimachia tenella, ©L.Raymond

IV. Flore et habitats tourbeux de la région Hauts-de-France

Végétation et Habitats d'intérêt communautaire (extrait Bilan 2015-2024—ZPS du marais de Balançon)

Au total 9 végétations d'intérêt communautaire sont connues à l'heure actuelle dans la ZPS du marais de Balançon. Comparativement au DOCOB c'est une nouvelle végétation : 6410—Prairie à Molinie des sols calcaires qui a été découverte en 2023 sur le marais de Cucq. De manière générale le site revêt une grande importance pour la conservation des habitats d'intérêt communautaire tourbeux à l'échelle nationale. En témoigne l'évaluation des états de conservation de ces habitats jugés de manières globale comme favorables.

Dans le cadre du Life Anthropofens, une évaluation de l'état de conservation des habitats de tourbière a été réalisée en 2020. Sur le marais de Villiers (nord du site Natura 2000 de Balançon), les tourbières de transition et tremblants ainsi que les tourbières basses alcalines (he) sont en état de conservation favorable. A l'inverse, les habitats de marais calcaires à *Cladium mariscus* et espèces du *Caricion davallianae* et les tourbières basses alcalines (pc) sont dans un état de conservation altéré. Bien qu'il y ait, au sein de cette zone, des états défavorables, les placettes de suivie de conservation des HIC sur le marais de Villiers sont au global dans un meilleur état de conservation que la moyenne observée sur l'ensemble des sites d'études du Life Anthropofens (cf. illustrations ci-après). En effet 66 % des placettes effectuées sur le marais de Villiers sont dans un état de conservation favorable à optimal, contre 8 % pour l'ensemble des sites étudiés. Un peu plus d'un tiers des placettes évaluées comme optimales dans le cadre de cette étude sont situées sur le marais de Villiers contre moins de 1,5 % des placettes évaluées comme dégradées.

Illustration 11: Résultats globaux des évaluations de l'état de conservation des HIC du marais de Villiers

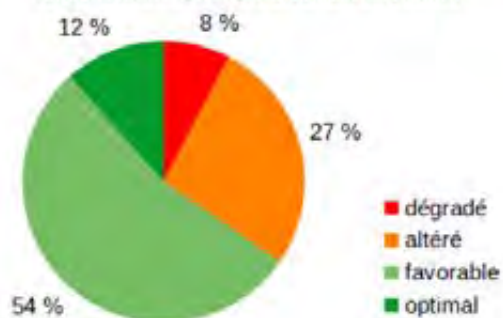
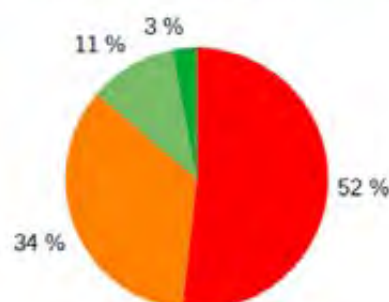


Illustration 12: Résultats globaux des évaluations de l'état de conservation des HIC sur l'ensemble des sites LIFE



Liste des syntaxons du lot 1 observés sur le marais de Balançons

Alno glutinosae - Salicetum cinereae H. Passarge 1956
Groupement à Alnus glutinosa et Thelypteris palustris Duhamel & Catteau in Catteau, Duhamel et al. 2009
Cladietum marisci Allorge 1922
Lathyro palustris - Lysimachietum vulgaris H. Passarge 1978
Caricetum paniculatae Wangerin 1916 apud auct.
'Thelypterido palustris - Phragmitetum australis Kuyper 1957 em. Segal & V. Westh. in V. Westh. & den Held 1969'
Potametum colorati Allorge 1921
Scheuchzerietalia palustris Nordh. 1936
Potentillo palustris - Caricetum rostratae Wheeler (1980) 1984
Junco subnodulosi - Caricetum lasiocarpae (Wattez 1968) B. Foucault 2008
Hydrocotylo vulgaris - Schoenenion nigricantis J.-M. Royer in Bardat et al. 2004 prov.
Anagallido tenellae - Eleocharitetum quinqueflorae (Bournérias in Riomet & Bournérias 1952) B. Foucault in J.-M. Royer et al. 2006
UTRICULARIETEA INTERMEDIO - MINORIS W. Pietsch ex Krausch 1968
Utricularietalia intermedio - minoris W. Pietsch ex Krausch 1968
Scorpidio scorpioidis - Utricularion minoris W. Pietsch ex Krausch 1968
Scorpidio scorpioidis - Utricularietum minoris T. Müll. & Görs 1960
Groupement à Sparganium natans Duhamel & Catteau in Catteau, Duhamel et al. 2009
Junco obtusiflori - Schoenetum nigricantis Allorge 1922
Berulo erectae - Ranunculetum linguae Prey & Wattez in Catteau et al. 2017
Junco subnodulosi - Caricetum lasiocarpae (Wattez 1968) B. Foucault 2008 var. typique Catteau & Duhamel 2014

Enjeux régionaux

Située en région Hauts-de-France, à la limite des départements du Nord et du Pas-de-Calais, la Vallée de la Sensée s'inscrit en bordure de la mégalopole européenne. Environnement fortement anthropisé, la fragmentation des milieux est lourde et ancienne (DREAL 2011). Cette mosaïque se matérialise par les complexes industrialo-miniers, les monocultures et plus récemment par de grands linéaires (autoroute, voies ferrées, ligne RTE).

Longue de 27 km, la vallée de la Sensée semble être le dernier affluent de l'Escaut contenant une enveloppe tourbeuse. Complexe plutôt isolé, cette vallée fait écho aux vallées tourbeuses dégradées des autres régions. Bien que le réseau hydrographique demeure important dans ces plaines, leurs artificialisations et leurs drainages des siècles durant ont énormément dégradé et isolé ces dernières enveloppes tourbeuses.

L'activité humaine dans ces milieux remonte à plusieurs siècles. Le complexe marécageux de la Sensée était autrefois exploité pour sa tourbe, pouvant servir de combustible de chauffage (PDG—LEMORT *et al.* 2024). Les fosses de tourbages sont aujourd'hui laissées à l'abandon pour certaines tandis que d'autres ont été valorisées pour les activités cynégétiques et halieutiques. De plus, afin de faciliter les trajets entre Dunkerque et Cambrai, un canal est construit à la demande de Napoléon 1er en 1820 et accentue depuis la déconnexion des milieux naturels.

Des sols fortement remaniés parcourent toute cette région et la Vallée de la Sensée ne fait pas exceptions. Ils laissent des stigmates dans la vallée où les végétations tourbeuses ne s'y développent plus aussi abondamment et où les dynamiques de végétation sont perturbées.



I. Situation générale

- La Sensée prend sa source à Saint-Léger et se jette dans l'Escaut. La zone prospectée s'étend de la commune de Hamel (amont) jusqu'à la commune de Bouchain (aval—confluence), soit environ 20 km de long. Cette zone marécageuse est depuis des siècles refaçonée par l'Homme. Néanmoins, elle conserve un caractère relativement préservé en comparaison des plateaux environnants et contraste nettement avec les espaces agricoles adjacents.
- « Véritable château d'eau pour les Hauts-de-France », elle demeure très riche en zones humides, la qualité de l'eau est cependant aujourd'hui moyenne à médiocre (Sensée – Agissons pour l'eau, s.d). Les enveloppes tourbeuses sont aujourd'hui très fragmentées et enclavées dans des milieux humides plus larges, le fonctionnement naturel est altéré par les fluctuations du niveau d'eau, sa qualité physico-chimique et les activités humaines.
- Certaines zones conservent encore des végétations pouvant être retrouvées en milieux tourbeux mais leur état de conservation est variable et souvent très dégradé.



II. Prospection du PRAT

- 19 mailles** ont été prospectées entre 2022 et 2025

Potentialité tourbeuse des mailles	Mailles prospectées validées	Mailles prospectées invalidées
Nulle	3	1
Faible	Ø	Ø
Moyenne	5	7
Forte	2	1

- La superficie prospectée est de 11,69 km² dont **5,43 km²** considérés comme **avérés tourbeux**.
- 86 sondages** ont été réalisés, dont 39 sont déterminants tourbeux.

La **distribution** des sondages est **hétérogène**. Les sondages **déterminants tourbeux** se concentrent dans **quatre sous-ensembles**, principalement dans la moitié **amont de la vallée**. Des sondages **non-tourbeux**, notamment à Hamel, **s'entre-croisent** avec des sondages positifs laissant supposer que des **phénomènes anthropiques** (remblais) ou naturels (crues) ont **fragmentés les tourbières** d'origines.

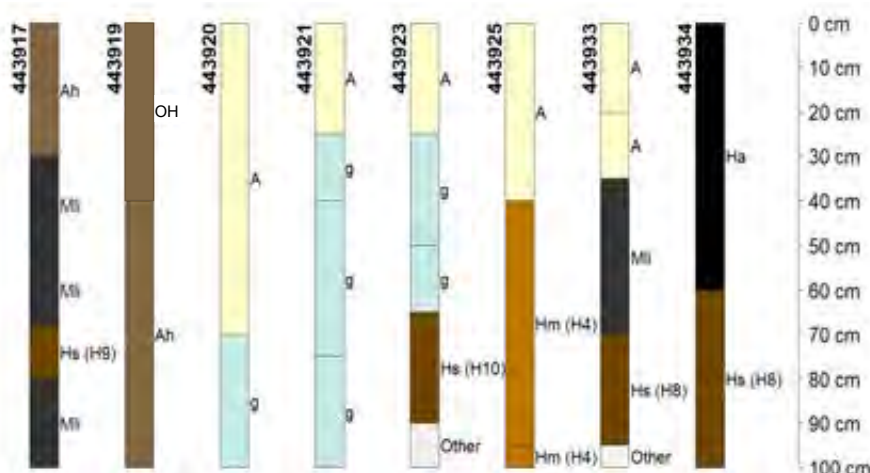
III. La pédologie

Catégorie PRAT*	Nombre de sondages
Non tourbeux	47
Tourbe de surface (dT1)	13
Tourbe de subsurface (dT2)	6
Tourbe 'profonde' (dT3)	20
Para-Tourbière (dT4)	NA

*Cf le rapport d'activité du PRAT 2025

Les sondages entre l'amont et l'aval contiennent les informations essentiels pour les catégoriser selon les critères du PRAT. Ainsi, quatre pôles avec de la tourbe en surface et subsurface ont été identifiés.

- A. Marais d'Hamel à L'Est. La zone avec la plus forte densité de sondage. De la tourbe en surface s'entrelace avec des zones qui en sont dépourvues. Le sol y semble être très hétérogène.
- B. Marais de Rumaucourt, milieux tourbeux dégradés, 2 sondages présentent de la tourbe avant 40 cm de profondeur, les deux autres entre 40 et 80 cm.
- C. Marais des Vanneaux sur la Commune d'Arleux, gradient tourbeux avec de la tourbe de surface au centre du marais, les sondages proches du canal ont de la tourbe résiduelle en profondeur.
- D. En amont des marais de Féchain, pas de tourbe en surface contactée. La zone tourbeuse l'est principalement en profondeur avec des horizons tourbeux sous les 40 cm de profondeur.
- E. Des étangs du Grand Clair jusqu'à la confluence, la zone est très dégradée et ne contient que des résidus d'horizons tourbeux, jamais en surface.



L'ouest de la vallée de la Sensée, la prospection la plus récente, permet d'observer un peu plus dans le détail les horizons que nous retrouvons dans cette vallée.

Principalement minérale (A, Ah), des traces d'horizons de surface chargés en matière organique sont aussi présents (OH, Ha).

Les profils pédologiques rendent bien compte de l'hétérogénéité des milieux, des zones humides (443920 à 443923), d'anciennes tourbières très dégradées (443934) ou encore des profils pouvant être liés à des marqueurs anthropiques :

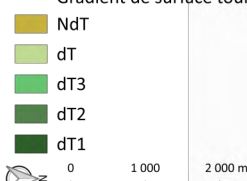
- 443917 & 443933, les matériaux limniques (Mli) s'intercalent avec des horizons tourbeux sapriques (Hs), peut-être d'ancienne fosse de tourbages atterries.
- 443925, une tourbe mésique bien conservée, avec des graines de menyanthe, mais en plein sous une ligne RTE avec de nombreux sols compactés.

Sondages pédologiques schématisés*

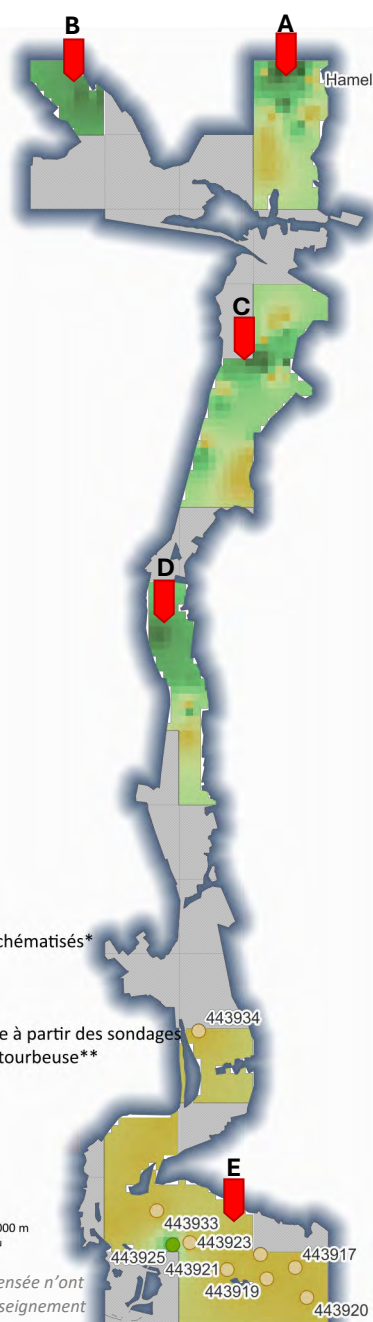
- Non tourbeux
- Tourbeux

Surface tourbeuse estimée à partir des sondages

Gradient de surface tourbeuse**



*Tous les sondages de la Sensée n'ont pas le même niveau de renseignement
**Cf rapport d'activité PRAT 2025



IV. Flore et habitats tourbeux de la région Hauts-de-France

La vallée de la Sensée est une ancienne vallée tourbeuse alcaline de la région Hauts-de-France. Bien qu'il y ait de la tourbe relictuelle, les milieux sont fortement dégradés et la flore restreinte.

Le premier site contractualisé par le CEN dans la vallée remonte à 2013 et le reste principalement à 2017, les espèces présentées ici sont toutes postérieures à 2010. Nous n'avons pas de données antérieures.

Lot 1 : Espèces de cœur turfigène

D'après les données à notre disposition, seules deux espèces exclusives aux tourbières dans notre région ont été observées ces 15 dernières années.



