

Étude du fonctionnement hydrologique du complexe tourbeux de Virennnes, site Natura 2000

Blaiz MARTIN



Master 1^{ère} année Gestion de l'environnement, parcours Géoenvironnement

Tutrice de la structure d'accueil : Coline PEIGNELIN

Tuteurs universitaires : Emmanuelle DEFIVE, Pierre GOUBET

Je soussigné, Blaiz MARTIN, étudiant en Master Gestion de l'environnement, atteste avoir rédigé personnellement ce travail écrit et n'avoir utilisé que les sources et moyens autorisés, et mentionné comme telles les citations et paraphrases.

Je déclare être pleinement conscient que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publié sur toutes formes de support, y compris internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée.

En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport.

Lieu et date : Plaine-Haute, le 19 août 2025

Signature :

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Blaiz Martin', written in a cursive style with a long horizontal stroke extending to the right.

Table des matières

Table des figures, tableaux et annexes	4
Introduction	5
1 - Etat de l'art	6
1.1 - Fonctionnement des tourbières et enjeux de conservation	6
1.2 - Méthodes d'étude des tourbières : retour sur les approches scientifiques	7
1.2.1 - Caractérisation et délimitation des unités écologiques	7
1.2.2 – Relevés des espèces bioindicatrices d'émergences.....	8
1.2.3 – Mesure de la profondeur de tourbe	8
1.2.4 – Relevés et pointages du réseau d'écoulements	9
1.2.5 – Apport du SIG dans les études de milieux humides.....	10
2 - Problématique et objectifs de l'étude	11
2.1 - Problématique	11
2.2- Objectifs de l'étude	11
3 - Terrain d'étude et méthodologie	12
3.1 - Présentation du site : le complexe tourbeux de Virenes	12
3.2 - Méthodologie	14
3.2.1 - Caractérisation et délimitation des unités écologiques	14
3.2.2 - Relevé des espèces bioindicatrices d'émergence.....	15
3.2.3 - Campagne de sondage de profondeur de sol.....	16
3.2.4 - Relevés et pointages de l'organisation hydrographique	16
4 - Présentation des résultats	17
4.1 - Les unités écologiques	17
4.2 - Répartition des espèces bioindicatrices	20
4.3 - Mesures de l'épaisseur du sol	25
4.3.1 - Le site dans son ensemble.....	25
4.3.2 - Modèle d'épaisseurs de tourbe.....	26
4.4 - Organisation des écoulements	27
4.4.1 - Réseau d'écoulements des eaux de surface.....	27
4.4.2 - Relevé des émergences	28
5 - Interprétation et discussion des résultats	30
5.1 - Diversité des unités écologiques	30
5.2 - Espèces bioindicatrices et organisation des écoulements	30
5.3 - Épaisseurs de la tourbe et influence des émergences	31
5.4 - Réseau hydrographique et émergences	32
5.5 - Vers une lecture intégrée du fonctionnement hydrique	33
6 - Conclusion et perspectives	33

<i>Bilan personnel</i>	34
<i>Références bibliographiques</i>	35
<i>Annexes</i>	37
<i>Résumé</i>	51

Table des figures, tableaux et annexes

Figures

Figure 1 : Carte des habitats de 2006.....	13
Figure 2 : Carte des unités écologiques.....	18
Figure 3 : Carte des unités écologiques regroupées par grands types.....	20
Figure 4 : Carte de la localisation des espèces bioindicatrices d'émergence.....	21
Figure 5 : Carte de la répartition des espèces bioindicatrices par grands types d'unités écologiques.....	24
Figure 6 : Cartographie des mesures d'épaisseur du sol.....	25
Figure 7 : Carte du modèle d'épaisseur de tourbe.....	26
Figure 8 : Carte de l'organisation du réseau d'écoulements de surface.....	28
Figure 9 : Carte de l'organisation du réseau d'écoulements et espèces bioindicatrices.....	31
Figure 10 : Carte de la topographie et des émergences.....	32

Tableaux

Tableau 1 : Nombre de données et superficie par type d'unité écologique (UE).....	19
Tableau 2 : Nombre de données par espèces bioindicatrices (EBI).....	22
Tableau 3 : Nombre de données EBI par type d'UE.....	22
Tableau 4 : Répartition des données EBI par type d'UE.....	23
Tableau 5 : Proportion d'EBI par type d'UE.....	24
Tableau 6 : Statistiques des épaisseurs de sol.....	25
Tableau 7 : Moyennes des épaisseurs de sol par type d'UE.....	26
Tableau 8 : Statistiques des épaisseurs de tourbe du modèle.....	27

Annexes

Annexe 1 : Présentation du Parc naturel régional Livradois-Forez.....	37
Annexe 2 : Fiches botaniques de terrain.....	39

Introduction

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un stage d'amélioration des connaissances relatives au complexe tourbeux de Virennnes, situé sur la commune du Monestier dans le Livradois dans le département du Puy-de-Dôme. Ce site, reconnu pour sa richesse écologique, est intégré au réseau Natura 2000 en raison de la présence d'habitats et d'espèces d'intérêt communautaire. Le stage, d'une durée de 14 semaines, s'est déroulé entre mai et août 2025 au sein du Parc naturel régional Livradois-Forez, gestionnaire du site Natura 2000.

Les tourbières, objet d'étude du stage, sont des écosystèmes humides particuliers, auxquels on attribue de nombreuses définitions, mais que Pierre Goubet décrit comme caractérisés par la présence de tourbe et/ou d'une végétation turfigène produisant de la tourbe. Les tourbières jouent un rôle écologique majeur en tant que réservoirs de biodiversité, puits de carbone et régulateurs hydrologiques. Le fonctionnement de ces milieux dépend de plusieurs facteurs, notamment des conditions climatiques, du substrat géologique, de l'alimentation en eau (pluviale, superficielle ou souterraine) et de la dynamique de la végétation. De nombreuses études ont déjà permis de décrire les grands principes de leur fonctionnement, mais certaines zones d'ombre subsistent, notamment en ce qui concerne les interactions entre hydrologie souterraine et dynamique écologique locale. C'est dans l'optique d'une meilleure compréhension de ces interactions que s'inscrit l'étude menée sur le complexe de Virennnes.

Ce complexe tourbeux développé sur le versant est du Livradois s'intègre aux contextes de moyenne montagne du Massif central, un massif à la géologie contrastée, constitué de substrats cristallins, volcaniques et sédimentaires. Ce massif est marqué par un fort compartimentage tectonique, à l'origine d'un réseau dense de fractures pouvant jouer un rôle clé dans les circulations d'eau souterraine. Le climat montagnard, caractérisé par une pluviométrie élevée et des températures contrastées, influence à la fois les régimes hydrologiques et la dynamique de la végétation. Par ailleurs, cette région a connu d'importantes transformations liées à l'anthropisation : aménagements hydrauliques, déforestation suivie de reboisements (notamment en résineux), ayant modifié les conditions d'alimentation et le fonctionnement des milieux humides.

Malgré un intérêt croissant pour les tourbières du Massif central, leur fonctionnement hydrologique précis, notamment en lien avec les émergences d'eau souterraine correspondant à l'apparition des eaux de la nappe phréatique sur un versant ou au fond d'une vallée (George, 1970), demeure encore peu documenté.

Les tourbières, écosystèmes humides sensibles, dépendent fortement des apports en eau pour leur fonctionnement écologique et hydrologique. Parmi ces apports, les émergences d'eau souterraine peuvent jouer un rôle clé dans la régulation des conditions hydriques locales, influençant ainsi la distribution des habitats et la dynamique des espèces. Toutefois, dans le cas spécifique des tourbières du Massif central, et en particulier du complexe tourbeux de Virennnes, la nature, l'importance et la dynamique et l'influence de ces émergences restent encore mal comprises.

Ce mémoire s'organise en plusieurs parties. La première présente les connaissances actuelles sur les tourbières et les méthodes d'analyse, à travers un état de l'art. La deuxième partie présente la problématique et les objectifs de l'étude. La troisième partie présente le site

d'étude et détaille la méthodologie utilisée sur le terrain pour caractériser le fonctionnement du complexe de Virennnes, en délimitant plus finement les habitats déjà cartographiés, le relevé d'espèces bioindicatrices (EBI), la réalisation de sondages d'épaisseur de sol, l'analyse de l'organisation du réseau d'écoulements de surface, ainsi que le pointage des zones potentiellement associées à des émergences. La quatrième partie expose les résultats, accompagnés de cartes. La cinquième partie propose une discussion interprétative des résultats. Enfin, la dernière partie conclue l'étude et envisage des perspectives pour la gestion future du site.

1 - Etat de l'art

1.1 - Fonctionnement des tourbières et enjeux de conservation

Les tourbières sont des écosystèmes humides particuliers, caractérisés par l'accumulation progressive de matière organique partiellement décomposée, appelée tourbe. Ce processus résulte d'une saturation prolongée du sol en eau, induisant un déficit en oxygène qui ralentit fortement la décomposition des végétaux. La formation de tourbe s'étend sur des échelles de temps très longues, de l'ordre de quelques centaines à plusieurs milliers d'années, et repose sur un équilibre délicat entre régime hydrologique, végétation et climat.

Selon leur mode d'alimentation en eau, on distingue plusieurs types de tourbières. Les tourbières ombrotrophes, ou haut-marais, sont exclusivement alimentées par les précipitations. Elles présentent un pH très acide (souvent inférieur à 4,5), pauvre en nutriments, et sont dominées par les sphaignes et les plantes adaptées aux conditions oligotrophes. À l'inverse, les tourbières minérotrophes, ou bas-marais, reçoivent de l'eau souterraine ou de ruissellement, plus riche en éléments minéraux dissous. Entre ces deux types, les tourbières de transition présentent des apports mixtes.

Sur le plan fonctionnel, les tourbières assurent plusieurs services écosystémiques majeurs. Elles constituent avant tout des puits de carbone d'importance mondiale. Bien qu'elles couvrent environ 3 % de la surface terrestre, elles stockeraient près de 500 Gt de carbone, soit environ 30 % du carbone des sols mondiaux, ce qui en fait un élément clé de la régulation du climat (Gorham, 1991 ; Joosten & Clarke, 2002). Leur rôle dans la régulation hydrologique est également notable : elles fonctionnent comme des éponges naturelles, capables d'absorber de grandes quantités d'eau en période de pluie et de la restituer lentement, contribuant à limiter les crues et à soutenir les débits d'étiage. Enfin, elles abritent une biodiversité spécialisée, souvent composée d'espèces spécifiques, adaptées aux conditions acides et pauvres en éléments nutritifs selon le type de tourbière.

Malgré leur importance, les tourbières figurent parmi les milieux les plus menacés à l'échelle européenne. Les causes majeures de dégradation sont aujourd'hui bien documentées. Le drainage, qu'il soit agricole, forestier ou d'aménagement, perturbe le régime hydrologique naturel, provoque l'oxydation de la tourbe et la libération de CO₂ (Joosten et al., 2012). Le boisement, spontané ou par plantation (souvent d'épicéas ou de bouleaux), accentue l'évapotranspiration et assèche progressivement le sol. L'eutrophisation, liée à des apports diffus de nutriments (engrais, ruissellements agricoles), déséquilibre les communautés végétales spécialisées et favorise l'envahissement par des espèces généralistes. À ces menaces

s'ajoutent parfois le piétinement, le surpâturage, les extractions de tourbe ou encore les effets du changement climatique (Parish et al., 2008).

En France, « on estime ainsi qu'environ la moitié des tourbières de France ont disparu entre 1945 et les années 2000 » (Pôle-relais Tourbières, 2016). La conservation des tourbières repose sur une meilleure connaissance de leur fonctionnement écologique, couplée à une gestion adaptée du régime hydrique.

L'enjeu principal est donc d'identifier précisément les structures et dynamiques internes de ces milieux, afin d'orienter la gestion vers la préservation des processus tourbeux actifs, condition essentielle à la conservation de la biodiversité et des services rendus par ces écosystèmes.