Taxon*	Nom commun	Rareté	Menace	Enjeux rég
Carex lepidocarpa Tausch, 1834	Laîche à fruits écailleux	AR	LC	1,00
Plagiomnium elatum (Bruch & Schimp.) T.J.Kop.	Mnie élevée	RR	VU	3,00

*Les espèces en gras ont été observées pendant la prospection de 2025

Plagiomnium elatum, une mousse, a été détectée qu'une seule fois, en 2013, par le Conservatoire Botanique des Hauts-de-France. Ce bryophyte se trouve dans l'emprise du marais d'Aubigny-au-Bac, marais gérés par le conservatoire d'espaces naturelles depuis 2017.

Carex lepidocarpa a été détecté en 2012 puis de nouveau en 2019 par le CBN et le CEN. Cette laîche se concentre dans le marais de Féchain qui se situe en aval du marais d'Aubigny et qui est en convention de gestion avec le CEN depuis 2013.

A notre disposition, la plus vieille occurrence d'espèces de cœur turfigène pour cette vallée se limite à 2012.

La très faible diversité et densité renforce l'observation d'un milieu naturel très hétérogène, fragmenté et anthropisé, avec un passé tourbeux de moins en moins présent.



IV. Flore et habitats tourbeux de la région Hauts-de-France



Thelypteris palustris ©J.Lebrun

Lot 2 : espèces retrouvées associées aux milieu tourbeux (mais pas uniquement)

Ces espèces du Lot 2 se retrouvent plutôt dans les sites déjà contractualisés par le Conservatoire. On retrouve néanmoins certaines d'entre elles (*T. palustris*, *J. subnodulosus*) plus communément le long de la vallée.

Taxon*	Nom commun	Rareté	Menace	Enjeux reg
<i>Calamagrostis canescens</i> (Weber) Roth, 1789	Calamagrostide blanchâtre (s.l.)	AR	LC	1
<i>Calamagrostis canescens</i> subsp. <i>canescens</i> (Weber) Roth, 1789	Calamagrostide blanchâtre	AR	LC	2
<i>Carex nigra</i> (L.) Reichard, 1778	Laîche noire (s.l.)	PC	LC	1
<i>Cicuta virosa</i> L., 1753	Ciguë aquatique ; Ciguë vireuse	E	EN	5
<i>Dactylorhiza incarnata</i> (L.) Soó, 1962	Orchis incarnat (s.l.) ; Dactylorhize incarnat (s.l.)	AR	NT	2
<i>Epilobium palustre</i> L., 1753	Epilobe des marais	AR	LC	1
<i>Hydrocotyle vulgaris</i> L., 1753	Hydrocotyle commun ; Écuelle d'eau	PC	LC	1
<i>Juncus subnodulosus</i> Schrank, 1789	Jonc à tépales obtus ; Jonc noueux	AC	LC	2
<i>Ranunculus lingua</i> L., 1753	Grande douve	AR	LC	3
<i>Thelypteris palustris</i> Schott, 1834	Fougère des marais	PC	LC	1
<i>Valeriana dioica</i> L., 1753	Valériane dioïque (s.l.)	AR	LC	1

*Les espèces en gras ont été observées pendant la prospection de 2025

Végétation :

Plus complexe, nous avons uniquement des données issues des plans de gestions des sites gérés par le CEN :

- Certains syntaxons caractéristiques des végétations des sols tourbeux sont présents tels que l'association *The-lypterido palustris—Phragmitetum australis* et *Alno glutinosae—Salicetum cinereae*. Pour le premier, il s'agit d'une roselière amphibie mésotrophile des marais tourbeux plutôt alcalins, composée d'une végétation tribu-taire d'un ennoiment quasi-permanent. Pour le second, il s'agit d'un milieu plus fermé de fourrés hydro-philés, basiphiles, mésotrophiles, sur tourbe alcaline. Nous y retrouvons en plus une strate herbacée dominée par des espèces des roselières et des grandes cariçaies hygrophiles.
- Ces deux végétations patrimoniales indicatrices de milieux tourbeux se retrouvent dans le marais d'Aubigny-au-Bac et de Rumaucourt.
- Les autres sites présents dans la vallée n'ont pas de végétations pouvant être rattachées aux habitats tour-beux
- Une inconnue demeure pour les marais d'Hamel, vaste emprise « naturelle » mais sans cartographie des végétations.

Des individus du lot 2 se retrouvent de façon sporadique dans la vallée mais sans pouvoir les catégoriser dans des végétations turficoles.

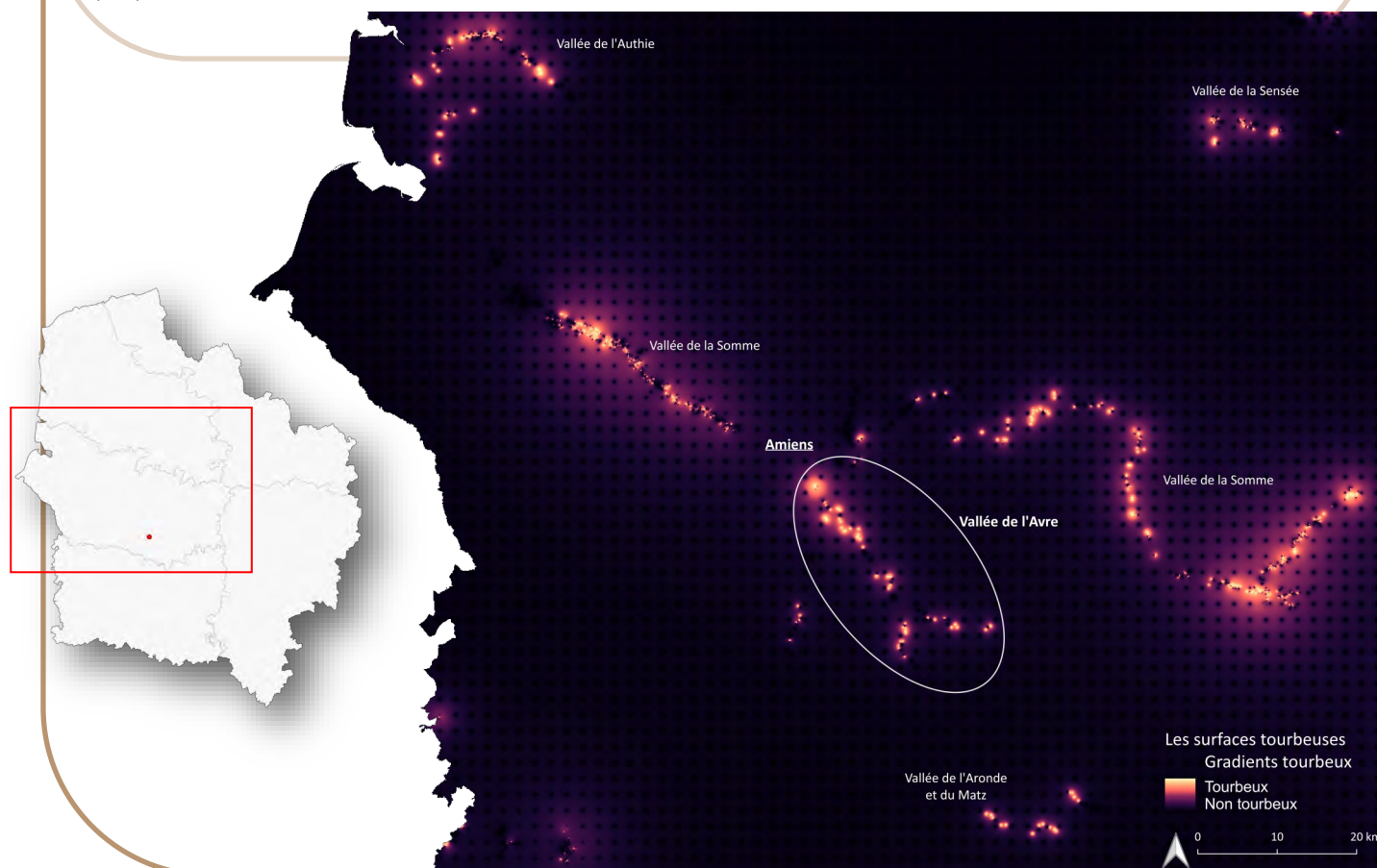


Cicuta virosa, ©F.boca

Enjeux régionaux

Situé en région Hauts-de-France, le bassin versant de l'Avre s'étend sur 934 km², dont 780 km² dans le département de la Somme (le reste dans l'Oise). La vallée s'écoule selon un axe SE-NO et rejoint la Somme juste en amont d'Amiens. La Somme et l'Avre sont considérés depuis 2017 comme formant une entité écologique cohérente et sont classées site Ramsar « Marais et tourbières des vallées de la Somme et de l'Avre ». Déjà connue pour ses habitats tourbeux, 333 ha de la vallée de l'Avre sont inscrits au réseau Natura 2000 comme zones spéciales de conservation, d'après la directive Habitats. Un travail de l'UPJV d'Amiens avait estimé les volumes de tourbe dans la vallée de l'Avre. Le Plan Régional d'Action en faveur des Tourbières (PRAT) a permis d'actualiser les connaissances sur la répartition des formations tourbeuses en précisant la présence de tourbe dans le premier mètre de sol sur la majorité du linéaire du cours d'eau. Ainsi, de la tourbe est présente dans le premier mètre de sol sur un linéaire de plus de 60 km, en fond de vallée. Ces observations renforcent l'importance du réseau tourbeux du département, déjà très important. La vallée joue ainsi un rôle majeur dans la conservation régionale des tourbières alcalines, habitats rares et à forte valeur patrimoniale.

La tourbe présente en surface n'est pas nécessairement indicatrice de turfigénèse (production de tourbe) actuelle. Pas encore daté dans l'Avre, des datations dans la Somme (Garcia, 2024) révèlent que les tourbes de surfaces datent de l'âge du Fer ($\approx 3,5$ ka). Des conditions environnementales maintiendraient donc les tourbes en places, néanmoins elles seraient insuffisantes pour entraîner une turfigénèse. Ces surfaces tourbeuses sont en effet fragiles et subissent, depuis plusieurs milliers d'années, des pressions qui pourraient jouer un rôle dans l'arrêt de l'accumulation de tourbe. Déjà drainées à l'âge du Fer, ces techniques ont permis d'augmenter les surfaces cultivables et pâturables des populations sédentaires, entraînant des modifications dans le cycle de l'eau. Plus récemment, à l'époque gauloise, les écrits de Pline l'Ancien (Soudry 2016), rendent comptes de l'utilisation de la tourbe par les populations locales pour se chauffer et cuire les aliments. Le site archéologique de Thézy-Glimont accentue cette utilisation en révélant des traces d'exploitations des aulnes. Ces pressions s'intensifient à partir du XVIII^e siècle avec une activité plus industrielle, reposant sur l'utilisation d'excavatrices et d'outils dédiés. Elle entraîne une exploitation plus massive et la formation des « entailles », ou fosses de tourbages. Longues scarifications perpendiculaires au cours d'eau, certaines se rebouchent avec le temps, formant des horizons chargés de particules organiques et minérales (boues, gyttja, vase, limon). Plus récemment encore, si certaines activités ont cessé, comme le tourbage, le bousinage ou le blanchiment sur prés (LIFE Anthropofens, s.d.-b), les dynamiques hydrologiques et écologiques restent perturbées par les activités agricoles (captages), sylvicoles (drainage) et la gestion des crues (canalisation). Les habitats continuent donc de s'assécher et de se dégrader. C'est pourquoi le CEN s'est engagé dans des travaux de restaurations des habitats tourbeux au travers du Life Anthropofens sur les sites Natura 2000 de la vallée de l'Avre et sur la prospection des surfaces tourbeuses via le PRAT.



I. Situation générale du site

- La vallée de l'Avre s'étend sur environ 66 km. Le cours d'eau prend sa source sur la commune d'Amy, dans l'Oise et rejoint la Somme à Camon.
- Le réseau hydrographique est structuré par plusieurs affluents, dont les Trois Doms qui passe par Courtemanche et rejoint l'Avre à Pierrepont-sur-Avre. Cet affluent, ainsi que la Brache et la Noye incluent eux aussi des horizons tourbeux.
- Le fonctionnement hydrologique de la vallée est fortement dépendant de la nappe de la craie, qui l'alimente *via* des résurgences à même le lit du cours d'eau.
- Le régime hydrologique reste globalement soutenu par la nappe, mais présente en surface des altérations hydromorphologiques liées aux aménagements et aux prélèvements (captages) qui s'accroissent (Agence de l'Eau Artois-Picardie, 2019 s.d., 2025 s.d.). A cela s'ajoutent le drainage qui impactent localement les milieux humides.
- La vallée présente une enveloppe tourbeuse importante. Toutefois, les conditions hydrologiques et physico-chimiques (nitrate par exemple) actuelles ne sont pas favorables à une turfigénèse généralisée (Berquer *et al.*, 2024). L'état écologique de l'Avre est qualifié de moyen selon le document de l'AEAP de 2019, avec notamment une pollution au TBT.
- Des actions de restauration sont en cours dans le cadre du programme Life Anthropofens, sur des sites en gestion par le CEN Hauts-de-France sur les communes de Boves, Thézy-Glimont et Moreuil.

II. Prospection du PRAT

Longueau

- 41 mailles** ont été prospectées en 2025. Majoritairement des **mailles à potentiel moyen** (bleu).

Potentialité tourbeuse des mailles	Mailles prospectées validées tourbeuses	Mailles prospectées invalidées tourbeuses
Nulle	Absentes	Absentes
Faible	1	Ø
Moyenne	21	10
Forte	8	1

- La **superficie prospectée** est de 15,41 km² dont **12,31 km²** considérés comme **avérés tourbeux**
- 110 sondages** ont été réalisés, dont 70 en 2025
- 87 sondages déterminants tourbeux**

Sondages pédologiques

- Non tourbeux
- Tourbeux

Potentialité tourbeuse

- Faible
- Moyenne
- Forte



0 2 000 4 000 m

L'Avre présente des sondages tourbeux et non tourbeux tout le long de la vallée. Ils sont présents à des niveaux similaires, ne révélant pas automatiquement un gradient topographique mais plutôt un gradient d'anthropisation. Les sondages non tourbeux sont en effet plus présents dans des peupleraies ou zones remaniées et drainées.

III. La pédologie

Les horizons tourbeux sont principalement situés dès la surface ou en subsurface.

Une grande majorité des profils, y compris non tourbeux, présente des critères hydromorphes.