1.2 - Méthodes d'étude des tourbières : retour sur les approches scientifiques

1.2.1 - Caractérisation et délimitation des unités écologiques

Dans les travaux de terrain portant sur les milieux tourbeux, la notion d'unité écologique permet de subdiviser finement un habitat naturel en sous-ensembles cohérents sur le plan écologique. Une unité écologique peut être définie comme une portion d'espace relativement homogène du point de vue de la végétation, de la topographie, du fonctionnement hydrologique et parfois du type de sol. Elle correspond à un niveau de lecture plus détaillé que celui des habitats typifiés par les référentiels classiques (par exemple Natura 2000), et permet une analyse plus fine des dynamiques internes d'un site, notamment dans un objectif de gestion.

La méthode phytosociologique développée par Braun-Blanquet (1964) constitue une approche classique pour la description et la classification des groupements végétaux. Elle repose sur l'observation de la composition floristique et de la structure des communautés végétales, permettant d'établir des typologies d'unités écologiques. Cette approche a servi de base conceptuelle à de nombreuses méthodes et à l'élaboration de référentiels phytosociologiques, qui adaptent ses principes à différents contextes écologiques et échelles spatiales.

Pour l'établissement de la typologie, plusieurs référentiels sont mobilisés :

- La typologie CORINE biotopes (Rameau et al., 1997), qui propose une classification hiérarchique des habitats naturels en Europe,
- Le système EUNIS (European Nature Information System), développé par l'Agence Européenne pour l'Environnement, qui permet d'harmoniser les habitats à l'échelle communautaire,
- Le Guide d'interprétation des habitats Natura 2000 (UE, 2013), qui définit les critères d'identification des habitats d'intérêt communautaire, notamment les habitats tourbeux (codes 7110, 7120, 7140...).

Cependant, ces systèmes, pensés pour des échelles régionales ou nationales, ne permettent pas toujours de saisir les nuances locales observées dans les zones tourbeuses de petite taille. C'est pourquoi l'usage de l'unité écologique, parfois définie in situ à partir de relevés floristiques, de profils pédologiques ou d'indices hydrologiques, est particulièrement pertinent.

La cartographie des unités écologiques est généralement réalisée à l'aide de relevés GPS couplés à des observations botaniques et hydromorphologiques. Ces données sont ensuite intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG) pour produire des cartes précises, utiles pour la gestion fine des milieux. Une unité écologique bien caractérisée peut indiquer des différences de fonctionnement écologique : zones plus ou moins humides, plus ou moins tourbeuses, stades de succession végétale différents, ou encore influence directe ou indirecte d'une émergence hydrique. Elle constitue donc un outil opérationnel pour cibler les actions de restauration ou de surveillance, en allant au-delà des grandes catégories d'habitat.

1.2.2 – Relevés des espèces bioindicatrices d'émergences

Dans les tourbières, la présence d'émergences hydriques, zones où l'eau remonte naturellement à la surface du sol, joue un rôle clé dans le fonctionnement écologique, en maintenant des conditions constantes d'humidité et en alimentant la croissance de la tourbe. Pourtant, ces zones sont souvent difficiles à localiser, en particulier lorsqu'elles sont diffuses, peu visibles ou masquées par la végétation. C'est dans ce contexte que l'utilisation d'espèces bioindicatrices spécifiques des émergences devient un outil particulièrement pertinent.

Une émergence se traduit en surface par une humidité plus élevée, une température plus constante, une minéralisation potentiellement plus marquée et parfois un pH légèrement modifié. Ces conditions locales favorisent le développement de certaines espèces végétales sensibles, qui peuvent alors servir de marqueurs biologiques de ces processus.

L'intérêt de ces espèces réside dans la possibilité qu'elles offrent d'une géolocalisation précise : elles permettent de cibler des zones restreintes, à l'échelle de la microtopographie, où le fonctionnement hydrologique diffère significativement du reste du complexe tourbeux. Dans certains cas, elles révèlent également une dynamique évolutive, en signalant l'extension, la réduction ou la modification de l'intensité d'une émergence au fil du temps.

Cependant, comme pour toute démarche basée sur l'utilisation des espèces bioindicatrice, l'interprétation nécessite prudence et validation croisée. L'abondance locale d'une espèce indicatrice ne suffit pas à elle seule pour confirmer une émergence : il faut croiser ces observations avec d'autres données comme la pente, la topographie, l'épaisseur de la tourbe ou encore la structure du réseau hydrographique. De plus, certaines espèces peuvent apparaître temporairement, indépendamment d'un apport hydrique souterrain, en réponse à des fluctuations climatiques et météorologiques ou à des perturbations ponctuelles (débroussaillage, pâturage, piétinement...).

1.2.3 – Mesure de la profondeur de tourbe

La mesure de l'épaisseur de tourbe constitue une méthode fondamentale dans l'étude des tourbières, car elle permet d'appréhender leur dynamique de formation, leur fonctionnement hydrologique ainsi que leur capacité de stockage de carbone. Ces sondages sont également utiles pour détecter des zones potentiellement alimentées par des eaux souterraines, comme les émergences, qui influencent fortement l'évolution verticale de l'accumulation de tourbe.

On distingue généralement deux grands types de sondages dans ces milieux :

- Les sondages simples, qui consistent à mesurer l'épaisseur du dépôt organique à l'aide d'une tige graduée ou d'une gouge, sans prélèvement ni analyse ;
- Les sondages stratigraphiques, plus approfondis, qui impliquent le prélèvement de carottes pour l'analyse des horizons tourbeux (structure, composition, âge, niveau de décomposition, etc.).

Les sondages simples sont largement utilisés dans les inventaires ou dans les projets de cartographie à grande échelle, car ils permettent de couvrir rapidement un vaste territoire. Bien qu'ils ne renseignent pas sur la qualité ou la nature précise de la tourbe, ils fournissent des données précieuses pour établir des modèles d'épaisseur, qui peuvent être interpolés spatialement grâce aux outils SIG. Ces modèles servent ensuite à identifier les zones les plus anciennes, les plus profondes ou encore les plus sensibles à la dégradation.

Les sondages stratigraphiques, eux, mobilisent des outils spécifiques comme le carottier russe, et permettent une lecture verticale fine de la tourbe. Ces données sont notamment utilisées dans les études paléoécologiques, la datation au radiocarbone, ou encore l'analyse des macrorestes végétaux ou du contenu pollinique (Chambers & Charman, 2004). Ces approches, plus lourdes en logistique et en connaissances, permettent toutefois de reconstituer l'évolution historique des tourbières, leur taux de croissance, et d'identifier les phases d'alimentation en eau.

En somme, qu'ils soient simples ou approfondis, les sondages constituent un outil incontournable pour caractériser la structure verticale des tourbières et orienter leur gestion, notamment dans un contexte de conservation ou de restauration.

1.2.4 – Relevés et pointages du réseau d'écoulements

Le réseau d'écoulement des eaux de surface joue un rôle clé dans la compréhension du fonctionnement hydrologique des tourbières. Contrairement aux systèmes bien drainés, les milieux tourbeux sont caractérisés par une hydrologie complexe, souvent diffuse, et par des interactions subtiles entre les apports d'eau de surface, les émergences souterraines et les exutoires.

La cartographie des écoulements de surface et des zones de saturation est essentielle pour identifier les trajectoires de l'eau dans la tourbière, comprendre le maintien des conditions hydriques nécessaires à l'accumulation de matière organique, ou encore anticiper les effets d'un drainage ancien ou actif (Joosten & Clarke, 2002). En effet, une mauvaise gestion des écoulements peut entraîner un abaissement de la nappe, une minéralisation accrue de la tourbe, voire une perte de biodiversité.

Les relevés de terrain s'appuient généralement sur des observations directes (localisation des suintements, filets d'eau, mares temporaires, ruptures de pente) ainsi que sur des outils GPS pour le pointage précis des écoulements. Dans certains cas, des mesures de débit ou de niveau piézométrique sont associées, notamment pour les émergences pérennes ou les exutoires clairement identifiables. Un suivi piézométrique consiste à mesurer régulièrement le niveau de l'eau pour observer les variations de la nappe phréatique ou des flux souterrains. Il

permet de suivre l'évolution de la pression et de la hauteur d'eau dans le sol, d'identifier les zones d'alimentation et de drainage, et de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique d'un milieu, comme une tourbière. L'utilisation croissante des outils SIG permet ensuite une modélisation spatiale des écoulements et une superposition avec d'autres variables (topographie, végétation, épaisseur de tourbe).

Les émergences, bien que discrètes, sont cruciales dans le fonctionnement des tourbières, car elles peuvent maintenir, par la création d'une « bulle d'humidité atmosphérique » (Goubet, 2024), des conditions d'ombrotrophie locale, favorisant certaines espèces hygrophiles et des habitats tourbeux.

L'identification des points de sortie du complexe hydrologique, ou exutoires, est également un enjeu, car ces points concentrent l'eau excédentaire du système et peuvent influencer fortement la dynamique des bordures du site. Leur positionnement conditionne aussi parfois l'évolution morphologique de la tourbière (érosion, incision).

Enfin, certaines recherches croisent les données hydrologiques avec la cartographie des unités écologiques ou la présence d'espèces bioindicatrices, pour repérer les zones de convergence entre hydrologie, écologie et fonctionnement sédimentaire (Monteverde et al., 2022). Cette approche intégrée est de plus en plus utilisée dans les programmes de gestion conservatoire des milieux humides.

1.2.5 – Apport du SIG dans les études de milieux humides

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont utilisés pour l'étude et la gestion des milieux humides, notamment des tourbières. Ils servent à regrouper des données hétérogènes issues du terrain (relevés floristiques, sondages, cartographies) et à les associer à des informations spatiales comme les images satellites.

Dans les tourbières, les SIG facilitent la représentation et l'analyse de paramètres écologiques, hydrologiques ou géomorphologiques. Ils permettent, par exemple, de cartographier les communautés végétales, de suivre certaines unités écologiques ou de croiser diverses couches d'information (épaisseur de tourbe, hydrologie, relief).

Les SIG sont aussi employés pour produire des modèles spatiaux à partir de données ponctuelles, afin d'estimer des caractéristiques comme l'épaisseur de tourbe ou la saturation en eau.

Par ailleurs, ils permettent de générer des cartes thématiques utilisées dans les diagnostics, les plans de gestion ou les suivis réglementaires. Ces documents facilitent également la communication avec les acteurs locaux et les publics concernés.

Enfin, l'intégration des SIG avec des bases de données naturalistes offre des possibilités d'analyse à plus petite échelle, utiles notamment dans le cadre de politiques publiques environnementales.

2 - Problématique et objectifs de l'étude

2.1 - Problématique

Cette étude s'attache à déterminer le rôle exact des émergences d'eau souterraine dans le fonctionnement hydrologique et écologique du complexe tourbeux de Virennnes. En effet, ces émergences constituent des points clés qui influencent non seulement la dynamique de l'eau dans ce milieu sensible, mais également la qualité et la pérennité des habitats naturels qui y sont associés. Comprendre leur impact permettrait de mieux appréhender les interactions entre les flux souterrains et les processus de surface, ainsi que les effets sur la biodiversité locale et les services écosystémiques rendus par cette zone humide.

Le pré-diagnostic fonctionnel mené par Pierre Goubet sur le site Natura 2000 de Virennnes constitue une première étape dans la compréhension du fonctionnement hydrologique local. Ce travail a permis de repérer les principales structures liées à l'eau, comme les émergences souterraines, ainsi que leurs liens avec la topographie. L'attention a aussi porté sur des indices écologiques associés, notamment la présence d'espèces indicatrices et la répartition des zones les plus saturées en eau.