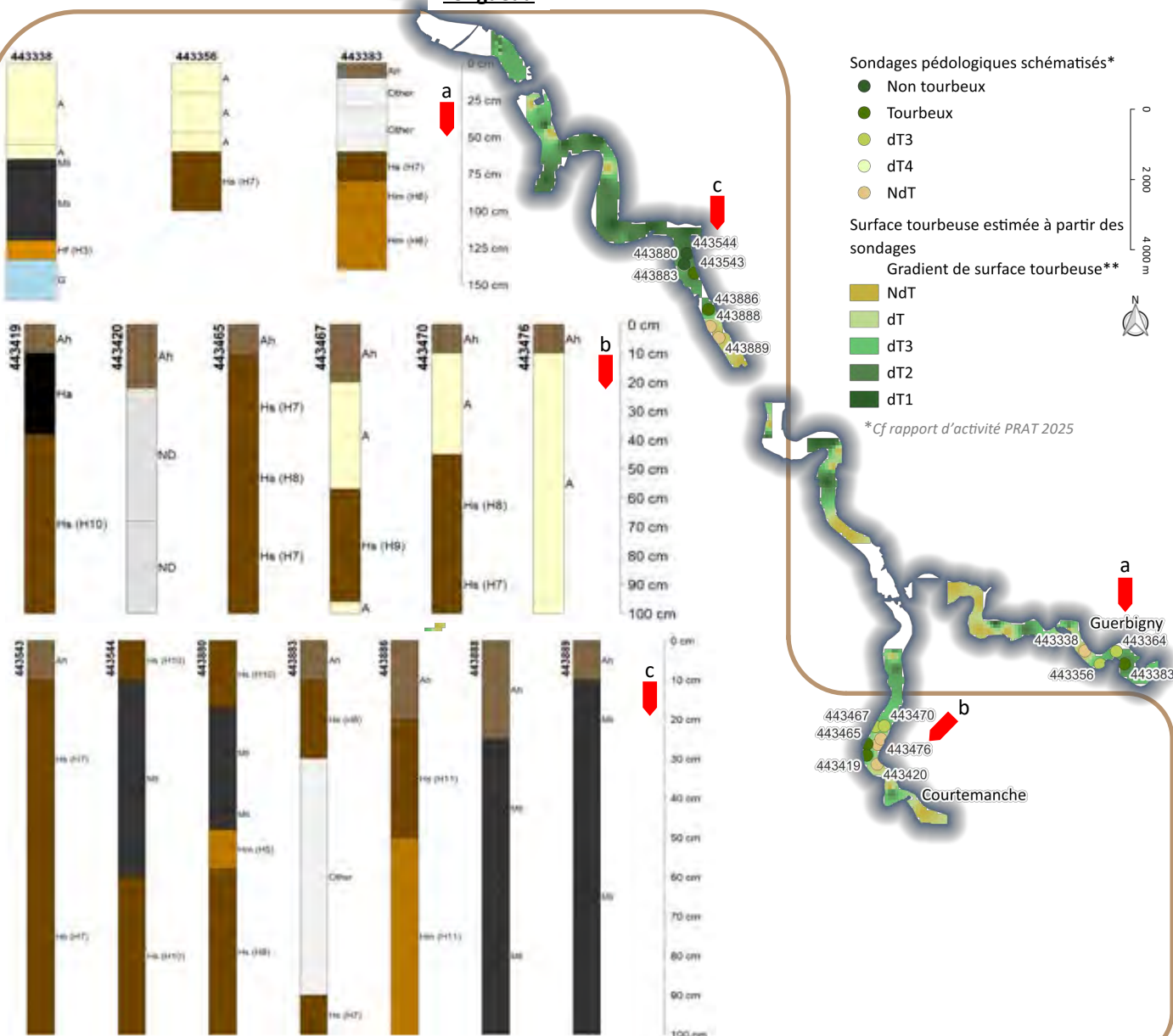
Les profils ci-dessous mettent en évidence plusieurs processus : les horizons de surfaces correspondent soit à des tourbes sapriques, soit à des horizons enrichis en matière humique, traduisant une présence d'eau suffisante pour ralentir la décomposition de la matière organique (MO), mais insuffisante pour permettre une turfigénèse active à certain endroit. Les sondages présentent souvent des horizons sapriques et plus rarement des horizons mésiques à fibriques, permettant la qualification de ces sols en histosols.

Des traces d'activités anthropiques anciennes sont probables : par exemple le sondage 443544 (c.), présentant une succession tourbe (Hs), matériaux limnique (Mli), Hs, pourrait correspondre à un ancien fossé ou fosse de tourbage comblé. Les Mli correspondent à une accumulation de MO fine en milieu saturé, issue de processus de sédimentation (les végétaux subissent donc un déplacement), formant une boue noire riche en carbone et saturée en eau. Le terme de « gyttja », utilisé en Europe du Nord, désigne des formations proches. La définition française des Mli englobe ce type de dépôt ainsi que d'autres processus similaires. Des boulettes de tourbe fibrique retrouvées dans une matrice de gyttja calcaire pourrait correspondre la aussi à une ancienne fosse de tourbage à Thézy-glimont.

Catégorie PRAT*	Nombre de sondages
Non tourbeux	31
Tourbe de surface (dT1)	27
Tourbe de subsurface (dT2)	25
Tourbe 'profonde' (dT3)	17
Para-Tourbière (dT4)	1

*Cf le rapport d'activité du PRAT 2025

Longueau



IV. Flore et habitats tourbeux de la région Hauts-de-France

Les habitats en place sont issus des activités humaines passées et actuelles. De large parcelles se referment ou sont déjà fermées par des fourrés humides d'Aulnes et de Saules. Des peupleraies se répartissent sur les bords des zones humides, aux pieds des côteaux. Certaines parties restent ouvertes avec des roselières ou des prairies humides paratourbeuses.

Les données à notre disposition proviennent des sites du conservatoire d'espaces naturels. Nous n'avons donc pas un relevé exhaustif sur les 66 km de vallée.

Les espèces présentées ici ont toutes été aperçues sur les 10 dernières années. Les espèces en gras ont été aperçues en 2025.

Lot 1 : Espèces de cœur turfigène



Carex lasiocarpa, © L. Raymond

Taxon*	Nom commun	Rareté	Menace	enjeux_reg
<i>Campylium stellatum</i> (Hedw.) Lange & C.E.O.Jensen	Campylie étoilée ; Hypne en étoiles	R	LC	1
Carex lasiocarpa Ehrh., 1784	Laîche filiforme	R	NT	3
<i>Carex lepidocarpa</i> Tausch, 1834	Laîche à fruits écailleux	AR	LC	1
<i>Cladium mariscus</i> (L.) Pohl, 1809	Marisque	AR	LC	1
<i>Plagiomnium elatum</i> (Bruch & Schimp.) T.J.Kop.	Mnie élevée	RR	VU	
Potamogeton coloratus Hornem., 1813	Potamot coloré	AR	LC	1
Sparganium natans L., 1753	Rubanier nain	R	NT	3
<i>Sphagnum angustifolium</i> (C.E.O.Jensen ex Russow) C.E.O.Jensen	Sphaigne à feuilles étroites	R	LC	1
<i>Sphagnum capillifolium</i> (Ehrh.) Hedw.	Sphaigne grêle ; Sphaigne à feuilles aiguës	R	LC	
<i>Sphagnum papillosum</i> Lindb. var. <i>laeve</i> Warnst.	Sphaigne papilleuse (var.)	AR	LC	1
Sphagnum squarrosum Crome	Sphaigne squarreuse	R	LC	1
<i>Sphagnum subnitens</i> Russow & Warnst.	Sphaigne presque brillante	R	LC	
<i>Sphagnum teres</i> (Schimp.) Ångstr.	Sphaigne arrondie	E	VU	
<i>Thyselinum palustre</i> (L.) Hoffm., 1814	Peucédan des marais	AR	LC	1
<i>Utricularia bremii</i> Heer ex Köll., 1839	Utriculaire de Bremi	RR	NT	3



Sparganium natans, © L. Raymond

IV. Flore et habitats tourbeux de la région Hauts-de-France



Lot 2 : espèces retrouvées associées aux milieux tourbeux (mais pas uniquement)

Espèces trouvées préférentiellement dans les sites du Conservatoire, certaines comme *Thelypteris palustris* et *Hydrocotyle vulgaris* ont pu être observées ponctuellement le long de la vallée.

Taxon*	Nom commun	Rareté	Menace	Enjeux reg
<i>Aneura pinguis</i> (L.) Dumort.	Aneure grasse	AR	LC	
<i>Aulacomnium palustre</i> (Hedw.) Schwägr.	Aulacomnie des marais ; Mnée des marais	R	LC	
<i>Calamagrostis canescens</i> subsp. <i>canescens</i> (Weber) Roth, 1789	Calamagrostide blanchâtre	AR	LC	2
<i>Campylium protensum</i> (Brid.) Kindb.	Campylie allongée	R	LC	
<i>Carex appropinquata</i> Schumacher, 1801	Laîche paradoxale	R	NT	3
<i>Carex rostrata</i> Stokes, 1787	Laîche ampoulée	AR	LC	1
<i>Dactylorhiza incarnata</i> (L.) Soó, 1962	Orchis incarnat (s.l.) ; Dactylorhize incarnat (s.l.)	AR	NT	2
<i>Dactylorhiza incarnata</i> subsp. <i>incarnata</i> (L.) Soó, 1962	Orchis incarnat ; Dactylorhize incarnat	AR	NT	
<i>Epilobium palustre</i> L., 1753	Épilobe des marais	AR	LC	
<i>Epipactis palustris</i> (L.) Crantz, 1769	Épipactis des marais	AR	NT	2
<i>Fissidens adianthoides</i> Hedw.	Fissident faux-adiante	AR	LC	
<i>Gentiana pneumonanthe</i> L., 1753	Gentiane pneumonanthe	RR	VU	2
<i>Hydrocotyle vulgaris</i> L., 1753	Hydrocotyle commun ; Écuelle d'eau	PC	LC	
<i>Juncus subnodulosus</i> Schrank, 1789	Jonc à tépales obtus ; Jonc noueux	AC	LC	
<i>Lysimachia tenella</i> L., 1753	Mouron délicat	AR	LC	1
<i>Ranunculus lingua</i> L., 1753	Grande douve	AR	LC	3
<i>Riccardia multifida</i> (L.) Gray	Riccardie divisée	RR	NT	
<i>Selinum carvifolia</i> (L.) L., 1762	Sélin à feuilles de carvi	AR	LC	1
<i>Thelypteris palustris</i> Schott, 1834	Fougère des marais	PC	LC	
<i>Valeriana dioica</i> subsp. <i>dioica</i> L., 1753	Valériane dioïque	AR	LC	1

Végétation :

La vallée est en très grande partie recouverte par une forêt pionnière de l'étage collinéen, à ombroclimat humide dans des conditions océaniques. Elle se développe sur un substrat basique et détrempé, où la nappe de la craie reste stagnante. Le CBN des Hauts-de-France propose de rattacher ces habitats à la série herbacée *Junco subnodulosi-Carici lasiocarpae* permasigmetum (Villejoubert 2020, nom. Indéd.) ou à la série à *Alnus glutinosa* et *Thelypteris palustris* (Catteau 2016, nom. Inéd.). Les deux sont des séries de végétations de tourbières, la première correspond à un milieu ouvert où les conditions trophiques et hydriques empêchent la fermeture du milieu et bloquent la dynamique végétale à un stade herbacé, tandis que la seconde va vers une fermeture du milieu. L'eutrophisation et le dérèglement hydrologique de la vallée favorisent actuellement la fermeture des habitats en développant les ligneux.



IV. Flore et habitats tourbeux de la région Hauts-de-France

Des tourbes aux macrorestes biens distincts



Longueau

Sondages pédologiques

● Non tourbeux

● Tourbeux

Potentialité tourbeuse

■ Faible

■ Moyenne

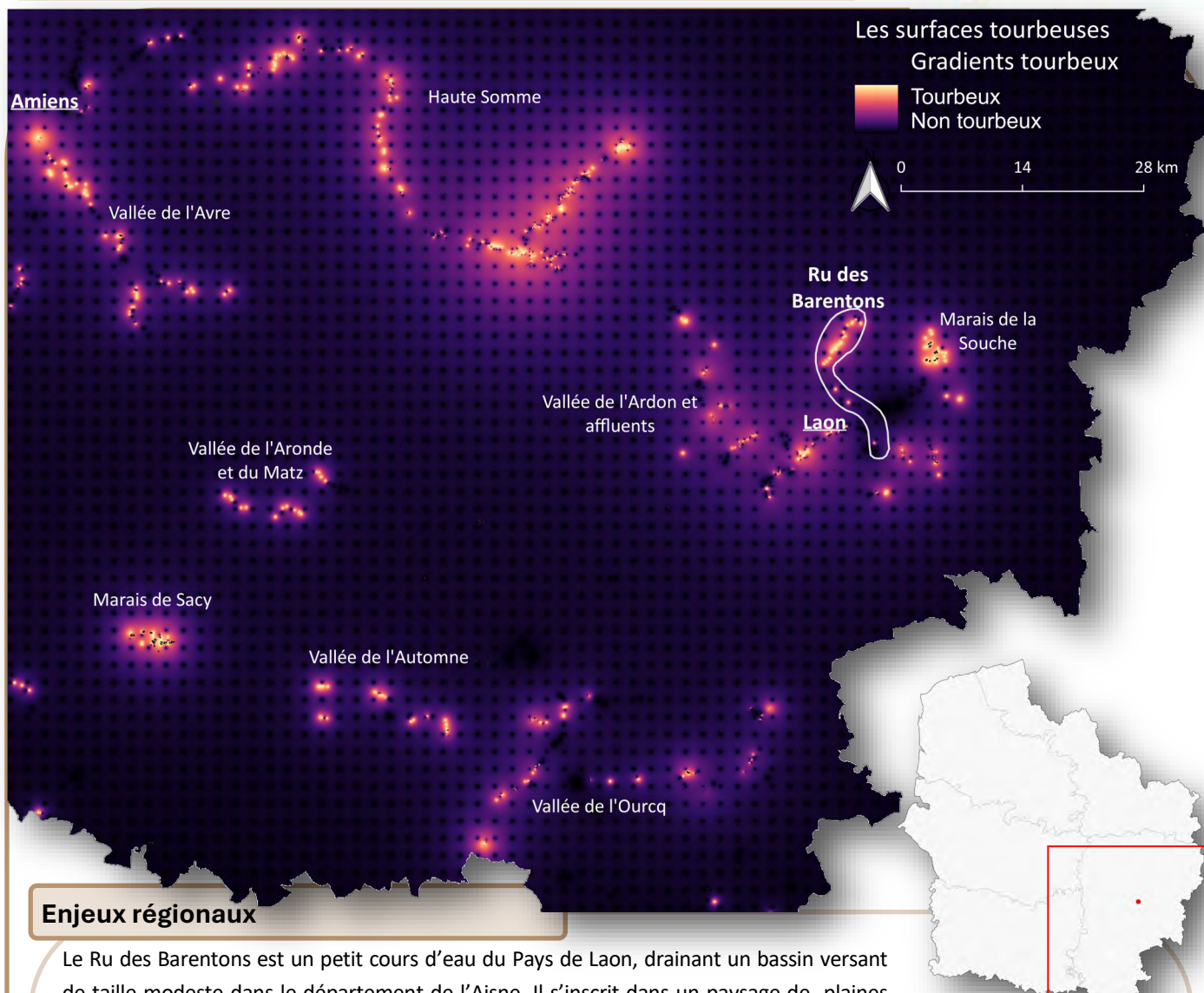
■ Forte



0 2 000 4 000 m

Courtemanche

Guerbigny



Enjeux régionaux

Le Ru des Barentons est un petit cours d'eau du Pays de Laon, drainant un bassin versant de taille modeste dans le département de l'Aisne. Il s'inscrit dans un paysage de plaines agricoles du laonnois entaillés par des vallées peu encaissées, où les écoulements sont lents et conditionnés par la nappe phréatique.