Ce pré-diagnostic n'avait pas pour objectif de livrer un inventaire complet, mais plutôt d'esquisser une lecture fonctionnelle du site en soulignant les points importants pour l'alimentation en eau et les secteurs à fort intérêt écologique. Il offre ainsi une base d'observations sur laquelle s'appuie le présent travail, qui poursuit et approfondit ces premiers constats pour préciser les objectifs, définir la méthodologie et proposer une interprétation des résultats.

2.2- Objectifs de l'étude

Afin de répondre à cette question centrale, plusieurs objectifs ont été définis et mis en œuvre au cours de cette étude. Ceux-ci consistent notamment à documenter finement, sous forme de cartes, la structure écologique et hydrographique du site, ainsi qu'à identifier des indices, directs ou indirects, témoignant de l'existence et de l'impact des émergences d'eau souterraine.

Un premier objectif a consisté à délimiter les unités écologiques présentes sur le site, différemment d'une étude phytosociologique. Ce travail de cartographie vise à affiner la compréhension de la structure du complexe tourbeux et de la répartition des milieux qui le composent. En identifiant précisément les différentes unités écologiques, il devient possible de mettre en relation leur organisation spatiale avec les facteurs hydrologiques, notamment la présence potentielle d'émergences.

Un second objectif a été de relever, au sein du site, les espèces végétales reconnues comme bioindicatrices d'apports d'eau souterraine. Ces espèces, sensibles à des conditions hydriques particulières, permettent d'identifier indirectement la présence de flux souterrains même lorsque ceux-ci ne sont pas directement visibles. Leur répartition fournit des indices précieux sur la localisation et l'extension potentielle des zones d'émergence.

Un troisième objectif a porté sur le pointage du réseau des écoulements visibles : ruisseaux, drains ou écoulements de surface. L'analyse de cette organisation permet de mieux comprendre les modalités de circulation de l'eau sur et à proximité de la tourbière, et d'évaluer

les connexions possibles entre les émergences souterraines et les écoulements de surface. Cette étape est essentielle pour replacer les zones humides dans leur contexte hydrologique local.

Un quatrième objectif consiste à mesurer l'épaisseur de la tourbe sur l'ensemble du site d'étude. L'épaisseur de cette couche organique est un indicateur de la dynamique d'accumulation dans le temps et des conditions hydriques présentes et passées. Elle peut également renseigner sur l'influence de certaines zones d'émergence, susceptibles d'interrompre ou d'amplifier localement la mise en place de la tourbe.

Un cinquième objectif a été d'identifier et de localiser les émergences d'eau souterraine observables directement sur le site. Cette démarche est centrale dans la logique de l'étude, puisqu'elle vise à caractériser les apports souterrains réels et à comprendre leur rôle dans la structuration hydrologique du système. La position, le débit apparent et le contexte écologique immédiat des émergences permettent de mieux cerner leur contribution au fonctionnement du complexe tourbeux.

3 - Terrain d'étude et méthodologie

3.1 - Présentation du site : le complexe tourbeux de Virenes

Le complexe tourbeux de Virenes est situé sur la commune du Monestier à l'ouest de la commune d'Ambert, dans le département du Puy-de-Dôme, au sein du Parc naturel régional Livradois-Forez. Niché à une altitude moyenne d'environ 1150 m, le site s'insère dans un paysage de moyenne montagne caractéristique du Massif central, dominé par des forêts, prairies bocagères et zones humides disséminées. Couvrant 149 ha, il se compose d'environ 14 ha de zones humides.

Sur le plan géologique, la tourbière s'inscrit dans un bassin versant reposant majoritairement sur un substrat de gneiss métamorphique ancien, localement fracturé, ce qui permet l'apparition d'émergences d'eau souterraine. En aval, vers l'exutoire du bassin versant, le substrat est recouvert de dépôts colluviaux issus de l'érosion des pentes environnantes.

Ces conditions, associées à un climat local frais et humide, ont permis l'installation progressive de tourbières et de milieux humides, dont le fonctionnement dépend étroitement du régime hydrique et de l'accumulation de matière organique peu décomposée (DOCOB du complexe tourbeux de Virenes, Ardouin, 2010).

Le site se caractérise par une grande diversité de faciès tourbeux : tourbières de transition, bas-marais acides, prairies humides à molinie, ainsi que des zones boisées hygrophiles (boulaies, saulaies). Cette mosaïque d'habitats génère une biodiversité végétale et faunistique remarquable, avec notamment la présence de plusieurs espèces patrimoniales, c'est-à-dire des espèces possédant une valeur particulière pour le patrimoine naturel, culturel ou scientifique d'une région ou d'un pays. On retrouve notamment le rossolis à feuilles rondes (*Drosera rotundifolia*), la canneberge (*Vaccinium groupe oxycoccos*), l'airelle rouge (*Vaccinium vitis-idaea*) ou encore des sphaignes typiques des milieux oligotrophes.

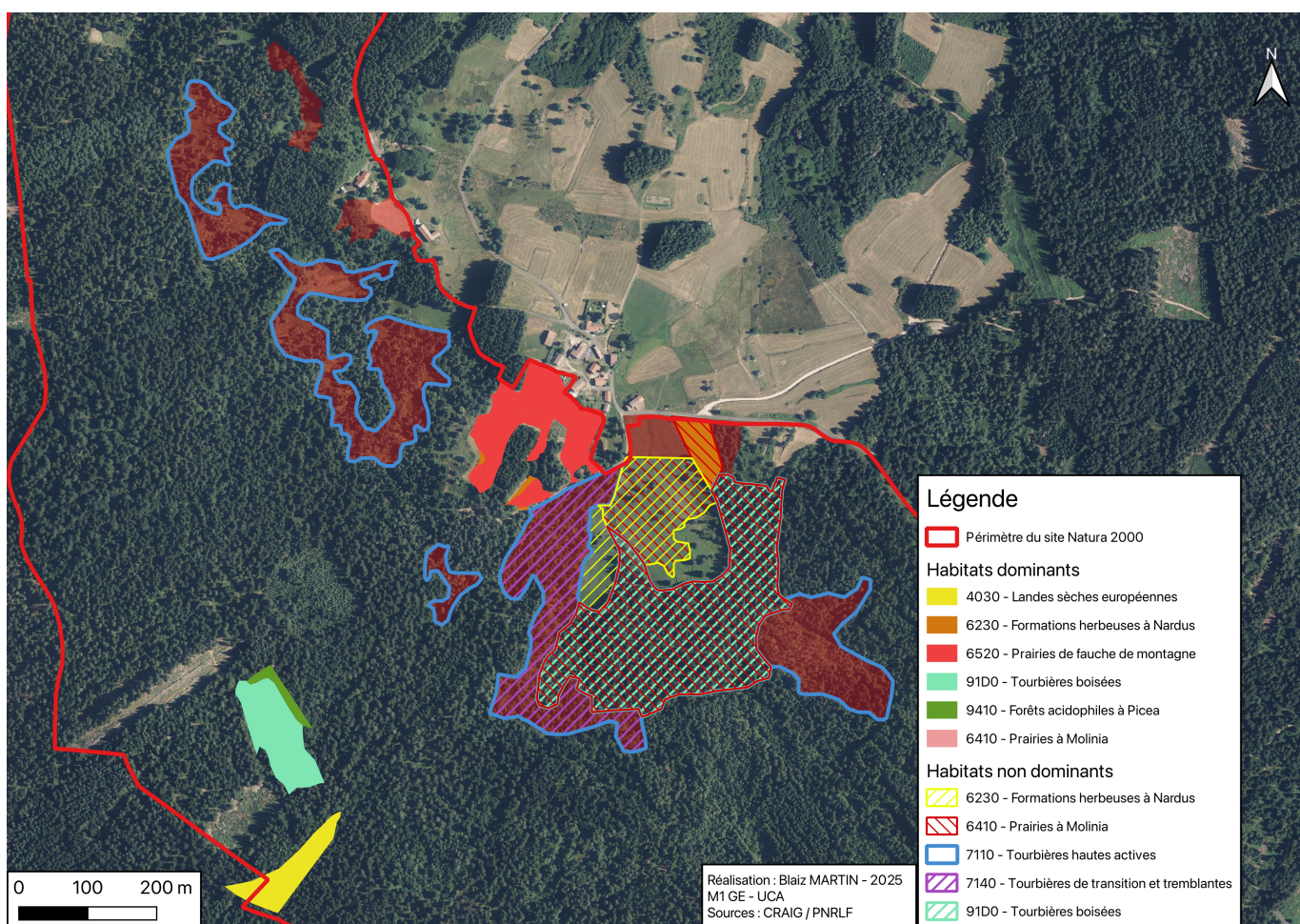


Figure 1 : Carte des habitats de 2006

Du fait de cette richesse écologique, le complexe de Virennnes est inscrit dans le réseau Natura 2000 au titre de la directive "Habitats-Faune-Flore" de 1992, sous le nom « Tourbière du Haut Livradois, complexe tourbeux de Virennnes FR8302002 ». Il accueille plusieurs habitats d'intérêt communautaire, dont certains sont considérés comme prioritaires, comme les tourbières hautes actives (habitat 7110) ou les tourbières boisées (habitat 91D0), définis en 2006 par le CBN (Conservatoire Botanique National), qui nécessitent une attention particulière en matière de conservation (Cahier Habitat, 2002, Tome 3 - Zones humides).

Les enjeux de conservation sur ce site sont multiples. D'une part, il s'agit de préserver la dynamique naturelle des tourbières, étroitement liée à l'hydrologie locale, tout en luttant contre leur enrichissement, le boisement spontané ou les effets d'anciens drainages. D'autre part, la présence de milieux ouverts à forte valeur patrimoniale peut nécessiter une gestion adaptée, même si la recommandation du parc est de laisser les milieux tourbeux évoluer naturellement (DOCOB, 2010). Dans certains cas, des pratiques extensives comme la fauche ou le pâturage peuvent être envisagées pour maintenir des conditions favorables à une flore spécialisée. Toutefois, le pâturage ne peut être mis en œuvre qu'avec précaution, car les tourbières sont des milieux fragiles : un chargement trop élevé ou une fréquentation inadaptée pourrait altérer la

structure du sol et la composition floristique. Une gestion fine, fondée sur le suivi écologique, est donc indispensable (Lunt, et al., 2010).

La gestion du site repose sur une stratégie alliant acquisition de connaissances, animation locale, suivi écologique et, si nécessaire, interventions de gestion conservatoire. Toutefois, malgré les inventaires déjà réalisés, certaines zones du complexe demeurent peu caractérisées sur le plan de leur fonctionnement hydrologique ou de leur dynamique écologique. C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail de terrain, visant à mieux comprendre l'organisation écologique et fonctionnelle du complexe tourbeux de Virenes.

3.2 - Méthodologie

Pour mieux comprendre le fonctionnement écologique et hydrologique du complexe tourbeux de Virenes, des relevés de terrain ont été réalisés avec QField (extension QGIS) afin de localiser précisément chaque observation. Les unités écologiques ont été délimitées directement sur le terrain en fonction de la végétation dominante et des habitats d'intérêt communautaire. Les espèces bioindicatrices d'émergence ont été relevées à l'aide de références et de conseils d'experts. Un maillage régulier a permis de mesurer l'épaisseur de la tourbe et de suivre sa dynamique. L'organisation de l'eau de surface a été cartographiée grâce aux observations sur le terrain et aux données LiDAR et MNT. Enfin, les zones présentant un potentiel d'émergence ont été identifiées à partir de la présence d'eau, de la végétation et de la topographie. L'ensemble de ces relevés offre une vision globale du site comme un système d'unités écologiques connectées.

3.2.1 - Caractérisation et délimitation des unités écologiques

Un découpage de la tourbière a été réalisé en subdivisant les habitats d'intérêt communautaire en plus petits espaces appelés unités écologiques. Pour cela, les habitats préexistants ont été utilisés afin d'obtenir des limites géographiques définies par un professionnel et qui sont toujours d'actualité, confirmé par Pierre Goubet dans son pré-diagnostic fonctionnel de 2024 et par mes propres observations.

La principale donnée recueillie sur le terrain concerne les plantes dominantes. Une plante est considérée comme dominante si elle couvre au moins un tiers (soit 33 %) de la surface végétale qu'importe la strate. Lorsqu'il y a plusieurs espèces dominantes, c'est celle qui couvre la plus grande surface qui apparaît en premier dans le nom de l'unité écologique. Une unité écologique avec 60% de joncs et 30% de carex et 10% de myrtilles sera nommé Jonchaie à carex.

Par ailleurs, la végétation non dominante, moins d'un tiers de recouvrement, est également relevée, mais ne fait pas partie du nom de l'unité écologique. Elle correspond aux espèces qui accompagnent la ou les plantes dominantes mais en plus faible proportion. Par exemple, dans une jonchaie, le jonc représente environ 70 à 80 % de la végétation, tandis que les autres espèces sont présentes à moins de 30 %. Chaque nouvelle unité écologique a été prise en photographie pour une seconde analyse lorsque cela était nécessaire, notamment lors des moments d'hésitation ou de manque de connaissances pour des unités complexes comme la mégaphorbiaie par exemple.

Concernant les limites méthodologiques, les connaissances botaniques mobilisées ne se limitent pas aux seules espèces indicatrices, elles prennent également en compte des espèces telles que les graminées ou d'autres types de plantes spontanées présentes sur le site. L'estimation du recouvrement végétal est effectuée de manière visuelle, sans recours à des mesures précises. Cela peut entraîner certaines imprécisions : par exemple, une forte présence de joncs peut visuellement masquer les sphaignes au sol, alors que ces dernières occupent en réalité une surface plus importante.

Ce premier travail a consisté à délimiter plus finement les habitats définis et cartographiés antérieurement dont la représentation ne reflétait pas fidèlement la réalité de terrain. Ces nouvelles unités écologiques couplées au réseau hydrographique, aux émergences, au relevé d'espèces bioindicatrices et d'épaisseur du sol vont permettre de considérer le complexe tourbeux de Vireennes sous l'angle d'un ensemble fonctionnel.

3.2.2 - Relevé des espèces bioindicatrices d'émergence

Une liste d'espèces bioindicatrices a été établie afin d'aider à identifier les émergences d'eau souterraine sur l'ensemble des habitats tourbeux de Vireennes. Ces espèces sont principalement des plantes minérotophes, appréciant les milieux saturés en eau. Leur présence sur le site est confirmée grâce à différentes sources, notamment le DOCOB, ainsi que les connaissances partagées par Pierre Goubet et Guillaume Moiron (chargé de mission Natura 2000 au PNRLF).

La liste des espèces bioindicatrices d'émergences est composée de 12 plantes qui sont la laïche en ampoules (*Carex rostrata*), le comaret (*Comarum palustre*), le jonc acutiflore (*Juncus acutiflorus*), la linaigrette à feuilles étroites (*Eriophorum angustifolium*), le polytric commun (*Polytrichum commune*), le populage des marais (*Caltha palustris*), le saule à oreillettes (*Salix aurita*), les sphaignes rouges (*Sphagnum*), les sphaignes vertes, le trèfle d'eau (*Menyanthes trifoliata*), la valériane dioïque (*Valeriana dioica*) et la violette des marais (*Viola palustris*).

La prospection a consisté en une déambulation dans les différentes unités fonctionnelles du site à la recherche de ces espèces spécifiques, en étant particulièrement attentif dans les zones où la saturation en eau est forte et visible. Une préparation préalable a permis une meilleure identification sur le terrain, notamment par la confection de fiches espèces (Annexe 2).

L'expérience s'est enrichie sur le terrain par l'utilisation de ces fiches, complétée par des outils comme PlantNet pour l'identification, ainsi que par la prise de photographies suivie d'analyses ultérieures. Une distinction a été faite entre la présence ponctuelle d'une espèce bioindicatrice, comme un jonc isolé, et une concentration importante de la même espèce, qui traduit davantage un habitat qu'un simple indicateur. Le minimum pour un habitat n'est pas défini par un protocole mais par une observation qui s'est affinée au fil des sorties ; pour cette étude le minimum a été de 50 mètres carrés (présence de l'espèce sur cette surface minimum).

Certaines limites ont pu être rencontrées. Un seul point GPS peut parfois représenter plusieurs individus d'une même espèce, en particulier lorsque ceux-ci sont très proches les uns des autres. Cela limite les possibilités d'interprétation ultérieure. Par exemple, il ne sera pas possible de tirer des conclusions précises sur la densité réelle d'une espèce au sein d'une unité écologique. En revanche, analyser la diversité des espèces dans une unité écologique reste pertinent et intéressant.

Malgré un passage dans l'ensemble des unités écologiques, certaines zones peuvent avoir été oubliées, ce qui peut entraîner des ratés. De plus, les connaissances en botanique restent perfectibles, du fait d'un manque de connaissances sur les différents stades évolutifs d'une fleur par exemple. Enfin, la période de prospection n'a pas toujours permis d'observer les espèces à un stade de développement optimal, certaines n'étant ni fleuries ni pleinement développées au moment de la recherche comme dit précédemment.

3.2.3 - Campagne de sondage de profondeur de sol

Des mesures d'épaisseur de sol ont été réalisées sur l'ensemble des habitats tourbeux de Virennnes, en raison de contraintes de temps et de connaissances limitées, ce qui a empêché la prise en compte des mesures de tourbe sur tout le site. Toutefois, sur la partie nord-ouest, avec un objectif d'obtenir des données jusqu'à l'épaisseur 0, qui a été modélisée, des mesures aussi précises que possibles de l'épaisseur de la tourbe ont été effectuées, bien que cela ait présenté certaines difficultés techniques. Un maillage régulier de 30 m a été mis en place pour structurer l'ensemble des points de sondage. La première idée avait été de réaliser ces sondages avec un maillage de 20 m mais cela représentait une charge de travail trop importante dans le temps du stage : plus de 750 mesures à réaliser. Deux tiges filetées de 1m et 6 mm de diamètre, assemblées par raccords, ont permis d'effectuer les relevés de profondeur pour un total d'environ 400 mesures. Certains sondages ont été effectués en dehors des unités tourbeuses dès lors que la limite de la zone tourbeuse était plus proche du point extérieur que du point intérieur.

Pour l'unité nord-ouest ; ciblée pour réaliser une modélisation, le maillage initial de 30 m a été conservé pour la modélisation. Des sondages ont été réalisés à chaque point du maillage, puis d'autres sondages ont été réalisés en bordure du maillage jusqu'à atteindre une épaisseur de tourbe nulle, ce qui a permis de localiser les zones de transition entre la tourbe et le sol minéral, et d'affiner la délimitation de l'emprise tourbeuse.

L'ensemble des données du modèle d'épaisseur a été traité dans un système d'information géographique (SIG) afin de produire une interpolation TIN, permettant ainsi la création du modèle représentatif de la petite unité étudiée.

Certaines limites ont cependant été rencontrées durant cette opération. Le temps disponible n'a pas permis de resserrer davantage le maillage ni d'analyser la qualité de la tourbe. La tige utilisée, relativement flexible, a nécessité une manipulation délicate mais reste un bon outil, l'utilisation d'un diamètre plus large permettrait des mesures plus confortables mais alourdirait le poids du matériel. Par ailleurs, la distinction entre sol organique et tourbe n'a pas toujours été évidente sur le terrain. Enfin, sur l'ensemble des habitats tourbeux, ce sont les épaisseurs de sol qui ont été mesurées, tandis que dans le cadre du modèle, seules les épaisseurs de tourbe ont été prises en compte.

3.2.4 - Relevés et pointages de l'organisation hydrographique

Un travail de repérage a été mené sur l'ensemble des unités tourbeuses de Virennnes et non sur l'ensemble du site Natura 2000, par manque de temps, afin d'identifier les rus, ruisseaux et drains présents au sein des différentes unités écologiques, qu'ils soient en eau ou non. L'objectif a été de cartographier l'ensemble du réseau de circulation de l'eau, y compris les filets d'eau parfois discrets, notamment en sortie de bombement tourbeux ou en aval des zones planes.

Pour faciliter ce travail, l'appui du MNT (issue du pré-diagnostic de Pierre Goubet de 2024) et des données LIDAR a été essentiel. Ces outils ont permis de repérer des dépressions ou ruptures de pente suggérant la présence de structures hydrauliques, parfois invisibles sur le terrain.

Plusieurs limites ont toutefois été identifiées lors du relevé. La distinction entre rus naturels et drains artificiels s'est parfois révélée complexe, tout comme la différenciation entre de simples fossés et d'anciens rus aujourd'hui asséchés. Certains éléments pourraient correspondre à d'anciennes branches du réseau hydrographique, dont la nature exacte reste incertaine sans analyse complémentaire.

Au cours des relevés réalisés sur le complexe tourbeux, plusieurs points ont été identifiés comme présentant un fort potentiel d'émergence d'eau souterraine. Une attention particulière a été portée aux zones visiblement gorgées d'eau, où la saturation du sol laissait supposer une alimentation hydrique active ou récente.

La présence d'espèces végétales bioindicatrices dans l'environnement immédiat a également constitué un critère d'observation important. Lorsqu'un ensemble d'indices laissait envisager une émergence, un pointage a été effectué, tout en gardant à l'esprit qu'une validation ultérieure restait nécessaire.

Ces relevés doivent encore être confrontés à l'analyse croisée de plusieurs sources d'information (observations botaniques, topographie, données hydrologiques) afin de confirmer ou d'infirmer l'existence effective d'une émergence. Certaines limites ont été rencontrées, notamment un manque d'expérience et de connaissances précises qui rend difficile une identification certaine, en particulier dans le cas d'émergences fossiles (émergence qui n'est plus active), pour lesquelles les indices visibles sont souvent absents ou peu interprétables.

4 - Présentation des résultats

4.1 - Les unités écologiques

La délimitation plus fine des habitats d'intérêt communautaire réalisée sur le site Natura 2000 de Virennas a permis de distinguer vingt unités écologiques réparties sur l'ensemble de la zone étudiée. Chaque unité correspond à un type de formation végétation défini par la ou les espèces dominantes observées sur le terrain.