A l'échelle régionale, le Ru des Barentons ne constitue pas un axe hydrographique majeur, surtout en comparaison des grandes vallées structurantes du bassin de l'Aisne. Son importance ne tient donc ni à son débit ni à son étendue, mais à la qualité et à la diversité des milieux qu'il traverse et entretient, notamment la partie en aval de Laon. Cette partie est en effet identifiée comme ZNIEFF I, avec une forte densité de marais alcalins dans une région d'agriculture intensive (GEOGRAM 2018) qui est un témoin géomorphologique rare dans cette partie du territoire. Ces zones humides tourbeuses s'insèrent dans le réseau plus large des vallées tourbeuses du Pays de Laon, aux côtés de celles de l'Ardon et de ses affluents.

Ces vallées humides se distinguent d'autres ensembles tourbeux régionaux plus ouverts et plus plats, comme les marais de la Souche ou encore la RNN du marais de Vesles-et-Caumont. Dans le cas des Barentons, la formation de la tourbe est principalement liée au fonctionnement de vallée : saturation prolongée des sols, faible énergie du cours d'eau favorisant l'accumulation de matière organique. Ces tourbières de vallée, souvent fragmentées et discrètes aujourd'hui, jouent un rôle important dans le maillage écologique local en maintenant des continuités humides au sein d'un paysage largement agricole.

Ainsi, même si le Ru des Barentons n'est pas la plus grande enveloppe tourbeuse à l'échelle régionale, il contribue à densifier le réseau de petites vallées humides et tourbeuses du Laonnois. Cet ensemble renforce la cohérence écologique du territoire, en augmentant la diversité des milieux humides alcalins et en assurant des fonctions écologiques essentielles : stockage de l'eau, soutien des débits d'étiage et maintien d'habitats spécialisés au sein du bassin de l'Aisne.

I. Situation générale du site

- Le Ru des Barentons s'inscrit dans la trame verte et bleue du Pays de Laon. Cours d'eau mineur du bassin versant de la Serre, il prend sa source à Festieux et parcourt 25 km jusqu'à se jeter dans la Souche à Barenton-sur-Serre.
- Le partie située entre Barenton-Bugny et la confluence avec la Souche est classée ZNIEF I. De plus, plusieurs parties du cours d'eau sont reconnues comme Espaces Naturels Sensibles (GL016, GL041 et GL075—SCotCAPL_Volet 3, 2019)
- Ceinturé par les plaines agricoles, les zones humides du fond du Ru sont en plus drainées pour la populiculture. Dans la partie aval, des roselières se développent après une restaurations écologiques qui a permis de rouvrir les milieux.
- Quelques zones paratourbeuses, concentrées à Festieux (à la source) et entre Barenton-Bugny et Barenton-sur-Serre
- L'état physico-chimique du ru est catégorisé comme médiocre (SCotCAPL— volet 3, 2019) avec une eutrophisation du cours d'eau. L'état biologique est caractérisé comme moyen. (Ces données remontent à 2019, des données plus récente sont peut-être connue par la CAPL)

II. Prospection du PRAT

- 20 mailles** ont été prospectées, dont 16 en 2025

Potentialité tourbeuse des mailles	Mailles prospectées validées	Mailles prospectées invalidées
Nulle	0	1
Faible	2	0
Moyenne	8	6
Forte	3	0

- La superficie prospectée est de 3,81 km² dont **2,64 km²** considérés comme **avérés tourbeux**.
- 69 sondages** ont été réalisés, dont 39 sont déterminants tourbeux.

La **distribution** des sondages à l'échelle du Ru est **hétérogène**. Les sondages **déterminants tourbeux** se concentrent en **amont** et en **aval**. Les sondages **non-déterminants** se concentrent dans le **marais de Samoussy**. La partie en **périphérie d'Athy-sous-Laon** est la **plus dégradée**, avec une alternance de sondages déterminants et d'autres non-déterminants.



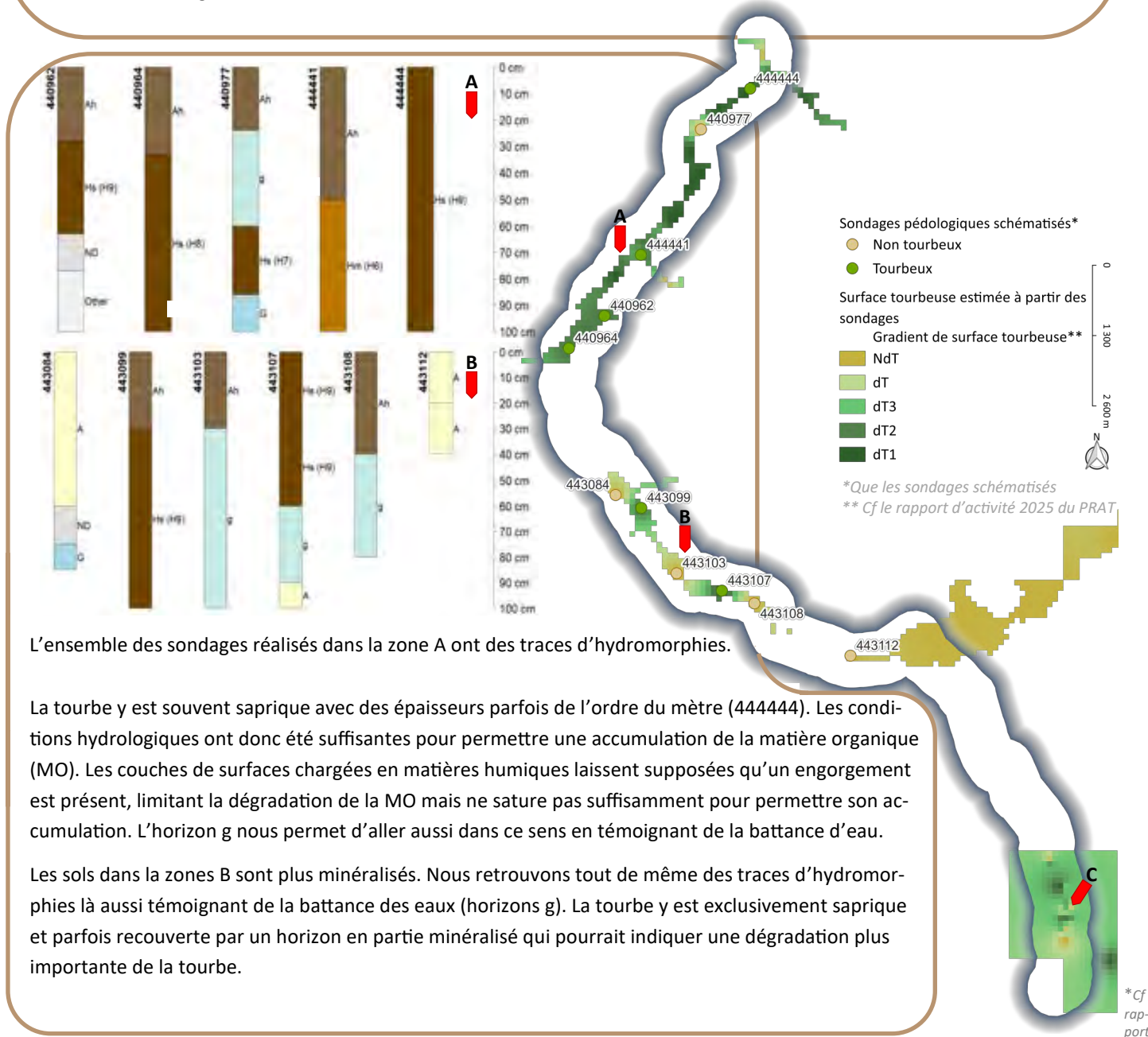
III. La pédologie

Trois sous-enveloppes tourbeuses ressortent dans le Ru des Barentons.
Les couches tourbeuses sont présentes dès la surfaces.

- A. ENS GL016 des marais des Barenton : tourbe présente dès la surface dans 11 sondages. Plutôt en direction de Barenton-sur-Serre, la tourbe y est très souvent saprique avec quelques horizons mésiques en profondeur. Les mailles de potentialités tourbeuses moyennes s'avèrent aussi tourbeuses que celles avec une potentialité forte. Les profils sans tourbes en surface sont principalement représentés par des horizons chargés en matières humiques ou certains très noirs pourraient répondre à l'appellation d'Anmoor.
- B. ENS GL075 Parc municipal de Chambry (et alentour dans notre cas) : succession de bassins et de zones plus ou moins boisées. Un profil avec un horizon saprique dès la surface. Le restes des sols de surfaces sont très noirs mais la fraction minérale est trop importante pour parler de tourbe. Profils non tourbeux mais demeurent hydromorphes avec des traces d'oxydoréductions témoignant de la battance d'eau.
- C. Les sondages dT1 se concentrent dans les marais situés sur l'Est de la commune de Festieux. La bande humide est étroite de 200 m coincée d'un côté par la commune et de l'autre par le flanc d'une colline. La tourbe présente y est néanmoins bien conservée avec des horizons fibriques dans l'un des sondages.

Catégorie PRAT*	Nombre de sondages
Non tourbeux	30
Tourbe de surface (dT1)	22
Tourbe de subsurface (dT2)	12
Tourbe 'profonde' (dT3)	5
Para-Tourbière (dT4)	0

*Cf le rapport d'activité du PRAT 2025



IV. Flore et habitats tourbeux de la région Hauts-de-France

Comme en témoigne la Monographie de Barenton Bugny de 1884 où une « tourbe de mauvaise qualité » y est indiquée. Au XIXe siècle, sur cette commune, environ 100 ha de marais presque immergés toute l'année suivaient le cours d'eau. Ils produisaient « qu'une herbe et des roseaux de mauvaise qualité ». Le ru des Barenton est donc tourbeux depuis maintenant plusieurs siècles et est caractéristique des cours d'eau tourbeux alcalin du Pays de Laon.

Ces conditions hygrométriques citées dans cette vieille monographie sont importantes pour des habitats tourbeux et/ou palustres et une faune paludicole. Bien que la seule espèce mentionnée valant de l'intérêt (esthétique) est le nénuphar, des relevés botaniques effectués par le CBN des Hauts-de-France sur les dernières décennies mettent en lumière la présence de certaines espèces considérées de cœurs turfigène ou souvent présente en milieu tourbeux pour la région.

Les espèces présentées ici ont toutes été aperçues sur les 10 dernières années. Les espèces en gras ont été aperçues en 2025.

Lot 1 : Espèces de cœur turfigène

Taxon*	Nom commun	Rareté	Menace	enjeux_reg
<i>Carex lepidocarpa</i> Tausch, 1834	Laîche à fruits écaillés	AR	LC	1
<i>Cladium mariscus</i> (L.) Pohl, 1809	Marisque	AR	LC	1
<i>Thysselinum palustre</i> (L.) Hoffm., 1814	Peucedan des marais	AR	LC	1

Les trois espèces ont été observé en 2020 lors d'un inventaire du CBN en aval de Laon. Les marisques ont un large spectre écologique avec néanmoins un optimum en milieux tourbeux. Plante héliophile, cette espèce nécessite une alimentation en eau régulière toute l'année, de même pour le Peucedan des marais. *Carex lepidocarpa* est légèrement moins demandeur en eaux mais se retrouve tout aussi bien en prairie humide qu'en bas marais. Ces espèces sont basiclines à basiphiles. Leurs présences témoignent d'un engorgement des sols assez permanent.



Peucedanum palustre, ©A. Messean

IV. Flore et habitats tourbeux de la région Hauts-de-France



Thelypteris palustris ©J.Lebrun

Lot 2 : espèces retrouvées associées aux milieux tourbeux (mais pas uniquement)

Des espèces plutôt présentes dans la partie en aval de Laon mais aussi au niveau de la zone un peu plus tourbeuse de Festieux. Elles n'ont cependant pas été observées en 2025.

Taxon*	Nom commun	Rareté	Menace	Enjeux reg
<i>Calamagrostis canescens</i> subsp. <i>Canescens</i> (Weber) Roth, 1789	Calamagrostis blanchâtre	AR	LC	2
<i>Carex appropinquata</i> Schumacher., 1801	Laîche paradoxale	R	NT	3
<i>Carex nigra</i> subsp. <i>Nigra</i> (L.) Reichard, 1778	Laîche noire	PC	LC	1
<i>Hydrocotyle vulgaris</i> L., 1753	Hydrocotyle commun ; Ecuelle d'eau	PC	LC	1
<i>Juncus subnodulosus</i> Schrank, 1789	Jonc à tépales obtus ; Jonc noueux	AC	LC	2
<i>Thelypteris palustris</i> Schott, 1834	Fougère des marais	PC	LC	1
<i>Valeriana dioica</i> subsp. <i>Dioica</i> L., 1753	Valériance dioïque	AR	LC	1



Végétation :

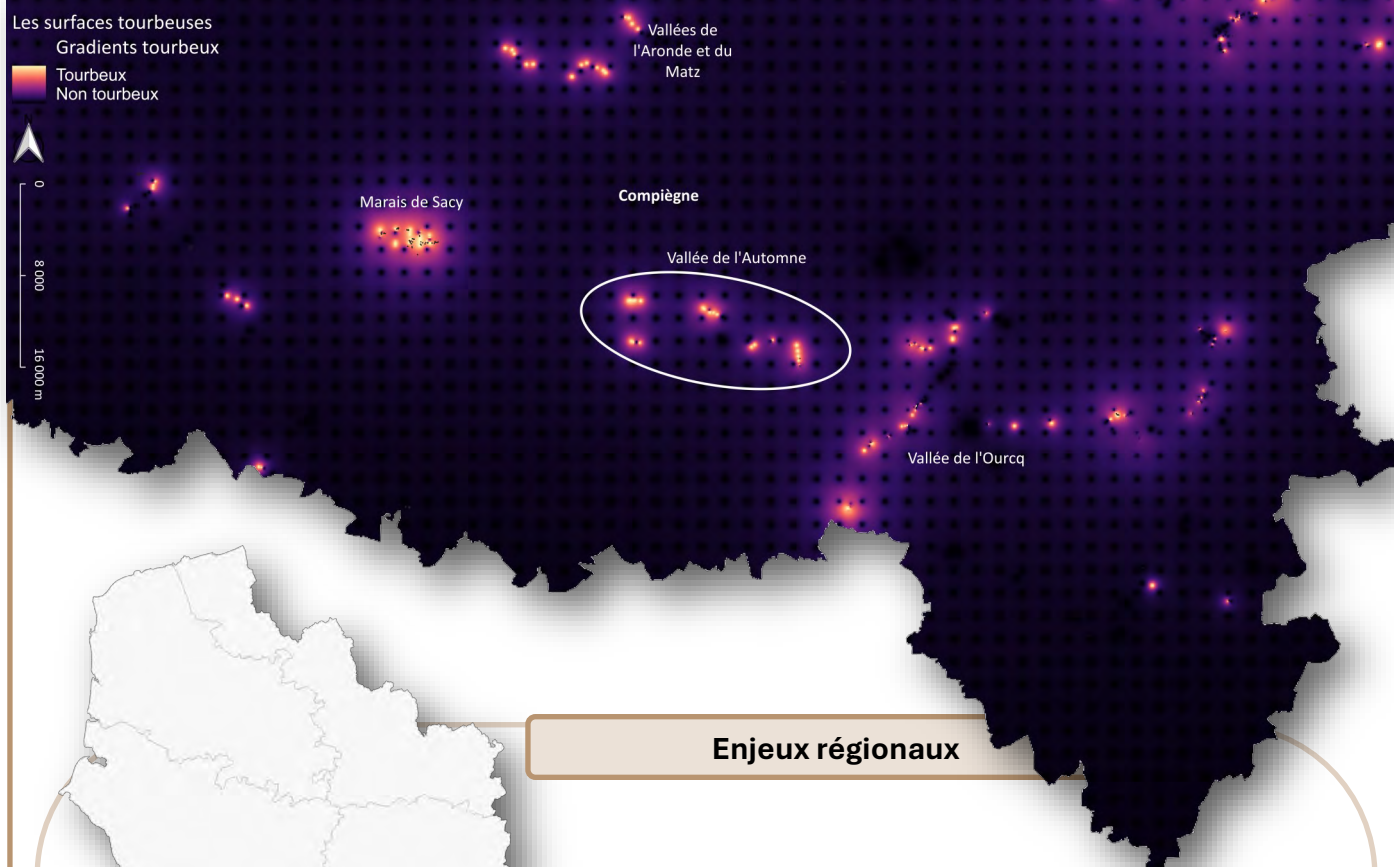
- Pas de relevé de végétation à notre disposition. Néanmoins, les espèces du lot 1 et du lot 2 se retrouvent en milieux très humides voir même saturés en eau. Nous pourrions estimer que les marais décrit au XIXe siècle pouvaient renfermer des cladiaies et roselières à phragmite et fougère des marais. Des milieux en restauration que nous avons aperçu dans une certaine mesure dans les marais le long de l'ENS des Marais des Barentons (GL016) mais où la présence d'habitat typique ne pas pu être statuée faute d'un réel relevé floristique.
- La populiculture (peuplier et principalement les fossés de drainages) engendre un assèchement du fond du ru. Ces

conditions défavorables au maintien des tourbières sont renforcées par l'état physico-chimique médiocre. La restauration de certaines zones au profit de roselière et l'objectif d'amélioration de la qualité de l'eau d'ici 2027 serait en véritable plus pour le maintien de la tourbe déjà présente mais aussi pour peut-être redensifier des populations d'espèces du Lot 1 et 2 ainsi que des végétations typique des milieux tourbeux et/ou paratourbeux.

- En sortant du spectre de la tourbe, ces Marais des Barentons (ENS GL016) est important à d'autres égards en sa composante de marais alcalin de plusieurs kilomètres de long et dont le ru est colonisé par d'importants herbiers aquatiques (notamment peuplement de Zannichelli).



Hydrocotyle vulgaris, ©M. Franquin



Enjeux régionaux

La vallée de l'Automne constitue l'un des rares ensembles à caractère tourbeux du département de l'Oise, dans un contexte régional marqué par la régression des zones humides et des tourbières. Ses bas-marais ainsi que ses formations paratourbeuses et prairies humides associées témoignent d'un fonctionnement hydrologique encore partiellement préservé, conférant à la vallée un rôle de réservoir écologique pour des habitats et des espèces aujourd'hui devenus rares à l'échelle de la région.

gion.

Au-delà de son intérêt propre, la vallée de l'Automne s'inscrit dans un réseau régional de vallées humides et tourbeuses comprenant notamment dans ce secteur la vallée de l'Aronde, la vallée du Matz, le marais de Sacy—hotspot de tourbières à l'échelle des Hauts-de-France— ainsi que la vallée de l'Ourcq dans le département de l'Aisne. Dans ce contexte, cette vallée du pays de Valois joue un rôle charnière, assurant une continuité écologique interdépartementale entre l'Oise et l'Aisne.

Cette fonction de jonction est déterminante pour le maintien des échanges biologiques entre population d'espèces associées aux milieux tourbeux et humides (flores hygrophiles spécialisées, amphibiens, odonates, invertébrés). Elle contribue à limiter l'isolement écologique et la fragilisation des peuplements, dans un contexte où ces milieux sont déjà extrêmement fragmentés et vulnérables.

La préservation de la vallée de l'Automne revêt ainsi un enjeu régional stratégique. Sa dégradation ou sa disparition fonctionnelle entraînerait une rupture dans la « trame » des zones humides tourbeuses, accentuant l'isolement des habitats, de la faune et de la flore associés voir inféodées à ces milieux déjà rares et fragmentés. A l'inverse, en maintenant des conditions hydrologiques favorables et une mosaïque de milieux humides fonctionnels, la vallée de l'Automne contribue à la résilience écologique régionale, notamment face au changement climatique, et constitue un élément stratégique de la continuité écologique des vallées humides du nord de la France.

I. Situation générale du site

- La vallée de l'Automne constitue l'une des entités écologiques les plus remarquables du sud-est de l'Oise. Vallée encaissée, elle s'étend sur environ 35 km, de Villers-Cotterêts à Verberie et se caractérise par une mosaïque de milieux naturels. Elle relie plusieurs grands massifs forestiers (Retz, Halatte, Compiègne) ou encore de multiples pelouses calcicoles et joue ainsi un rôle de corridor écologique important qu'il faut restaurer et conserver.
- Les milieux tourbeux sont aujourd'hui rares, fragmentés et souvent à caractères paratourbeux, hérités d'un fonctionnement hydrologique anciennement généralisé. Ils se présentent principalement sous forme de bas-marais, prairies humides et formations organiques hydromorphes, dépendantes d'un niveau d'eau stable et d'apport nutritifs limités.
- De surfaces modestes, ces secteurs tourbeux constituent néanmoins des reliquats à forte valeur écologique, accueillant une flore et une faune spécialisées et jouant un rôle clé dans la régulation hydrologique locale. Leurs maintiens reposent sur la conservation du fonctionnement hydrologique naturel de la vallée. Toute altération (drainage, assèchement, eutrophisation) entraînerait une perte rapide et irréversible de ces milieux parmi les plus sensibles du territoire.



II. Prospection du PRAT

- **14 mailles** ont été prospectées en 2025

Potentialité tourbeuse des mailles	Mailles prospectées validées tour-	Mailles prospectées invalidées tourbeuses
Nulle	1	1
Faible	1	NA
Moyenne	11	NA
Forte	NA	NA

- La superficie prospectée est de 3,49 km² dont **3,25 km²** considérés comme **avérés tourbeux**.
- **32 sondages** ont été réalisés, dont 23 sont déterminants tourbeux.

La **distribution** des sondages est **plutôt homogène**. Les sondages **déterminants tourbeux** se concentrent dans le **fond de vallée**. Les sondages **non-déterminants** sont plutôt présents en **périphérie**, tandis que **certaines séparent les sous enveloppes** et sont plutôt dû à des **actions anthropiques** (remblais et drainages).

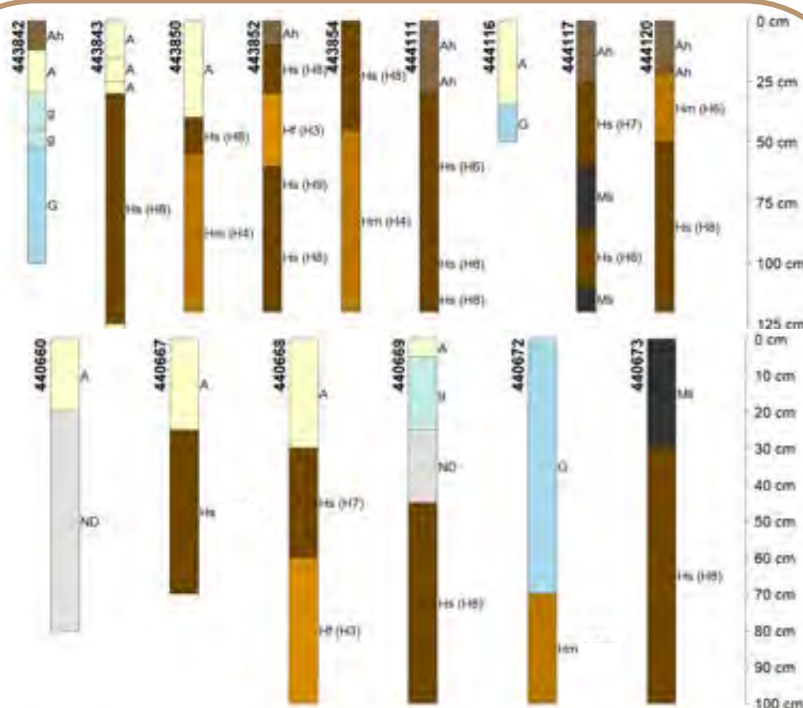
Toutes les mailles à potentialité moyenne n'ont pas pu être prospectées par manque de temps mais aussi d'accessibilité

III. La pédologie

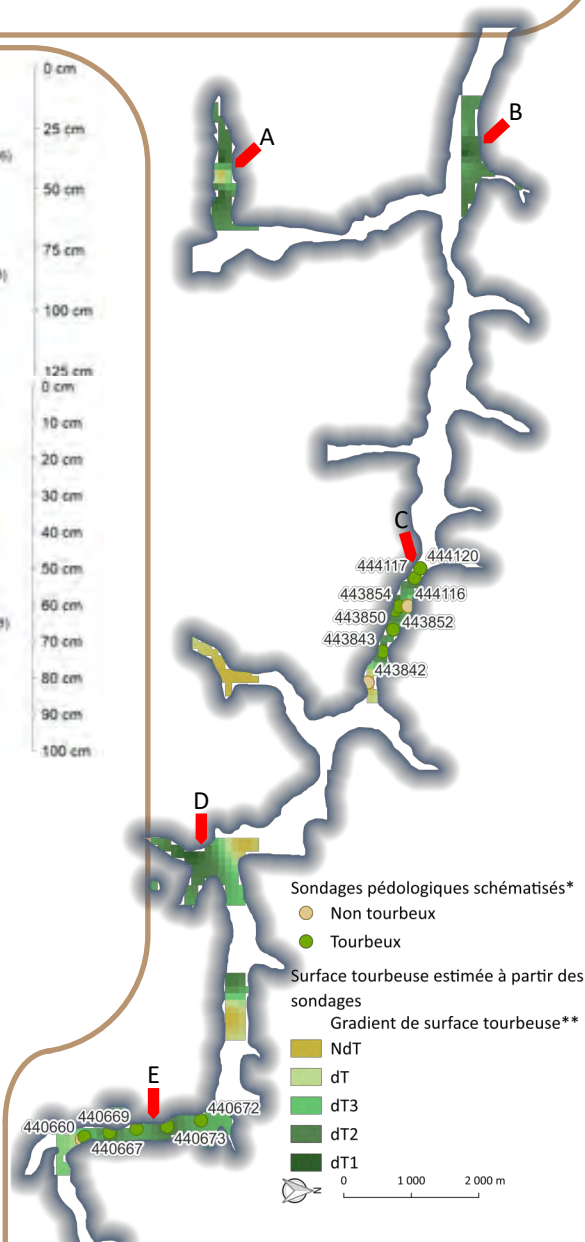
Catégorie PRAT*	Nombre de sondages
Non tourbeux	9
Tourbe de surface (dT1)	5
Tourbe de subsurface (dT2)	13
Tourbe 'profonde' (dT3)	5
Para-Tourbière (dT4)	0

*Cf le rapport d'activité du PRAT 2025

- C. Marais de Fresnoy-la-Rivière, un mélange de sols hygro-morphes minéraux et d'autres organiques. Variation de poches tourbeuses et non-tourbeuses. La surface est plutôt organo-minérale et ensuite tourbeuse en subsurface. La tourbe y est tout aussi bien saprique que mésique ou fibrique. De nombreux macrorestes ont été identifiés : phragmites, aulnes, prêles, *C. giganteum* et *D. polygamus*.
- D. Fond de vallée de Bonneuil-en-Vallois, tourbe saprique présente dès la surface. Nous y retrouvons des macrorestes de phragmites.
- E. Val de Wallu, aucune tourbe en surface, de la tourbe fibrique très bien conservée est néanmoins retrouvée à 60 cm de profondeur. Graine et phragmites ont été retrouvés.



Les sondages sont caractéristiques des milieux humides et contiennent des traces d'hydromorphies. Ces dernières se caractérisent par la présence d'horizons réductiques, parfois dès la surface comme pour le 440672, témoignant d'un horizon geyifié continuellement saturé en eau. Nous retrouvons aussi des horizons tourbeux, là aussi parfois dès la surface. La tourbe est principalement saprique en surface. Nous retrouvons, en épaisseurs variables, des tourbes mésiques à fibriques sous les 50 cm de profondeur, indiquant la présence d'une tourbe encore bien conservée et aux macrorestes identifiables. Nous y retrouvons notamment *Calliergon giganteum* et *Drepanocladus polygamus*. Ce premier est aussi retrouvé dans l'Ourcq, témoignant d'un passé tourbeux commun, ce qui renforce la continuité écologique entre Automne et Ourcq.



IV. Flore et habitats tourbeux de la région Hauts-de-France

La vallée de l'Automne est une ancienne vallée tourbeuse alcaline de la région Hauts-de-France. La fonctionnalité écologique propre aux tourbières paraît extrêmement dégradée, néanmoins quelques espèces turficoles y sont encore retrouvées.

Ainsi, cet affluent de l'Oise est une vallée à enjeux tourbeux de part sa composition pédologique mais aussi de part sa végétation.

Les espèces présentées ici ont toutes été aperçues sur les 10 dernières années. Les espèces en gras ont été aperçues en 2025.



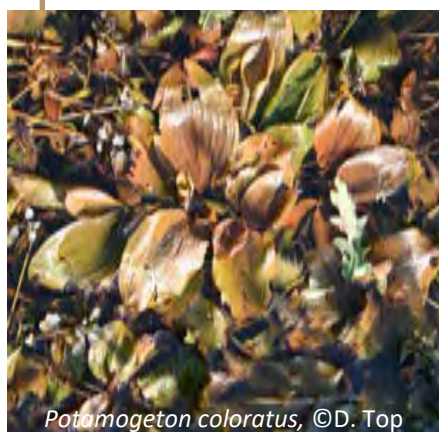
Carex lepidocarpa, ©M.Franquin

Lot 1 : Espèces de cœur turfigène

Taxon*	Nom commun	Rareté	Menace	enjeux_reg
Carex lepidocarpa Tausch, 1834	Laïche à fruits écailleux	AR	LC	1
Philonotis marchica (Hedw.) Brid	Philonotis de la marche	E?	DD	1
Potamogeton coloratus Hornem., 1813	Potamot coloré	AR	LC	1

Carex lepidocarpa a été observé en 2025 dans le marais de Baybelle dans une partie ouverte de l'exploitation forestière. D'autre occurrence, un peu plus ancienne indique la présence de *C. lepidocarpa* ainsi que de *P. marchica* dans les marais de Fresnoy-la-Rivière. Enfin *P. coloratus* a été retrouvé dans le vallon de Wallu.