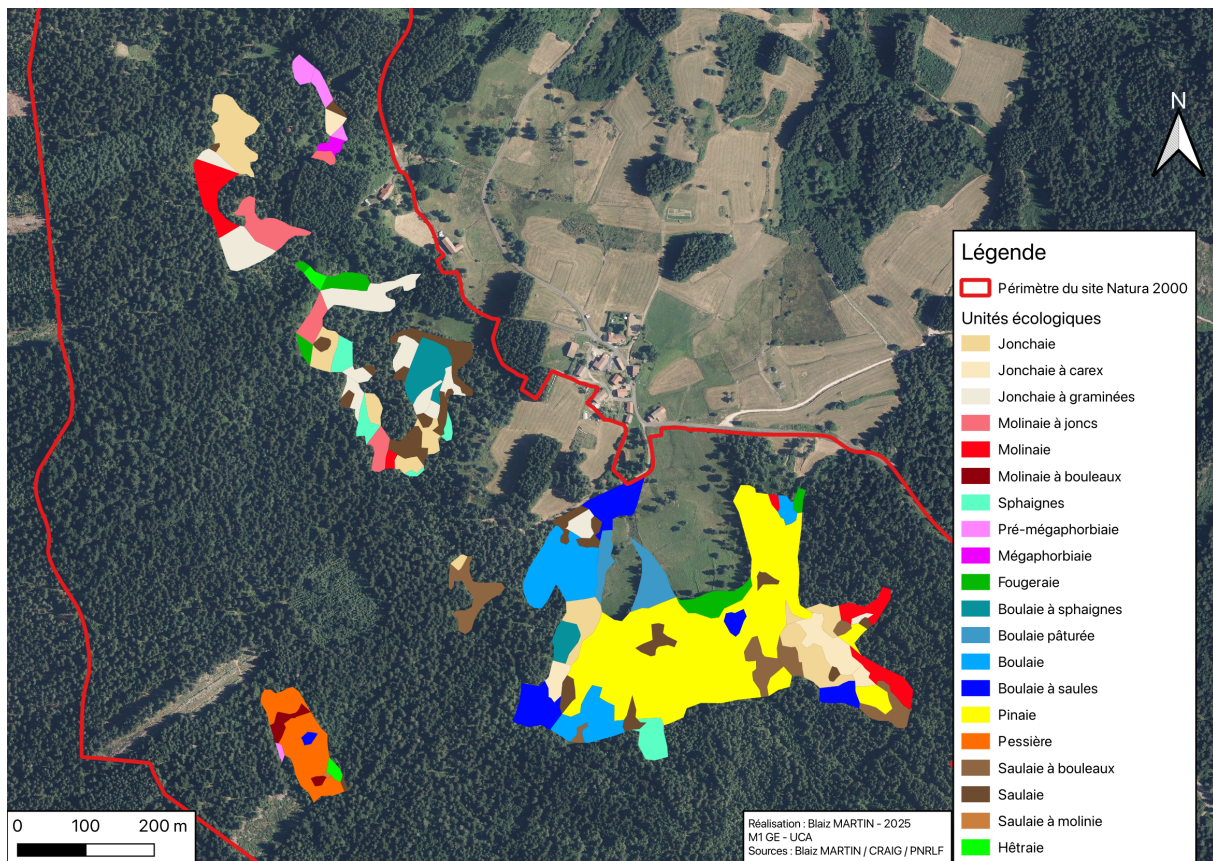


Figure 2 : Carte des unités écologiques

Certaines unités sont particulièrement bien représentées. C'est le cas de la saulaie, qui compte vingt-quatre relevés, ce qui en fait l'habitat le plus fréquent sur le site. Elle est suivie par la jonchaie à graminées (onze relevés) et la jonchaie (dix relevés). À l'inverse, la mégaphorbiaie et la saulaie à molinie n'ont été observées qu'une seule fois chacune. Entre ces extrêmes, on retrouve par exemple la boulaie à saules et la fougeraie, relevées à cinq reprises.

En termes de superficie, les différences sont encore plus nettes. La plus grande pinède s'étend sur 4,86 ha, ce qui représente 26,61 % de la surface totale cartographiée. Avec 5,17 ha au total (soit 28,26 %), elle constitue de loin l'habitat le plus vaste. À l'opposé, la saulaie à molinie n'occupe que 0,0062 ha, soit 0,03 % de la surface. D'autres unités présentent des superficies intermédiaires : les jonchaies (1,7467 ha, 9,55% de la surface totale), les boulaies (1,3845 ha, 7,57%) ou encore les jonchaies à graminées (1,3565 ha, 7,42%) figurant parmi les habitats les plus vastes après la pinaie, tandis que la hêtraie (0,0998 ha, 0,55%) ou la boulaie pâturée (0,4871 ha, 2,66%) se situent dans la tranche basse. Au total, l'ensemble des unités cartographiées représente 18,2810 ha.

Tableau 1 : Nombre de données et superficie par type d'unité écologique (UE)

Nom UE	Nb de données par UE	superficie (ha)	Superficie (%)	Superficie min (ha)	Superficie max (ha)
Boulaie	3	1,3845	7,57	0,0816	0,8556
Boulaie à saules	5	0,9488	5,19	0,0296	0,3496
Boulaie à sphaignes	3	0,5812	3,18	0,0279	0,3779
Boulaie pâturée	2	0,4871	2,66	0,1579	0,3292
Fougeraie	5	0,5248	2,87	0,0205	0,2583
Hêtraie	2	0,0998	0,55	0,0451	0,0548
Jonchaie	10	1,7467	9,55	0,0307	0,5228
Jonchaie à carex	4	0,6066	3,32	0,0630	0,3404
Jonchaie à graminées	11	1,3565	7,42	0,0226	0,3800
Mégaphorbiaie	1	0,0606	0,33	0,0606	0,0606
Molinaie	7	0,8051	4,40	0,0251	0,2264
Molinaie à bouleaux	4	0,1252	0,68	0,0238	0,0379
Molinaie à joncs	4	0,6647	3,64	0,0470	0,3300
Pessière	2	0,8109	4,44	0,2087	0,6022
Piniaie	4	5,1659	28,26	0,0718	4,8640
Pré-mégaphorbiaie	4	0,2300	1,26	0,0185	0,0994
Saulaie	24	1,2592	6,89	0,0119	0,2027
Saulaie à bouleaux	6	0,9222	5,04	0,0338	0,3174
Saulaie à molinie	1	0,0062	0,03	0,0062	0,0062
Sphaignes	5	0,4949	2,71	0,0164	0,2187
Total général	107	18,2810	100		

Pour avoir une vision plus globale, ces unités peuvent être regroupées en grands ensembles. Les jonchaies (jonchaie, jonchaie à carex, jonchaie à graminées) rassemblent vingt-cinq relevés pour 3,7098 ha, soit 20,29 % de la surface totale. Les molinaies (molinaie, molinaie à bouleaux, molinaie à joncs) comptent quinze relevés et couvrent 1,5950 ha (8,72 %). Les petits arbustes (boulaies et saulaies) regroupent quarante-quatre relevés pour 5,5892 ha, soit 30,55 % de la surface cartographiée. Les unités forestières (piniaie, pessière, hêtraie) représentent huit relevés et s'étendent sur 6,0766 ha (33,24 %). Les unités écologiques dominées par la sphaigne ne couvrent qu'un demi-hectare. Enfin, les autres unités (fougeraie, mégaphorbiaie, pré-mégaphorbiaie) comptent 10 relevés pour 0,8154 ha (4,47%).

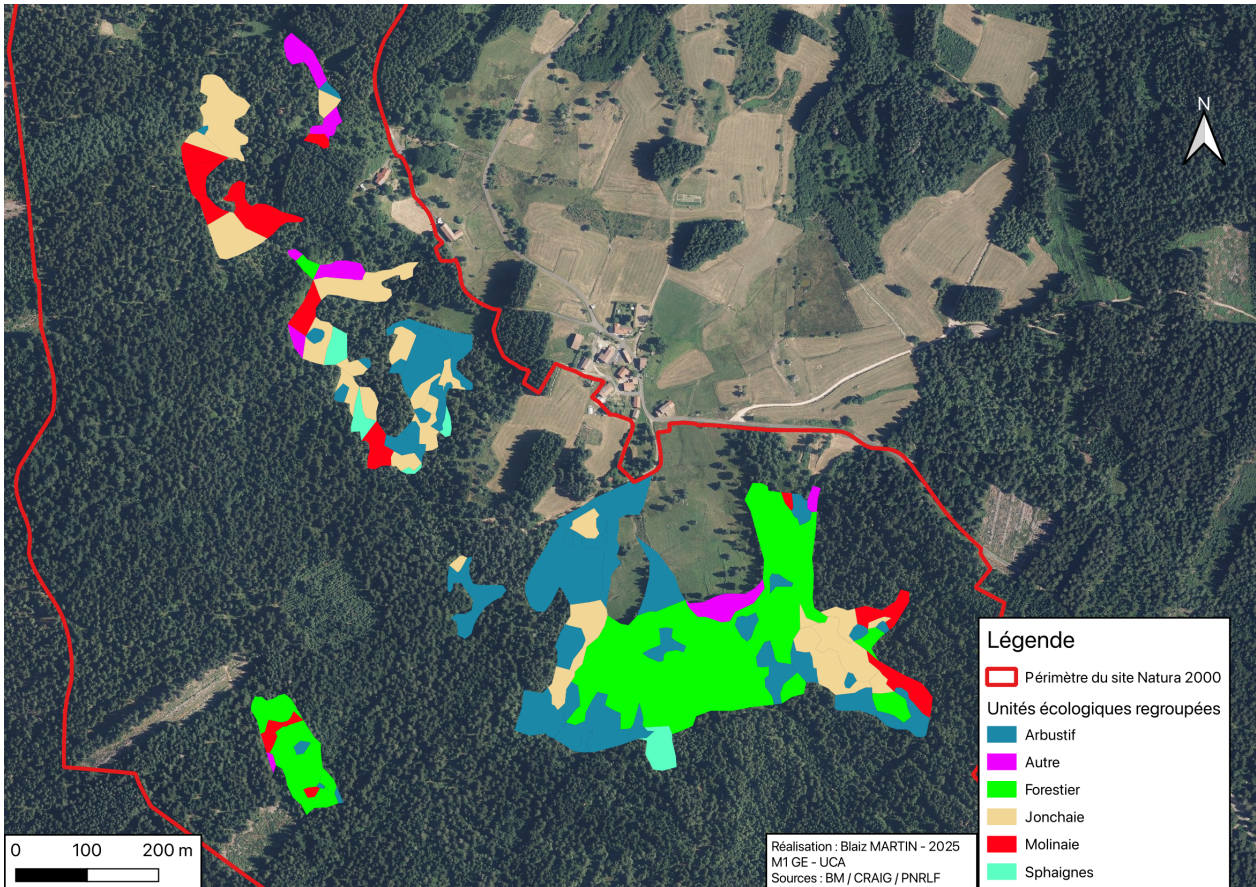


Figure 3 : Carte des unités écologiques regroupées par grands types

4.2 - Répartition des espèces bioindicatrices

La répartition spatiale des espèces bioindicatrices (EBI) d'émergences d'eau souterraine sur le site Natura 2000 de Virennnes est présentée ci-dessous, où chaque espèce est distinguée par un code couleur spécifique.