Le secteur tourbeux en aval de la vallée, sur la commune de Béthisy-Saint-Martin, est une propriété privée d'environ 200 ha en partie dédiée à la chasse au gibier d'eau. La prospection initiale, centrée sur la pédologie n'a pas de relevé d'espèces spécifiques dans les enveloppes tourbeuses. Une journée de prospection orientée sur la flore pourrait révéler la présence d'espèces à minima du Lot 2 voir du Lot 1.



Potamogeton coloratus, ©D. Top

IV. Flore et habitats tourbeux de la région Hauts-de-France



Thelypteris palustris ©J.Lebrun

Lot 2 : espèces retrouvées associées aux milieux tourbeux (mais pas uniquement)

Des espèces plutôt présentes dans la moitié amont de la vallée. *T. palustris* est bien répartie avec plusieurs centaines de pieds de relevé.

Taxon*	Nom commun	Rareté	Menace	Enjeux reg
Aneura pinguis (L.) Dumort.	Aneure grasse	AR	LC	1
Carex echinata Murray, 1770	Laîche étoilée	R	LC	1
Fissidens adianthoides Hedw.	Fissident faux-adiante	AR	LC	1
Juncus subnodulosus Schrank, 1789	Jonc à tépales obtus ; Jonc nouveaux	AC	LC	2
Lysimachia tenella L., 1753	Mouron délicat	AR	LC	1
Thelypteris palustris Schott, 1834	Fougère des marais	PC	LC	1

Végétation :

- Certains syntaxons caractéristiques des végétations ouvertes des sols tourbeux sont présent tel que l'alliance *Hydrocotylo vulgaris—Schoenenion nigricantis* dans les marais de Fresnoy-la-Rivière. Nous retrouvons aussi l'association *Caricetum paniculatae* dans les marais de Fresnoy, Bonneuil et Coyolles, une cariçaie turficole à Laîche paniculée qu'on retrouve en Europe mais de façon ponctuelle du fait de son caractère mésotrophile.
- Nous avons aussi des végétations turficoles des milieux fermés tel que l'association *Alno glutinosa—Salicetum cinereae* au niveau de l'abbaye de Bonneuil et marais de Fresnoy ou encore une forêt à Aulnes et Fougère des marais à Largny-sur-Automne.
- ou encore l'association *Thelypterido palustris—Phragmitetum australis*.

⇒ Ces habitats sont considérés comme peu fonctionnels car souvent restreint et en cours de recolonisation (végétation amphibies) ou alors moyennement fonctionnels car peu représentés au sein de la vallée (roselières).

⇒ Le réseau de sites de la vallée de l'Automne semble avoir une responsabilité importante dans le cadre du maintien et l'améliorations des végétations de Phragmites commun et fougère des marais. Cette végétation joue en effet un « rôle clé en tant que communauté edificatrice du substrat tourbeux qui structure le complexe paysager des marais tourbeux alcalins. Végétation également importante en tant qu'habitat pour la faune [...] » (GAUDARD, J., MORVANT, M., TOP, D., 2024—PDG multisites 2024 –2033 de la Vallée de l'Automne)



Lysimachia tenella, ©L.Raymond

Perspectives

Diffusion des données et sensibilisation

Les données produites sur le terrain, ainsi que les analyses et modélisations réalisées à partir de celles-ci, ont permis d'aboutir à la création de plusieurs outils cartographiques offrant une délimitation relativement fine des enveloppes de tourbe en région. Ce travail a également permis d'identifier clairement les territoires concernés et d'appréhender les premiers enjeux propres à chacun d'eux.

Le programme 2026-2028 du PRAT prévoit une diffusion active de ces résultats ainsi que leur intégration au sein des documents de planification du territoire, afin de mieux prendre en compte les enjeux liés à la tourbe et aux zones de tourbières en région, notamment dans le cadre de l'atténuation du changement climatique et de ses effets.

Un effort de communication auprès des syndicats mixtes, des structures GEMAPI et des parcs naturels est en cours. Une journée technique de restitution des informations à destination des élus, similaire à celle initialement prévue sur le territoire Artois-Picardie en 2025, sera organisée sur le territoire de l'AESN courant 2027. Elle visera à initier la construction d'outils de gestion concertés et adaptés de la ressource en eau, au regard des enjeux liés à la tourbe identifiés.

Un travail sur les outils et les formats de diffusion de l'ensemble des données produites dans le cadre de cette étude est également en cours, afin de toucher un public aussi large que possible, qu'il soit professionnel, institutionnel ou grand public.

Évaluation des stocks de carbone

En parallèle de ce travail de diffusion des données, les inventaires réalisés ont permis d'identifier des enveloppes générales de tourbe (cartographie) qui feront désormais l'objet d'une modélisation plus fine, portant non plus uniquement sur les surfaces mais également sur les volumes de tourbe.

Cette estimation des volumes, basée sur les travaux de Chloé Garcia dans la vallée de la Somme, sera étendue à l'ensemble de la région grâce à la réalisation de sondages profonds (jusqu'à 6 m), à l'aide d'une tarière gouge et d'un pénétromètre. En parallèle, des prélèvements d'échantillons de tourbe seront analysés en laboratoire afin d'estimer leur teneur en carbone.

Ce travail, mené au cours du prochain triennal du PRAT, permettra ainsi d'évaluer non seulement les surfaces, mais aussi les volumes de tourbe et les stocks de carbone associés à l'échelle régionale, ainsi que leur rôle dans l'atténuation, ou à défaut la limitation, des impacts du changement climatique.

Enfin, à travers deux stages de six mois, des plans de gestion seront élaborés à l'échelle de certaines de ces enveloppes. Ils permettront d'identifier les enjeux liés à la faune, à la flore, au carbone et aux services écosystémiques, ainsi que les leviers d'action et les pressions existantes.

Bibliographie

- Agence de l'Eau Artois-Picardie. s. d. « L'Etat des lieux 2019 du bassin Artois-Picardie | Agence de l'Eau Artois-Picardie ». Consulté le 27 mai 2026. <https://www.eau-artois-picardie.fr/letat-des-lieux-2019-du-bassin-artois-picardie>.
- Agence de l'Eau Artois-Picardie. s. d. « L'État des lieux 2025 du bassin Artois-Picardie | Agence de l'Eau Artois-Picardie ». Consulté le 27 mai 2026. <https://www.eau-artois-picardie.fr/letat-des-lieux-2025-du-bassin-artois-picardie>.
- Belgiu, Mariana, et Lucian Drăguț. 2016. « Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions ». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 114 (avril): 24-31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>.
- BERQUER, A., L. CZERNIAK, et G. RIVIERE. 2024. « Tourbières Alcalines : Vers Une Meilleure Qualité d'eau ? L'exemple de La RNN Etang Saint-Ladre ». Colloque : Groupe d'Etudes des Tourbières, Boves, Sommes, France. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26950.28482>.
- Breiman, Leo. 2001. « Random Forests ». *Machine Learning* 45 (1): 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.
- Communauté d'Agglomération du Pays de Laon. 2019. *Schéma de Cohérence Territoriale de la Communauté d'Agglomération du Pays de Laon - Volet 3 Etat initial de l'Environnement*. Rapport de présentation. Schéma de Cohérence Territoriale de la Communauté d'Agglomération du Pays de Laon. Communauté d'Agglomération du Pays de Laon. https://www.ca-paysdelaon.fr/wp-content/uploads/2022/04/Volet-3_6-Etat-initial-de-l'environnement.pdf.
- Cubizolle, Hervé. 2019. *Les tourbières et la tourbe : géographie, hydro-écologie, usages et gestion conservatoire*. Lavoisier-Tec & Doc.
- DREAL, Hauts-de-France (DREAL HAUTS-DE-FRANCE). 2011. « Plaines de la Scarpe, de la Sensée et la l'Escaut ». juillet 3. <https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/Plaines-de-la-Scarpe-de-la-Sensee-et-la-l-Escaut.html>.
- Garcia, Chloe, Boris Brasseur, Jeremy Bacon, et al. 2025. « Lateglacial and Holocene Palaeoenvironmental Evolution of Alkaline Peatlands in the Somme Valley (France): Between Climate and Anthropogenic Forcing ». *Boreas* 54 (1): 34-59. <https://doi.org/10.1111/bor.12676>.
- GEOGRAM, Bureau d'Etudes. 2018. *Rapport de présentation du Plan Local d'Urbanisme de la commune de Barenton-Bugny*. Rapport de présentation. Barenton-Bugny (02). <https://paysdelaserre.fr/wp-content/uploads/2018/08/1-Rapport-de-presentations-PLU-BARENTON.pdf>.
- Graham, Jake D., Nancy F. Glenn, Lucas P. Spaete, et Paul J. Hanson. 2020. « Characterizing Peatland Microtopography Using Gradient and Microform-Based Approaches ». *Ecosystems* 23 (7): 1464-80. <https://doi.org/10.1007/s10021-020-00481-z>.

LEMORT, I., L. DAMBRINE, F. CHEMIN, et M. MOYSON. 2024. *Plan de gestion 2024-2033 du marais d'Aubigny-au-Bac (Aubigny-au-bac, Nord)*. Plan de Gestion. Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France. <https://www.cen-hautsdefrance.org/site/marais-daubigny-au-bac/>.

LIFE Anthr. (LIFE Anthropofens). s. d.-a. « Marais de Balançon ». Consulté le 27 mai 2026. <http://www.life-anthropofens.fr/les-sites/marais-de-balancon/>.

LIFE Anthr. (LIFE Anthropofens). s. d.-b. « Tourbières et Marais de l'Avre ». Consulté le 27 mai 2026. <http://www.life-anthropofens.fr/les-sites/tourbieres-et-marais-de-l-avre/>.

« Monographie_Barenton_Bugny ». s. d. Consulté le 27 mai 2026. https://cg-aisne.org/web/monographie_barenton-bugny.php.

Sensée – Agissons pour l'eau. s. d. Consulté le 27 mai 2026. <https://agissonspourleau.fr/leau-sur-mon-territoire/sensee/>.

Sheykhmousa, Mohammadreza, Masoud Mahdianpari, Hamid Ghanbari, Fariba Mohammadimanesh, Pedram Ghamisi, et Saeid Homayouni. 2020. « Support Vector Machine Versus Random Forest for Remote Sensing Image Classification: A Meta-Analysis and Systematic Review ». *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13: 6308-25. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3026724>.

Soudry, Adrien. 2016. *Géoarchéologie de la vallée de l'Avre entre tourbières, environnements et l'homme*. 188.

ANNEXES :

ANNEXE 1 : Flores indicatrices de la présence de tourbe en région Hauts-de-France

Tableau 14 : Liste des syntaxons déterminants tourbières en région Hauts-de-France

Syntaxon	Lot N°1	Lot N°2
ALNETEA GLUTINOSAE Braun-Blanq. & Tüxen ex V. Westh. et al. 1946		
<i>Alnetalia glutinosae</i> Tüxen 1937		
<i>Alnion glutinosae</i> Malcuit 1929		
Groupement à <i>Alnus glutinosa</i> et <i>Thelypteris palustris</i> Duhamel & Catteau in Catteau, Duhamel et al. 2009	x	
<i>Peucedano palustris</i> - <i>Alnetum glutinosae</i> Noirfalise & Sougnez 1961		x
<i>Sphagno</i> - <i>Alnion glutinosae</i> (Doing in F.M. Maas 1959) H. Passarge & Hofmann 1968	x	
<i>Sphagno palustris</i> - <i>Alnetum glutinosae</i> (Lemée 1937) Oberd. 1992 nom. invers. propos. apud auct.	x	
<i>Sphagno palustris</i> - <i>Betuletum pubescentis</i> (H. Passarge & Hofmann 1968) Mériaux et al. 1980 nom. inval. (art. 3o, 5)	x	
<i>Osmundo regalis</i> - <i>Alnetum glutinosae</i> Vanden Berghen 1971	x	
FRANGULETEA ALNI Doing ex V. Westh. in V. Westh. & den Held 1969		
<i>Salicetalia auritae</i> Doing ex Krausch 1968		
<i>Salicion cinereae</i> T. Mull. & Görs ex H. Passarge 1961		
<i>Frangulo alni</i> - <i>Salicetum auritae</i> Tüxen 1937		x
<i>Alno glutinosae</i> - <i>Salicetum cinereae</i> H. Passarge 1956	x	
JUNCETEA BUFONII B. Foucault 1988		
<i>Nanocyperetalia flavescentis</i> Klika 1935		
<i>Nanocyperion flavescentis</i> (W. Koch 1926) Libbert 1932		
<i>Cyperetum flavescentis</i> W. Koch ex Aichinger 1933		x
LEMNETEA MINORIS Tüxen ex O. Bolòs & Masclans 1955		
<i>Lemnetalia minoris</i> Tüxen ex O. Bolòs & Masclans 1955		
<i>Hydrocharition morsus-ranae</i> Rübel ex Klika in Klika & Hadac 1944		
<i>Lemno minoris</i> - <i>Hydrocharitetum morsus-ranae</i> Oberd. ex H. Passarge 1978		x
<i>Utricularietum australis</i> T. Müll. & Görs 1960 nom. mut. propos.		x
<i>Lemno trisulcae</i> - <i>Utricularietum vulgaris</i> Soó 1947		x
LITTORELLETEA UNIFLORAE Braun-Blanq. & Tüxen ex V. Westh. et al. 1946		
<i>Eleocharitetalia multicaulis</i> B. Foucault 2010		
<i>Elodo palustris</i> - <i>Sparganion</i> Braun-Blanq. & Tüxen ex Oberd. 1957		
<i>Potamo polygonifolii</i> - <i>Scirpetum fluitantis</i> Allorge 1922		x
<i>Hyperico elodis</i> - <i>Potametum oblongi</i> Allorge ex Braun-Blanq. & Tüxen 1952		x
<i>Eleocharitetum multicaulis</i> (Allorge 1922) Tüxen 1937		x
<i>Samolo valerandi</i> - <i>Baldellion ranunculoidis</i> Schaminée & V. Westh. in Schaminée et al. 1992		
<i>Littorello uniflorae</i> - <i>Baldellietum ranunculoidis</i> Ivimey-Cook & Proctor 1966		x
OXYCOCCO PALUSTRIS - SPHAGNETEA MAGELLANICI Braun-Blanq. & Tüxen ex V. Westh. et al. 1946	x	
<i>Erico tetralicis</i> - <i>Sphagnetalia papilloso</i> Schwick. 1940	x	
<i>Oxycocco palustris</i> - <i>Ericion tetralicis</i> Nordh. ex Tüxen 1937	x	
<i>Erico tetralicis</i> - <i>Sphagnetum magellanici</i> J.J. Moore 1968	x	
<i>Ericion tetralicis</i> Schwick. 1933	x	
<i>Sphagno tenelli</i> - <i>Ericetum tetralicis</i> Allorge 1926	x	
PHRAGMITO AUSTRALIS - MAGNOCARICETEA ELATAE Klika in Klika & V. Novák 1941		
<i>Phragmitetalia australis</i> W. Koch 1926		
<i>Phragmition communis</i> W. Koch 1926		
Groupement à <i>Cladium mariscus</i> et <i>Phragmites australis</i> Duhamel & Catteau in Catteau, Duhamel et al. 2009		x
<i>Magnocaricetalia elatae</i> Pignatti 1954		
<i>Magnocaricion elatae</i> W. Koch 1926		x
Groupement à <i>Carex appropinquata</i> Duhamel & Catteau in Catteau, Duhamel et al. 2009	x	
<i>Caricetum elatae</i> W. Koch 1926		x
<i>Cladietum marisci</i> Allorge 1922	x	
<i>Lathyro palustris</i> - <i>Lysimachietum vulgaris</i> H. Passarge 1978	x	
<i>Caricetum paniculatae</i> Wangerin 1916 apud auct.	x	
<i>Thelypterido palustris</i> - <i>Phragmitetum australis</i> Kuiper ex Donselaar et al. 1961	x	
<i>Caricetum ripario</i> - <i>acutiformis</i> Kobendza 1930		x
<i>Carici pseudocyperii</i> - <i>Rumicion hydrolapathi</i> H. Passarge 1964		
<i>Berulo erectae</i> - <i>Ranunculetum linguae</i> Prey & Wattez in Catteau et al. 2017	x	
POTAMETEA PECTINATI Klika in Klika & V. Novák 1941		
<i>Potametalia pectinati</i> W. Koch 1926		
<i>Potamion polygonifolii</i> Hartog & Segal 1964		x
<i>Luronio natantis</i> - <i>Potametum polygonifolii</i> W. Pietsch ex H. Passarge 1994		x
<i>Potametum colorati</i> Allorge 1921	x	
Groupement à <i>Sparganium natans</i> Duhamel & Catteau in Catteau, Duhamel et al. 2009	x	

Syntaxon	Lot N°1	Lot N°2
SCHEUCHZERIO PALUSTRIS - CARICETEA FUSCAE Tüxen 1937		
<i>Scheuchzerietalia palustris</i> Nordh. 1936	x	
<i>Rhynchosporion albae</i> W. Koch 1926		x
<i>Lycopodiello inundatae</i> - <i>Rhynchosporium fuscae</i> Schaminée et al. ex Timmermann in Dengler et al. 2004		x
<i>Caricion lasiocarpae</i> Vanden Berghen in J.P. Lebrun et al. 1949		x
<i>Junco acutiflori</i> - <i>Caricion lasiocarpae</i> (Julve 1993 nom. inval.) J.-M. Royer in Bardat et al. 2004 prov.		x
<i>Peucedano palustris</i> - <i>Caricetum lasiocarpae</i> Tüxen 1937 prov.		x
<i>Potentillo palustris</i> - <i>Caricetum lasiocarpae</i> Bal.-Tul. & Hübl 1985	x	
Groupe à <i>Juncus acutiflorus</i> et <i>Carex rostrata</i> Catteau 2015 nom. ined.	x	
<i>Junco subnodulosi</i> - <i>Caricion lasiocarpae</i> (Julve 1993 nom. inval.) J.-M. Royer in Bardat et al. 2004 prov.		x
Groupe à <i>Caltha palustris</i> et <i>Carex rostrata</i> Catteau 2015 nom. ined.		x
<i>Junco subnodulosi</i> - <i>Caricetum lasiocarpae</i> (Wattez 1968) B. Foucault 2008	x	
<i>Potentillo palustris</i> - <i>Caricetum rostratae</i> Wheeler (1980) 1984	x	
<i>Caricetalia fuscae</i> W. Koch 1926		
<i>Caricion fuscae</i> W. Koch 1926		
Groupe à <i>Carex echinata</i> et <i>Carex binervis</i> Catteau 2015 nom. ined.		x
<i>Caricetum canescenti</i> - <i>echinatae</i> Vlieger 1937	x	
<i>Hydrocotylo vulgaris</i> - <i>Anagallidetum tenellae</i> B. Foucault 2008	x	
<i>Juncion acutiflori</i> Braun-Blanq. in Braun-Blanq. & Tüxen 1952		
<i>Caro verticillati</i> - <i>Juncenion acutiflori</i> B. Foucault & Géhu 1980		x
<i>Caro verticillati</i> - <i>Molinietum caeruleae</i> (Lemée 1937) Clément 1978		x
<i>Juncenion acutiflori</i> Delpech in Bardat et al. 2004 prov.		
<i>Cirsio dissecti</i> - <i>Molinietum caeruleae</i> G. Sissingh & De Vries ex V. Westh. 1949		x
<i>Caricetalia davallianae</i> Braun-Blanq. 1949		
<i>Caricion davallianae</i> Klika 1934		x
<i>Hydrocotylo vulgaris</i> - <i>Schoenion nigricantis</i> B. Foucault 2008		
<i>Caricion pulchello</i> - <i>trinervis</i> Julve ex B. Foucault 2008		
<i>Carici trinervis</i> - <i>Schoenetum nigricantis</i> B. Foucault 2008	x	
<i>Hydrocotylo vulgaris</i> - <i>Schoenion nigricantis</i> J.-M. Royer in Bardat et al. 2004 prov.	x	
<i>Anagallido tenellae</i> - <i>Eleocharitetum quinqueflorae</i> (Bournérias in Riomet & Bournérias 1952) B. Foucault in J.-M. Royer et al. 2006	x	
<i>Junco obtusiflori</i> - <i>Schoenetum nigricantis</i> Allorge 1922	x	
<i>Hydrocotylo vulgaris</i> - <i>Juncetum subnodulosi</i> (Wattez 1968) B. Foucault in J.-M. Royer et al. 2006		x
<i>Caricetum viridulo</i> - <i>lepidocarpae</i> Catteau et al. in Catteau et al. 2017		x
<i>Molinion caeruleae</i> W. Koch 1926		x
<i>Allio angulosi</i> - <i>Molinienion caeruleae</i> B. Foucault & Géhu 1980		x
<i>Selino carvifoliae</i> - <i>Juncetum subnodulosi</i> (Allorge 1922) B. Foucault 2008		x
UTRICULARIETEA INTERMEDIO - MINORIS W. Pietsch ex Krausch 1968	x	
<i>Utricularietalia intermedio</i> - <i>minoris</i> W. Pietsch ex Krausch 1968	x	
<i>Sphagno cuspidati</i> - <i>Utricularion minoris</i> T. Müll. & Görs 1960	x	
<i>Sphagno cuspidati</i> - <i>Utricularietum minoris</i> Fijałkowski 1960	x	
<i>Scorpidio scorpioidis</i> - <i>Utricularion minoris</i> W. Pietsch ex Krausch 1968	x	
<i>Scorpidio scorpioidis</i> - <i>Utricularietum minoris</i> T. Müll. & Görs 1960	x	

Tableau 15 : Liste des plantes vasculaires typiques de tourbières en région Hauts-de-France

Nom scientifique	Code TAXREF (CDREF)	Lot n°1	Lot N°2	LRE	LRN	LRR	DH	PN	PR
<i>Anacamptis palustris</i> (Jacq.) R.M.Bateman, Pridgeon & M.W.Chase, 1997	82286	x		NE	VU	VU			NPC;Pic
<i>Baldellia ranunculoides</i> (L.) Parl., 1854	85486		x	NT	LC	LC			NPC
<i>Calamagrostis canescens</i> (Weber) Roth	87218		x	NE	LC	LC			
<i>Carex appropinquata</i> Schumacher.	88344		x	LC	LC	NT			
<i>Carex canescens</i> L., 1753	88407		x	LC	LC	NT			Pic
<i>Carex diandra</i> Schrank	88468	x		NE	NT	VU			Pic
<i>Carex echinata</i> Murray	88489		x	NE	LC	LC			

Nom scientifique	Code TAXREF (CDREF)	Lot n°1	Lot N°2	LRE	LRN	LRR	DH	PN	PR
Carex flava L.	88511	x		[NE]	[LC]	#			
Carex hostiana DC.	88578	x		NE	LC	VU			
Carex lasiocarpa Ehrh.	88614	x		LC	LC	NT			Pic
Carex lepidocarpa Tausch	88624	x		NE	LC	LC			NPC
Carex nigra (L.) Reichard	88720		x	NE	LC	LC			
Carex pulicaris L.	88802		x	NE	LC	NT			Pic
Carex rostrata Stokes	88840		x	LC	LC	LC			
Cicuta virosa L., 1753	91199		x	LC	VU	EN			NPC;Pic
Cirsium dissectum (L.) Hill	91322	x		NE	LC	VU			
Cladium mariscus (L.) Pohl	91823	x		LC	LC	LC			NPC
Comarum palustre L.	92217	x		NE	LC	VU			NPC;Pic
Cyperus flavescens L., 1753	93929	x		LC	LC	EN			
Dactylorhiza incarnata (L.) Soó	94259		x	LC	NT	NT			NPC;Pic
Drosera intermedia Hayne	95438	x		NT	LC	EN		Oui	
Drosera rotundifolia L.	95442		x	LC	LC	NT		Oui	
Dryopteris cristata (L.) A. Gray	95561	x		LC	EN	EN		Oui	
Eleocharis quinqueflora (F.X. Hartm.) O. Schwartz	95927	x		LC	LC	NT			NPC;Pic
Epilobium palustre L., 1753	96226		x	NE	LC	LC			
Epipactis palustris (L.) Crantz	96465		x	LC	NT	NT			NPC
Eriophorum angustifolium Honck.	96844	x		LC	LC	NT			NPC;Pic
Eriophorum latifolium Hoppe	96852	x		NE	LC	CR			Pic
Eriophorum vaginatum L., 1753	96861	x		NE	LC	VU			Pic
Gentiana pneumonanthe L.	99922		x	LC	LC	VU			Pic
Hydrocotyle vulgaris L.	103142		x	LC	LC	LC			
Hypericum elodes L., 1759	103272		x	LC	LC	VU			Pic
Juncus subnodulosus Schrank	104340		x	LC	LC	LC			NPC
Lathyrus palustris	105239	x		NE	EN	VU			NPC;Pic
Liparis loeselii (L.) L.C.M. Rich.	106353		x	NT	NT	VU	Ann. II	Oui	
Lysimachia tenella L., 1753	107085		x	NE	LC	LC			NPC;Pic
Menyanthes trifoliata L.	108345	x		LC	LC	NT			NPC;Pic
Pedicularis palustris L.	112590	x		NE	NT	NT			NPC
Pinguicula vulgaris L.	113639	x		LC	LC	CR			

Nom scientifique	Code TAXREF (CDREF)	Lot n°1	Lot N°2	LRE	LRN	LRR	DH	PN	PR
Potamogeton coloratus Hornem.	115237	x		LC	LC	LC			NPC;Pic
Ranunculus lingua L.	117096		x	LC	VU	LC		Oui	
Rhynchospora alba (L.) Vahl, 1805	117731	x		NE	LC	VU			Pic
Rhynchospora fusca (L.) W.T.Aiton, 1810	117732	x		NE	LC	VU			
Schoenus nigricans L.	121581		x	NE	LC	NT			NPC
Selinum carvifolia (L.) L.	122329		x	NE	LC	LC			
Sparganium natans L.	124412	x		NT	NT	NT			NPC;Pic
Spiranthes aestivalis (Poir.) Rich., 1817	124699	x		DD	VU	RE	Ann. IV	Oui	
Taraxacum palustre (Lyons) Symons	125686		x	NE	DD	DD			
Thelypteris palustris Schott	126276		x	LC	LC	LC			NPC
Thysselinum palustre	126615	x		NE	LC	LC			NPC;Pic
Trichophorum cespitosum (L.) Hartm., 1849	127193		x	NE	LC	EN			Pic
Utricularia bremii Heer ex Köll., 1839	128308	x		DD	DD	NT			
Vaccinium oxycoccos L.	128347	x		NE	LC	VU			Pic
Valeriana dioica L.	128394		x	NE	LC	LC			NPC
Viola palustris L.	129639	x		NE	LC	VU			NPC;Pic

Tableau 16 : Liste des bryophytes typiques de tourbières en région Hauts-de-France

Nom	CD_REF	Type tourbière	Lot n°1	Lot n°2	LRE	LRR
Aneura pinguis (L.) Dumort.	6251	Alcaline		x	LC	LC
Aulacomnium palustre (Hedw.) Schwägr.	4958	Alcaline/acide		x	LC	LC
Calliergon cordifolium (Hedw.) Kindb.	5458	Acide	x		LC	NT
Calliergon giganteum (Schimp.) Kindb.	5464	Alcaline	x		LC	VU
Calypogeia sphagnicola (Arnell & J.Perss.) Warnst. & Loeske	6640	Acide	x		LC	EN
Campyliadelphus elodes (Lindb.) Kanda, 1975	434378	Alcaline	x		NT	VU
Campylium protensum (Brid.) Kindb.	5491	Alcaline		x	LC	LC
Campylium stellatum (Hedw.) Lange & C.E.O.Jensen	5494	Alcaline	x		LC	LC
Cephaloziella elachista (J.B.Jack ex Gottsche & Rabenh.) Schiffn.	6555	Acide	x		VU	VU
Climacium dendroides (Hedw.) F.Weber & D.Mohr, 1804	5093	Alcaline	x		LC	LC
Dicranum bonjeanii De Not.	4741	Acide		x	LC	VU
Dicranum polysetum Sw. ex anon.	4752	Acide		x	LC	NT
Fissidens adiantoides Hedw.	3896	Alcaline		x	LC	LC
Kurzia pauciflora (Dicks.) Grolle	6613	Acide	x		LC	CR*
Leiomylia anomala (Hook.) J.J.Engel & Braggins	778930	Acide	x		NE	RE

Nom	CD_REF	Type tourbière	Lot n°1	Lot n°2	LRE	LRR
Odontoschisma sphagni (Dicks.) Dumort., 1835	6600	Acide	x		LC	RE
Philonotis caespitosa Jur.	4987	Alcaline	x		LC	VU
Philonotis calcarea (Bruch & Schimp.) Schimp.	4988	Alcaline	x		NT	EN
Philonotis marchica (Hedw.) Brid.	4990	Alcaline	x		EN	RE
Plagiomnium elatum (Bruch & Schimp.) T.J.Kop.	4936	Alcaline	x		LC	VU
Polytrichum commune Hedw.	3864	Acide	x		LC	LC
Polytrichum strictum Menzies ex Brid.	3879	Acide	x		LC	VU
Riccardia multifida (L.) Gray	6259	Alcaline		x	LC	NT
Sarmentypnum exannulatum (Schimp.) Hedenäs	718804	Acide	x		LC	VU
Scorpidium cossonii (Schimp.) Hedenäs	434405	Alcaline	x		LC	VU
Scorpidium scorpioides (Hedw.) Limpr.	5802	Alcaline	x		NT	VU
Sphagnum angustifolium (C.E.O.Jensen ex Russow) C.E.O.Jensen	6722	Acide	x		LC	LC
Sphagnum auriculatum Schimp.	6754	Acide	x		LC	LC
Sphagnum capillifolium (Ehrh.) Hedw.	6728	Acide	x		LC	LC
Sphagnum compactum Lam. & DC.	6734	Acide	x		LC	VU
Sphagnum cuspidatum Ehrh. ex Hoffm.	6739	Acide	x		LC	VU
Sphagnum flexuosum Dozy & Molk.	6748	Acide	x		LC	LC
Sphagnum inundatum Russow	6742	Acide	x		LC	LC
Sphagnum magellanicum Brid.	6760	Acide	x		NE	VU
Sphagnum papillosum Lindb.	6774	Acide	x		LC	LC
Sphagnum russowii Warnst.	6785	Alcaline/acide	x		LC	VU
Sphagnum squarrosum Crome	6789	Alcaline/acide	x		LC	LC
Sphagnum subnitens Russow & Warnst.	6790	Alcaline/acide	x		LC	LC
Sphagnum subsecundum Nees	6794	Acide	x		LC	NT
Sphagnum tenellum (Brid.) Pers. ex Brid.	6795	Acide	x		LC	NT
Sphagnum teres (Schimp.) Ångstr.	6797	Alcaline/acide	x		LC	VU
Straminergon stramineum (Dicks. ex Brid.) Hedenäs	434407	Acide	x		LC	CR
Tomentypnum nitens (Hedw.) Loeske	5933	Alcaline/acide	x		NT	EN
Warnstorfia fluitans (Hedw.) Loeske	5514	Acide	x		LC	NT