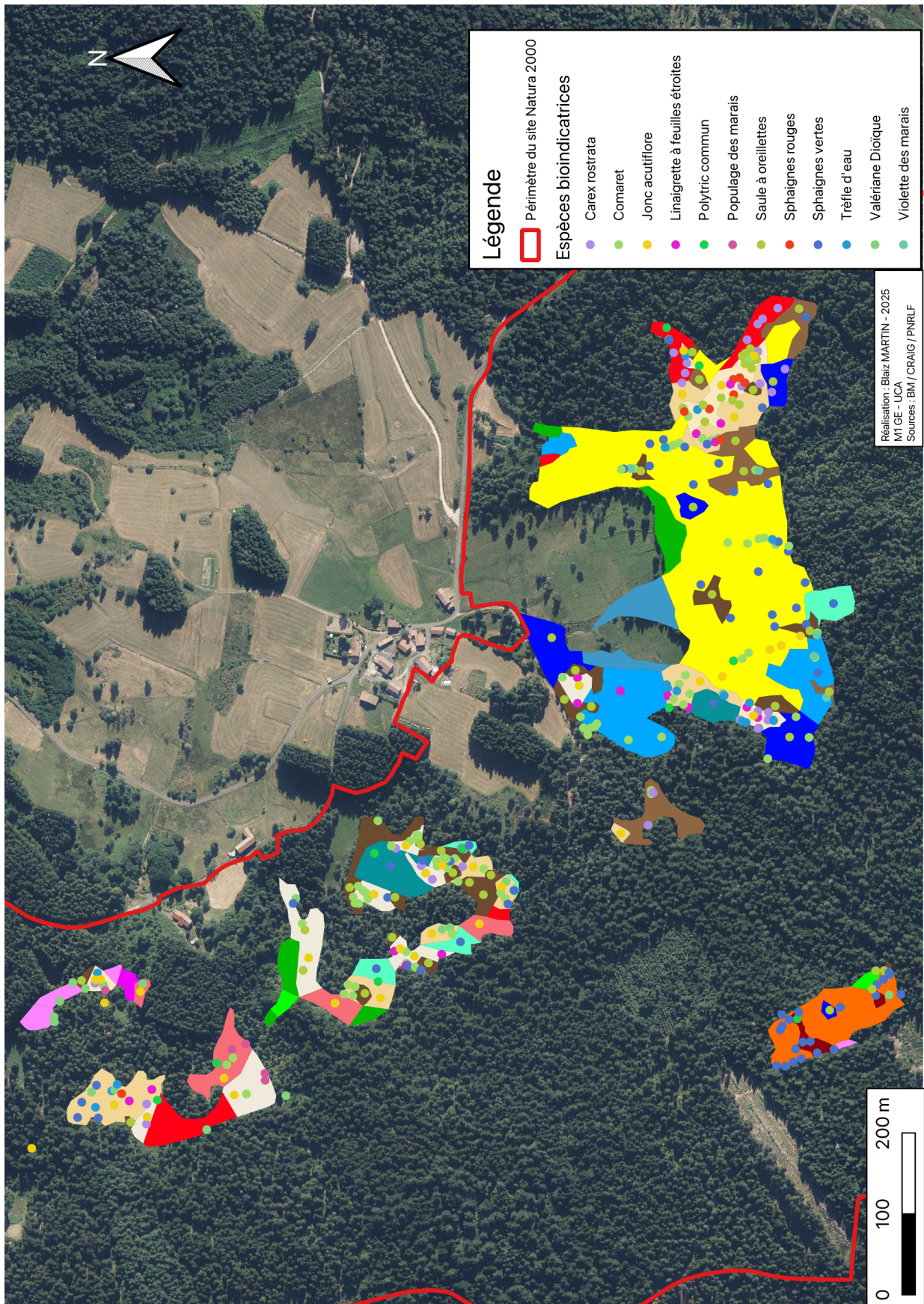


Figure 4 : Carte de la localisation des espèces bioindicatrices d' émergence

Au total, 335 relevés d'EBI ont été réalisés sur l'ensemble de la zone d'étude. Certaines espèces sont peu présentes, comme les sphaignes rouges (8 relevés) ou le populage des marais (6 relevés), tandis que d'autres sont largement représentées, à l'image des sphaignes vertes (61 relevés) ou du comaret (76 relevés), qui est l'espèce la plus fréquemment rencontrée.

Tableau 2 : Nombre de données par espèces bioindicatrices (EBI)

Nom EBI	Nb de données par EBI
Populage des marais	6
Sphaignes rouges	8
Polytric commun	10
Violettes des marais	11
Valériane Dioïque	15
Linaigrette	16
Trèfle d'eau	17
Carex rostrata	29
Jonc acutiflore	34
Saule à oreillettes	52
Sphaignes vertes	61
Comaret	76
Total général	335

La présence d'EBI varie fortement selon les unités écologiques. Certaines unités comme la jonchaie (68 relevés), la jonchaie à graminées (60 relevés) ou la jonchaie à carex (49 relevés) concentrent une part importante des observations, plus de la moitié, tandis que d'autres, comme la saulaie à molinie (1 relevé) ou la boulaie à sphaignes (3 relevés), n'en comptent que quelques-unes.

Tableau 3 : Nombre de données EBI par type d'UE

Nom UE	Nb de données EBI par UE
Saulaie à molinie	1
Boulaie à sphaignes	3
Pré-mégaphorbiaie	4
Molinaie à bouleaux	8
Sphaignes	9
Molinaie	10
Boulaie à saules	10
Molinaie à joncs	10
Boulaie	11
Pessière	13
Saulaie à bouleaux	13
Saulaie	30
Pinaie	36
Jonchaie à carex	49
Jonchaie à graminées	60
Jonchaie	68
Total général	335

Quatre types d'unités écologiques ne présentent aucune espèce bioindicatrice d'émergence : la mégaphorbiaie, la hêtraie, la fougeraie et la boulaie pâturée. D'autres unités, comme la pré-mégaphorbiaie ou la molinaie, comptent à la fois des zones où des EBI sont présentes et d'autres où elles sont absentes. En tout, les surfaces dépourvues d'EBI représentent 1,84 ha, soit 10,08 % de la surface totale cartographiée.

L'analyse de la diversité spécifique par unité écologique montre que certaines unités abritent une large variété d'EBI. Par exemple, dans l'ensemble des jonchaies simple, on retrouve 11 des 12 espèces étudiées, seul le populage des marais (*Caltha palustris*) étant absent. À l'inverse, certaines unités n'ont pas une grande diversité, comme la pré-mégaphorbiaie où seule la valériane dioïque a été observée, ou la saulaie à molinie où l'on ne retrouve qu'une seule espèce.

Tableau 4 : Répartition des données EBI par type d'UE

Nom UE	Carex		Jonc		Polytric commun	Populage des marais	Saulaie à oreillettes	Sphaignes rouges	Sphaignes vertes	Trèfle d'eau	Valériane Dioïque	Violettes des marais	Total général	Nombre d'EBI différente
	rostrata	Comaret	acutiflore	Linaigrette										
Boulaie		7		1					1			2	11	4
Boulaie à saules	2	3					5						10	3
Boulaie à sphaignes					1				2				3	2
Jonchaie	4	20	10	7	1		2	2	7	7	5	3	68	11
Jonchaie à carex	8	3	5	3	1	1	12	6		7	2	1	49	11
Jonchaie à graminées	5	26	11	5	1	3	2		5	1	1		60	10
Molinaie	6				1				1		1	1	10	5
Molinaie à bouleaux					1				7				8	2
Molinaie à joncs		2	4		1	2					1		10	5
Pessière									12		1		13	2
Pinaie		9	4		2				17	2		2	36	6
Pré-mégaphorbiaie											4		4	1
Saulaie		3					25		1			1	30	4
Saulaie à bouleaux	2	3					5		2			1	13	5
Saulaie à molinie							1						1	1
Sphaignes	2				1				6				9	3
Total général	29	76	34	16	10	6	52	8	61	17	15	11	335	12
EBI présent dans X unités différentes	7	9	5	4	9	3	7	2	11	4	7	7	16	

Lorsque l'on considère la fréquence de présence des espèces dans les différentes unités écologiques, certaines ont été relevées plus souvent, à l'image des sphaignes vertes présentes dans 11 des 16 unités, tandis que d'autres, comme les sphaignes rouges, ne se rencontrent que dans deux types d'unités.

L'analyse précise de la présence des espèces bioindicatrices dans chaque unité écologique met en évidence des variations selon les espèces et les unités. Par exemple, la sphaigne verte est présente dans toutes les unités de Boulaie à sphaignes (3/3), Molinaie à bouleaux (4/4), Pessière (2/2), Sphaignes (5/5), tandis qu'elle n'est présente que dans 3 des 10 jonchaies.

Tableau 5 : Proportion d'EBI par type d'UE

	Carex rostrata	Comaret	Jonc acutiflore	Linaigrette	Polytrichum commun	Populage des marais	Saule à oreillettes	Sphaignes rouges	Sphaignes vertes	Trèfle d'eau	Valériane Dioïque	Violettes des marais	Total UE
Boulaie	0	2/2	0	1/2	0	0	0	0	1/2	0	0	1/2	2
Boulaie à saules	1/5	1/5	0	0	0	0	5/5	0	0	0	0	0	5
Boulaie à sphaignes	0	0	0	0	1/3	0	0	0	3/3	0	0	0	3
Jonchaie	4/10	7/10	10/10	3/10	0	0	1/10	2/10	3/10	2/10	3/10	2/10	10
Jonchaie à carex	4/4	2/4	4/4	2/4	1/4	1/4	2/4	1/4	0	3/4	1/4	1/4	4
Jonchaie à graminées	4/11	8/11	11/11	3/11	1/11	2/11	1/11	0	4/11	1/11	1/11	0	11
Molinaie	2/3	0	0	0	1/3	0	0	0	1/3	0	1/3	1/3	3
Molinaie à bouleaux	0	0	0	0	1/4	0	0	0	4/4	0	0	0	4
Molinaie à joncs	0	1/4	4/4	0	1/4	1/4	0	0	0	0	1/4	0	4
Pessière	0	0	0	0	0	0	0	0	2/2	0	1/2	0	2
Pinaie	0	1/2	1/2	0	2/2	0	0	0	1/2	1/2	0	1/2	2
Pré-mégaphorbiaie	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2/2	0	2
Saulaie	0	3/24	0	0	0	0	24/24	0	1/24	0	0	1/24	24
Saulaie à bouleaux	1/6	2/6	0	0	0	0	5/6	0	2/6	0	0	1/6	6
Saulaie à molinie	0	0	0	0	0	0	1/1	0	0	0	0	0	1
Sphaignes	1/5	0	0	0	2/5	0	0	0	5/5	0	0	0	5
Présence totale UE diff	1	1	4	0	1	0	3	0	4	0	1	0	

Dans une vision plus globale le regroupement par grands types d'habitats (ex : jonchaie, formations arbustives, formations forestières) permet de mettre en évidence des tendances générales. Les formations de type jonchaie sont celles qui regroupent la plus grande diversité et le plus grand nombre d'EBI, tandis que certaines formations forestières, bien que localement plus présentes, comptent globalement moins d'espèces indicatrices.

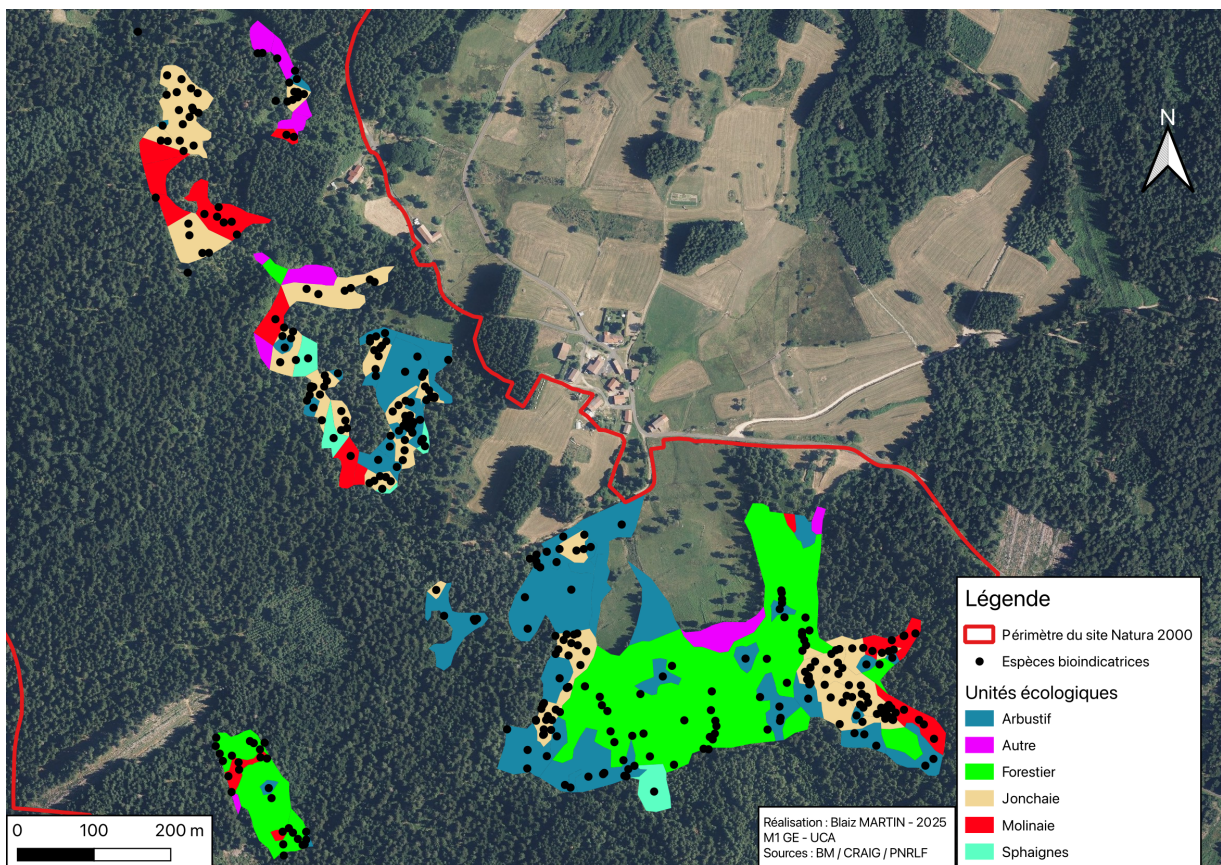


Figure 5 : Carte de la répartition des espèces bioindicatrices par grands types d'unités écologiques

4.3 - Mesures de l'épaisseur du sol

4.3.1 - Le site dans son ensemble

Au total, 288 points de mesure ont été réalisés pour estimer l'épaisseur du sol sur le site. La valeur maximale relevée dans une molinaie ne possédant pas d'EBI est de 180 cm. La moyenne générale calculée en prenant en compte toutes les mesures à partir de 0 cm est de 59,07 cm. En excluant les très faibles valeurs et en ne considérant que les mesures supérieures à 10 cm, cette moyenne passe à 63,78 cm, et elle atteint 73,62 cm lorsqu'on ne retient que les mesures supérieures à 30 cm.