Tableau 17 : Liste des Characées typiques de tourbières en région Hauts-de-France

Taxons	Lot n°1	Lot n°2
Chara aspera Willd., 1809		x
Chara hispida var. hispida	x	
Chara intermedia A.Braun	x	
Chara polyacantha A.Braun, 1859	x	
Nitella tenuissima (Desvaux)	x	
Nitellopsis obtusa (Desv.) J.Groves, 1919		x

ANNEXE 2 : Cartographie des potentialités tourbeuses en Zone à Dominance Humide de la région Hauts-de-France



ANNEXE 3 : Comparaison de la distribution des sondages entre la base A et le base B

L'origine des sondages conserve un effet significatif sur le nombre de point par maille (Tab.X) même après contrôle de la surface :

- Le coefficient associé à la Base B est négatif et hautement significatif ($\beta = -1,34$; $z = -16,86$; $p\text{-value} < 2 \times 10^{-16}$)

Variable	Coefficient (β)	Erreur standard	Statistique z	p-value
Base A (référence)	-10.58	0.05	-192.45	<2e-16
Base B	-1.34	0.08	-16.86	<2e-16

A surface équivalente, le nombre attendu de sondages par maille pour la Base B est ainsi multiplié par $\exp(-1,34)$, soit environ 0,26 fois celui observé pour la Base A. Cela correspond à une réduction d'environ 74 % du nombre de sondages par maille dans les données issues de la prospection récente.

Ces résultats confirment l'existence d'un biais d'effort d'échantillonnage lié au protocole d'acquisition, indépendant de la surface des mailles.

ANNEXE 4 : Relation entre la validation des mailles par un sondage déterminant tourbeux et le niveau de potentialité de la maille

Validation de la présence de tourbe par catégorie de mailles	Nombre de averee	Validation par la présence d'au moins 1 sondage déterminant tourbière	Incertitude (en %)
1.Nulle	79	11,69	
NON	56		
OUI	23	29,11	5,1
2.Faible	54	7,99	
NON	34		
OUI	20	37,04	6,6
3.Moyenne	365	53,99	
NON	131		
OUI	234	64,11	2,5
4.Forte	178	26,33	
NON	25		
OUI	153	85,96	2,6
Total général	676		

ANNEXE 5 : Résidus standardisés du test Chi² de la relation entre catégorie de sondage et niveau de potentialité tourbeuse pour la Base A et la Base B

Base A

Indicateur de potentialité de la maille	NdT	dT1	dT2	dT3	dT4	dT
Nulle	5,92	-2,9	-2,55	-0,64	-0,34	-5,08
Faible	4,76	-2,63	-1,95	-0,84	1,61	-3,98
Moyen	3,68	-2,8	-1	-0,49	0,35	-2,88
Fort	-8,49	5,49	2,91	1,17	-1,05	6,91

Base B

Indicateur de potentialité de la maille	NdT	dT1	dT2	dT3	dT4
Nulle	2,43	-4,47	-3,35	3,73	-1,18
Faible	0,33	-1,14	1,55	-0,62	-0,8
Moyen	1,31	-0,53	0,11	-1,44	-1,67
Fort	-3,83	4,72	1,59	-0,52	3,62

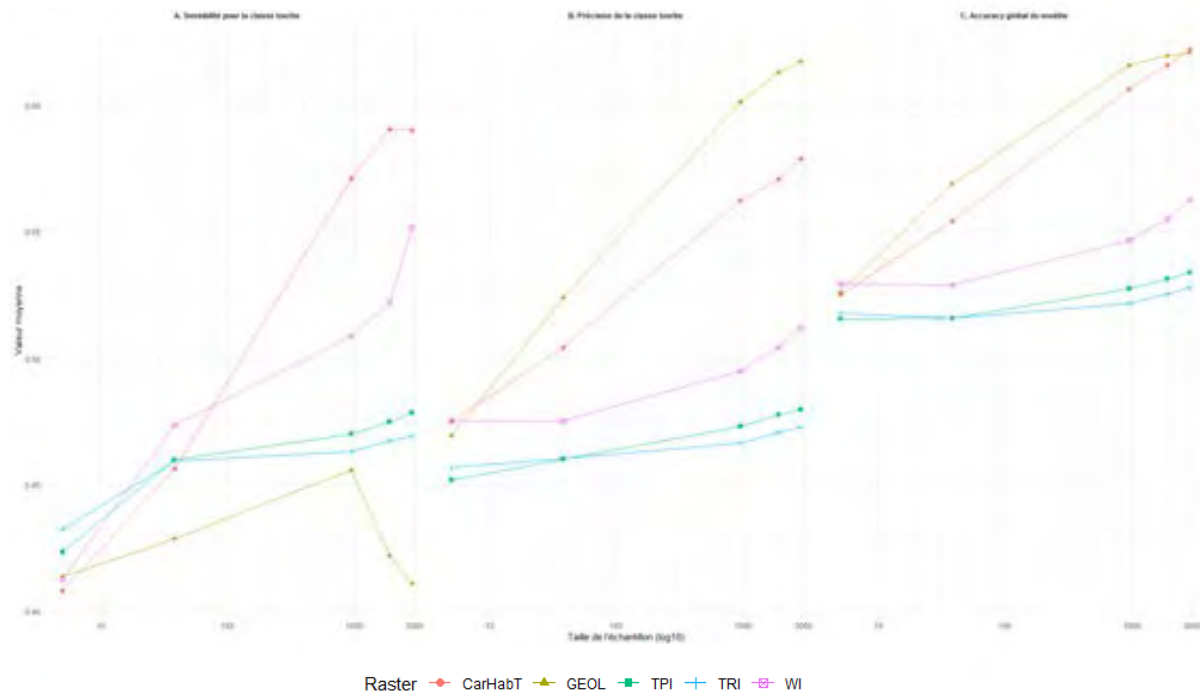
ANNEXE 6 : Environnement technique de travail

PC	Dell Latitude 5550	Intel® Core™ Ultra 5 135U 1.60 GHz ; 16,0 Go à 5600 MT/s ; SSD 512 Go
OS	Windows 11 Pro 23H2	-
QGIS	3.34.4 LTR – Prizren ; 3.44.9 – Solothurn	OSGeo4W ; Plugin : WhiteboxTools 1.0.9 ; Orfeo-ToolBox 9.1.1-Win64 ; SAGANG 1.1.0 + SAGA9 ; Group Stats 3.0.1
R	Version 4.5.2 (2025-10-31 ucrt)	Package : liste ci-dessous

Package	Version	Utilité principale
AQP	2.2-1	Analyse et visualisation de profils de sols (pédologie) : profils, corrélations
dplyr	1.1.4	Manipulation de données
sf	1.0-23	Données spatiales vectorielles
terra	1.8-86	Rasters géospatiaux : manipulation de rasters
ggplot2	4.0.1	Visualisation : graphiques avancés (couches, thèmes, cartes statiques)
randomForest	4.7-1.2	Forêts aléatoires : classification/régression non supervisée, importance des variables
caret	7.0-1	Machine Learning : preprocessing, cross-validation, tuning de modèles (inclut randomForest)
pROC	1.19.0.1	Courbes ROC : évaluation de modèles binaires (AUC, sensibilité/spécificité)
foreach	1.5.2	Boucles parallèles : division du PC et itérations pour accélérer les calculs
doParallel	1.0.17	Parallélisation : fonctionne en lien avec foreach
Corrplot	0.95	Gestion et visualisation des matrices de corrélations

ANNEXE 7 : Evolution des performances du modèle Random Forest sur les rasters monobandes

Évolution des performances du modèle Random Forest sur les rasters monobandes



ANNEXE 8 : Bordereau de saisie terrain



BORDEREAU DE SAISIE TERRAIN PEDO PRAT

[illegible]

BORDEREAU DE SAISIE TERRAIN PEDO PRAT

REMARQUES	Légende
	Couleur : Cf Code Munsell si disponible Texture : Correspond à une estimation des pourcentages des composants du sol (Argile, sable, limon, organique). Par exemple un horizon composé à 60% de limon 10 % de sable et 30% d'argile sera noté L60s10a30. La texture dominante est mise en majuscule Structure 1 : particulaire 2 grumeleux 3 massive 4 autre %EG : pourcentage d'élément grossier supérieur à 2mm Tac. : Présence de tâche 1 d'oxydation 2 de réduction 0 Pas de tâche Abo. : Abondance de ces tâches dans l'horizon 1 < 5% 2 5 à 15% 3 15 à 40% 4 > 40% Hum. : Humidité de l'horizon au moment du prélèvement 1 sec 2 frais 3 humide 4 saturé Comp. : compacité du sol : 1 pénètre sans effort 2 avec effort 3 in complètement 4 pas ou quelques mm. Frab. : friabilité de l'échantillon : 1 ne s'effrite pas 2 sous forte pression 3 s'effrite facilement 4 Très légère pression Alt MO : Altération de la matière organique 1 végétaux identifiables 2 identifiable avec des traces de décomposition 3 Peux d'organes végétaux identifiables 4 non identifiables Macrorestes : Type de macrorestes rencontré VPost : résultats du test Von Post. (Cf fiche von Post)

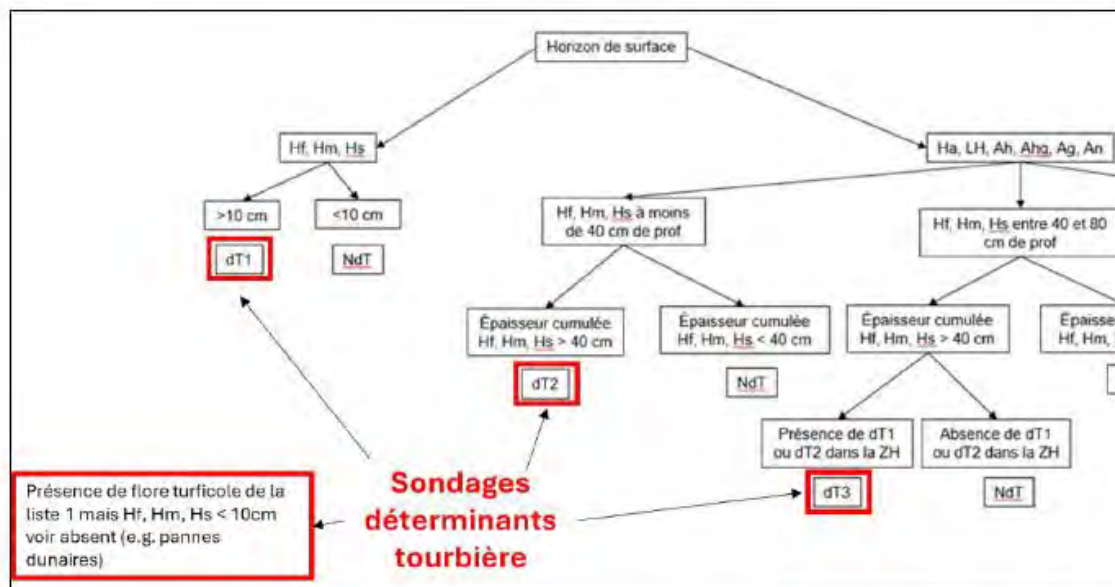


Figure 1 Arbre de décision des sondages déterminants tourbières

Tableau 1 Critères de décision Von Post

FIBRIQUE	H1	Tourbe non décomposée qui, lorsqu'on la presse dans la main, libère une eau presque limpide. Les résidus de plantes sont facilement identifiables. Ne contient aucun matériel amorphe.
	H2	Tourbe qui n'est pratiquement pas décomposée et qui, lorsqu'on la presse dans la main, libère une eau très peu colorée (brun-jaune). Les résidus de plantes sont encore facilement identifiables. Ne contient aucun matériel amorphe.
	H3	Tourbe très peu décomposée qui, lorsqu'on la presse dans la main, libère une eau trouble de couleur brun pâle. Aucun matériel ne s'échappe entre les doigts. Les résidus de plantes sont encore identifiables. Ne contient aucun matériel amorphe.
MÉSIQUE	H4	Tourbe très peu décomposée qui, lorsqu'on la presse dans la main, libère une eau trouble de couleur brun foncé. Quelques particules de matériel passent entre les doigts, et le matériel pressé qui reste dans la main est légèrement collant. Les résidus de plantes sont encore identifiables, quoique certains critères d'identification aient disparus.
	H5	Tourbe peu décomposée qui, lorsqu'on la presse dans la main, laisse échapper une eau très trouble chargée de particules organiques. Le matériel pressé qui reste dans la main est collant. La structure des résidus de plantes est assez distincte.
	H6	Tourbe plutôt décomposée dont il est difficile de reconnaître la structure des constituants. Lorsqu'on la presse dans la main, environ 1/3 du matériel s'échappe entre les doigts. Il y a très peu d'eau libre, laquelle est boueuse. Ce qui reste dans la main est assez collant mais l'identification des constituants se fait plus facilement qu'avant le pressage.
SAPRIQUE	H7	Tourbe décomposée dont il est difficile de reconnaître la structure et les constituants. Lorsqu'on la presse dans la main, environ la moitié du matériel passe entre les doigts. L'eau, s'il y en a, est très boueuse.
	H8	Tourbe très décomposée dont il est très difficile de reconnaître la structure des constituants. Lorsqu'on la presse dans la main, environ les deux tiers du matériel passent entre les doigts. Ce qui reste dans la main est principalement constitué de racines et de fibres qui résistent à la décomposition.
	H9	Tourbe presque entièrement décomposée dont il n'est presque plus possible de reconnaître les constituants. Lorsqu'on la presse dans la main, pratiquement tout le matériel s'échappe entre les doigts sous forme de boue.
	H10	Tourbe complètement décomposée dont la structure des constituants est indiscernable. Lorsqu'on la presse dans la main, tout le matériel s'échappe entre les doigts.