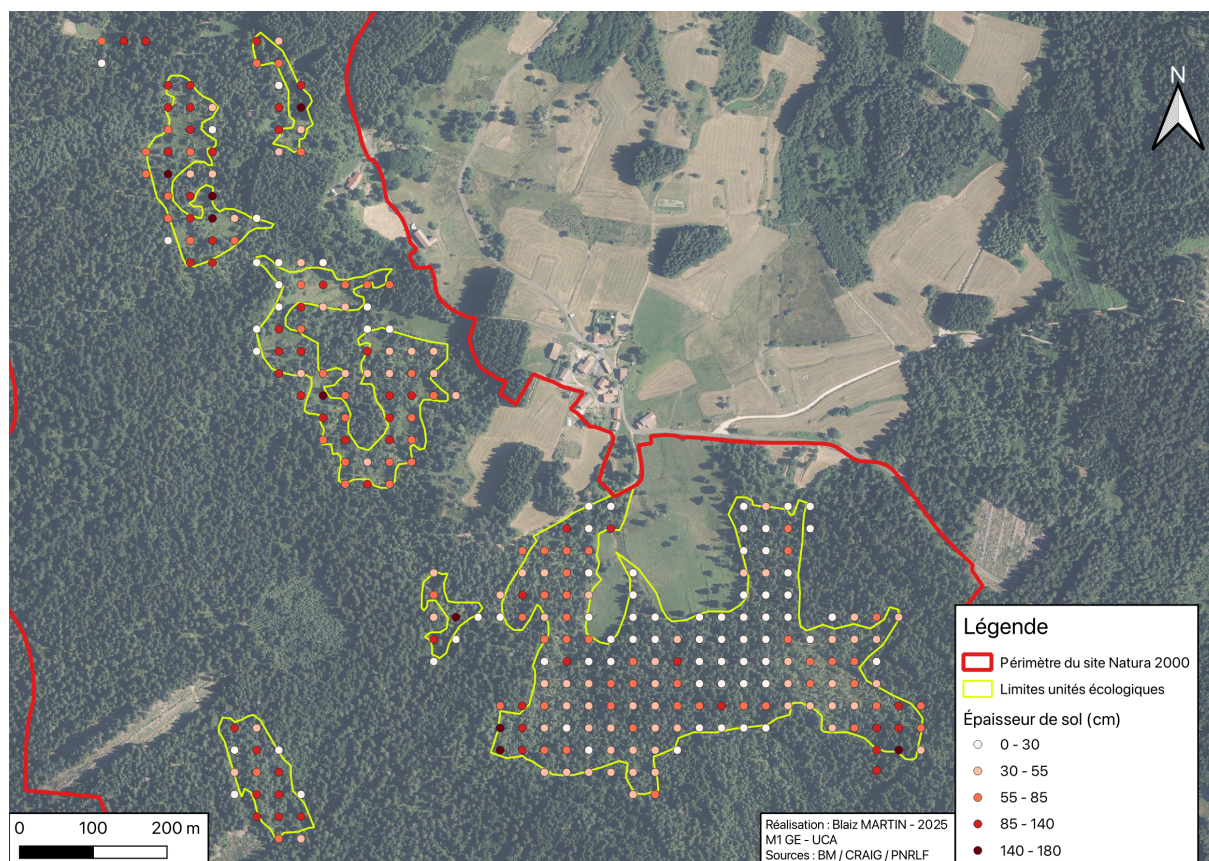


Figure 6 : Cartographie des mesures d'épaisseur du sol

Tableau 6 : Statistiques des épaisseurs de sol

Moyenne	Médiane	Ecart type	Min	Max	Max-Min	Q1	Q3	Q3-Q1	Nb données
59,0690	55	38,0523	0	180	180	30	85	55	290

Les épaisseurs moyennes varient nettement selon les unités écologiques, avec un nombre de mesures qui diffère aussi. Par exemple, la pinnaie, avec 58 relevés, affiche une épaisseur moyenne d'environ 37 cm, tandis que la jonchaie, forte de 68 sondages, présente une épaisseur moyenne bien plus importante, proche de 79 cm. La molinaie à joncs (8 sondages) et

la pessière (8 sondages) enregistrent des valeurs élevées, respectivement 99,5 cm et 92 cm en moyenne. À l'inverse, des unités comme la boulaie pâturée (7 sondages) ou la fougeraie (5 sondages) ont des épaisseurs beaucoup plus faibles, autour de 26 à 36 cm.

Dans l'ensemble, la moyenne d'épaisseur de sol calculée à l'intérieur des unités écologiques réunies est de 63 cm environ, ce qui correspond à la moyenne calculée à partir des mesures supérieures à 10 cm. En comparaison, les mesures faites hors unités écologiques, avec un total de 92 points, donnent une moyenne plus faible, de 51 cm.

Tableau 7 : Moyennes des épaisseurs de sol par type d'UE

Nom UE	Boulaie	Boulaie à saules	Boulaie à sphaignes	Boulaie pâturée	Fougeraie	Jonchaie	Jonchaie à carex	Jonchaie à graminées	Mégaphorbiaie	Molinaie	Molinaie à bouleaux	Molinaie à joncs	Pessière	Pinale	Pré-mégaphorbiaie	Saulaie	Saulaie à bouleaux	Sphaignes	hors UE	Moyenne ensemble habitée
moyenne par type d'UE	63,67	80,55	59,50	25,71	35,80	79,41	79,00	89,77	50,00	97,33	54,67	99,63	92,38	37,33	81,50	57,46	78,10	67,29	51,10	62,77
Nb sondage par UE	12	11	8	7	5	17	6	13	1	9	3	8	8	58	2	13	10	7	92	198
moyenne à 30 cm	67,64	106,13	59,50	36,00	53,33	79,41	79,00	89,77	50,00	97,33	69,50	99,63	92,38	14,79	81,50	61,25	94,00	67,29	66,60	72,14

4.3.2 - Modèle d'épaisseurs de tourbe

Dans la zone nord-ouest du site où la tourbe a été mesurée de façon précise, 119 relevés ont été faits pour créer un modèle d'épaisseur de tourbe grâce aux outils QGIS. En prenant en compte toutes les mesures, y compris celles où il n'y a pas de tourbe (c'est-à-dire des 0), la moyenne d'épaisseur est de 33,6 cm. Mais si on enlève ces 0, la moyenne passe à 63,4 cm, ce qui donne une idée plus juste de l'épaisseur réelle quand la tourbe est bien présente.

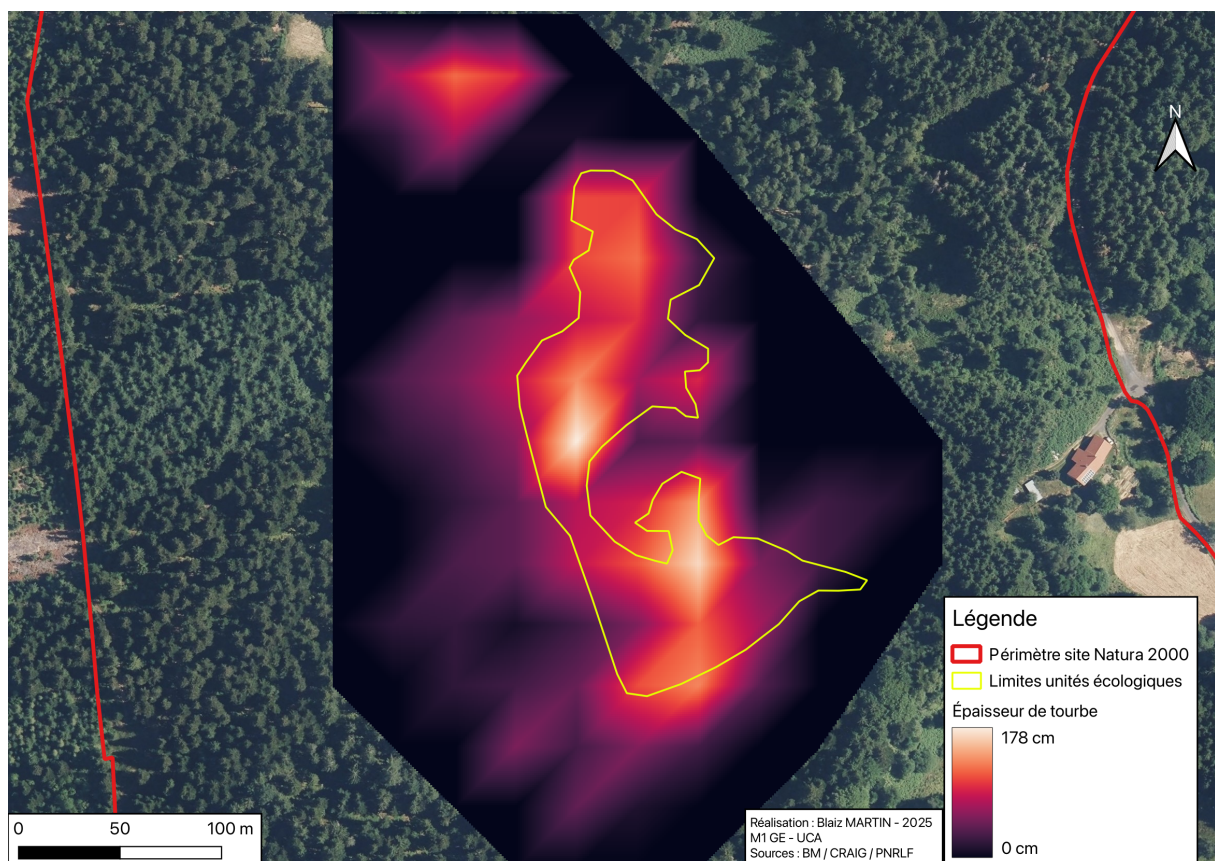


Figure 7 : Carte du modèle d'épaisseur de tourbe

La valeur médiane, qui sépare les mesures en deux moitiés, est à 55 cm. On remarque aussi que les mesures sont assez variables, avec un écart-type assez grand de 42,4 cm. Les épaisseurs mesurées vont de 10 cm jusqu'à 180 cm, soit une amplitude de 170 cm.

Tableau 8 : Statistiques des épaisseurs de tourbe du modèle

moyenne avec 0	Moyenne sans 0	Médiane	Ecart type	Min	Max	Max-Min	Q1	Q3	Q3-Q1
33,59	63,44	55,00	42,35	10,00	180,00	170,00	30,00	94,00	64,00

En regardant les quartiles, 25 % des mesures sont en dessous de 30 cm, et 75 % sont en dessous de 94 cm, ce qui montre bien que les épaisseurs varient beaucoup selon les endroits.

4.4 - Organisation des écoulements

4.4.1 - Réseau d'écoulements des eaux de surface

L'ensemble du travail de terrain a permis de réaliser 134 points de relevé dans les habitats tourbeux du site Natura 2000 de Virennnes et sa proche périphérie. Ces relevés, de nature variée, concernent tous l'organisation hydrographique des milieux tourbeux.

Au fil des observations, plusieurs types de réseaux ont pu être distingués :

- Le ru : petit ruisseau à faible débit, dont le lit est creusé dans le sol (de 10 cm à 1 m de profondeur). Bien que parfois recouvert par la végétation au fil des années, il reste toujours en eau et ouvert ;
- Le ru sans eau : il s'agit d'un ancien ru ou d'un ru saisonnier. Lors du relevé, aucun écoulement n'était actif, seul le lit restait visible ;
- Le ru sans lit : simple écoulement de surface, où l'eau circule sans force suffisante pour creuser un véritable lit ;
- Le lit : différent du ru sans eau, il correspond à un fossé profond (parfois plus d'un mètre) et large, en forme de lit de rivière, mais non rempli d'eau. Ce type de structure se caractérise par un large fossé rempli de sphaignes et autres plantes indicatrices dans un milieu forestier qui est ici la pinnaie ;
- Le drain : aménagement créé par l'homme, rencontré sous deux formes : un fossé sec, ou un drain en eau, le plus souvent destiné à l'évacuation des eaux.

Une fois ces relevés comparés avec le MNT (1 m) et complétés par les données LIDAR lorsque la précision faisait défaut, ils ont été reliés entre eux pour reconstituer un réseau hydrographique semi-complet. Certains points n'ont cependant pas pu être rattachés et sont restés isolés.

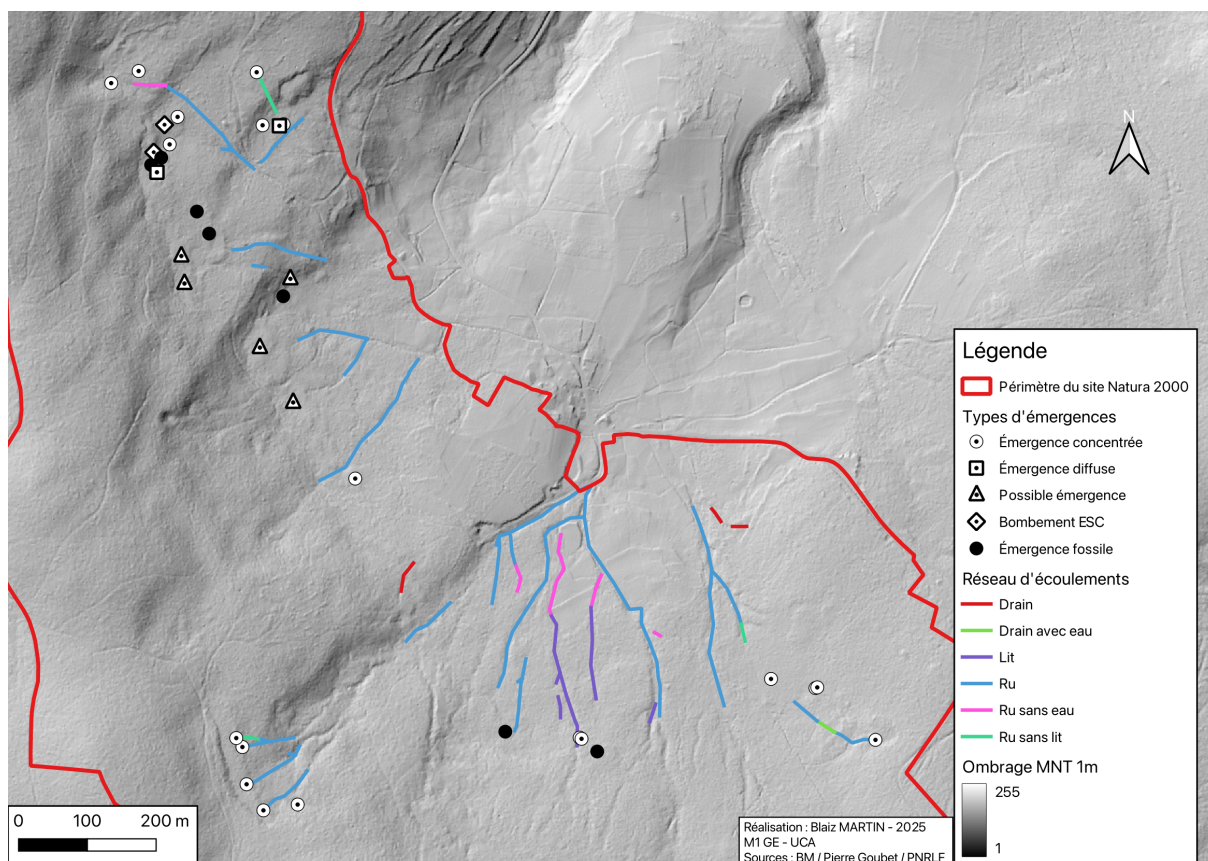


Figure 8 : Carte de l'organisation du réseau d'écoulements de surface

Au total, ce réseau représente 3 692,74 m de segments :

- 25 rus, de 10 à 300 m, pour un total de 2 770,91m ;
- 5 rus sans eau, de 10 à 100 m, pour un total de 272,473 m ;
- 3 rus sans lit, de 25 à 60 m, pour un total de 127,363 m ;
- 5 lits, de 15 à 200 m, pour un total de 401,982 m ;
- 3 drains, de 10 à 50 m, pour un total de 89,5925 m ;
- 1 drain en eau, de 30,4203 m.

Le tracé du réseau en dehors des unités écologiques, à partir des cartes satellites, n'a pas été réalisé faute de prospection de l'entièreté du site.

4.4.2 - Relevé des émergences

L'ensemble des relevés de terrain, complétés par les apports de Pierre Goubet, a permis d'identifier différents types d'émergences d'eau souterraine dans les habitats tourbeux du site Natura 2000 de Virennais. Ces émergences, qu'elles soient actives, fossiles ou supposées, apportent des éléments essentiels à la compréhension du fonctionnement hydrologique et de l'alimentation des tourbières.

Cinq catégories principales ont été définies puis relevées et une zone tampon de 20 m leur a été attribuée pour recenser la présence d'espèces bioindicatrices et les épaisseurs de sol associées.

L'émergence concentrée correspond à un point unique où l'eau souterraine fait surface, formant généralement une flaque visible à l'origine d'un écoulement possible temporairement ou permanent, repérable par une végétation voisine en "halo" au point de sortie. Au total, 19 émergences de ce type ont été recensées, dont 7 observées lors des relevés de terrain et 12 issues des données de Pierre Goubet. L'épaisseur moyenne de sol avoisine 72,6 cm, et elles se distinguent par une richesse écologique, avec 403 espèces bioindicatrices recensées dans les zones tampon de 20 m. Plusieurs de ces émergences initient directement des branches du réseau hydrographique.

L'émergence diffuse ne se traduit pas par un point d'eau visible, mais par un apport souterrain dans le sol, rendu possible par la présence d'un socle imperméable. Deux émergences diffuses ont été relevées, toutes deux issues des données de Pierre Goubet. Elles présentent l'épaisseur moyenne de sol la plus élevée, avec 130,7 cm, et accueillent 53 espèces bioindicatrices, témoignant de conditions particulièrement favorables à la formation de tourbières.

L'émergence fossile désigne d'anciennes émergences aujourd'hui inactives, conséquence de réorganisations souterraines ayant interrompu l'apport en eau. Sept émergences fossiles ont été identifiées, toutes signalées par Pierre Goubet. Malgré leur inactivité, elles conservent une forte empreinte écologique : l'épaisseur moyenne de tourbe atteint 107 cm et 29 espèces bioindicatrices ont été relevées dans leur voisinage. Ces caractéristiques témoignent du rôle passé de ces zones dans l'alimentation en eau.

L'émergence de bombement semi-concentrée se caractérise par un gonflement du sol gorgé d'eau, renfermant en son centre une petite zone en eau. Le piétinement provoque une réduction temporaire de la structure, signe de sa forte imprégnation hydrique. Deux émergences de ce type ont été observées lors d'une sortie commune. Elles présentent une épaisseur moyenne de tourbe de 97,5 cm et abritent 5 espèces bioindicatrices.

Les émergences supposées correspondent à des zones où la topographie, la saturation en eau, la présence d'espèces bioindicatrices et les conditions amont/aval laissent envisager un apport hydrique souterrain. Cinq émergences supposées ont été recensées lors des relevés de terrain. Elles sont associées à une épaisseur moyenne de tourbe de 86,2 cm et à la présence de 12 espèces bioindicatrices.

Au total, 35 émergences ont été recensées :

- 19 émergences concentrées (7 relevées durant l'étude, 12 issues de Pierre Goubet) ;
- 2 émergences diffuses (Pierre Goubet) ;
- 7 émergences fossiles (Pierre Goubet) ;
- 2 émergences de bombement semi-concentrées (sortie commune) ;
- 5 émergences supposées (relevées sur le terrain durant l'étude).

L'ensemble des données met en évidence des épaisseurs de tourbe comprises entre 72 et 131 cm selon le type d'émergence, et un total de plus de 500 espèces bioindicatrices recensées dans les zones tampon. Certaines émergences étant proches les unes des autres, des relevés ont toutefois été comptabilisés à plusieurs reprises. Il est également à noter que la sphaigne rouge et la linaigrette n'apparaissent pas dans la liste des espèces bioindicatrices à moins de 20 mètres des émergences. Ces résultats confirment le rôle central des émergences dans la mise en place

et le maintien des tourbières, tout en soulignant la diversité des situations rencontrées et leur contribution à la structuration du réseau hydrographique.

5 - Interprétation et discussion des résultats

L'ensemble des relevés réalisés sur le complexe tourbeux de Virennnes offre une première lecture du fonctionnement hydrologique et écologique du site. Même si la méthodologie n'a pas suivi un protocole strictement standardisé, la combinaison des observations (unités écologiques, espèces bioindicatrices, épaisseurs de sol, réseau d'écoulements de surface et émergences) permet d'identifier des tendances cohérentes. Ces tendances soulignent le rôle central des apports souterrains dans la structuration de la tourbière et s'intègrent dans les connaissances sur la dynamique des tourbières tempérées (Joosten & Clarke, 2002 ; Chambers & Charman, 2004).

5.1 - Diversité des unités écologiques

La cartographie révèle vingt unités écologiques distinctes, illustrant l'hétérogénéité des conditions hydrologiques locales. Les grands ensembles (jonchaies, molinaies, formations arbustives et forestières) traduisent la coexistence d'habitats ouverts dominés par des hygrophytes et de faciès boisés à pins ou bouleaux. Cette mosaïque reflète l'hétérogénéité des peuplements végétaux, où la distribution des communautés dépend des variations locales de l'humidité et de la disponibilité en nutriments.

La pinaie occupe 28,3 % de la surface étudiée (Tableau 1) et pourrait indiquer un assèchement relatif, lié à des modifications du régime hydrique ou à une dynamique naturelle en conditions oligotrophes limitées (Gorham, 1991 ; Chambers & Charman, 2004). À l'inverse, les jonchaies et molinaies, plus restreintes spatialement, concentrent les espèces bioindicatrices d'émergences et présentent les épaisseurs de tourbe les plus importantes, signe d'un fonctionnement hydrique favorable à l'accumulation organique.

Ainsi, la végétation apparaît comme un indicateur indirect des contrastes hydriques. Les formations boisées reflètent des secteurs moins alimentés, bien que les saules aient tendance à s'installer près des écoulements, tandis que les unités herbacées hygrophiles traduisent un apport souterrain stable.

5.2 - Espèces bioindicatrices et organisation des écoulements

Les 335 relevés d'espèces bioindicatrices d'émergences confirment que la végétation apparaît comme un indicateur indirect des contrastes hydriques. Leur forte densité dans les jonchaies et molinaies (près de 70 % des relevés) témoigne que ces unités constituent des zones de contact direct avec les émergences (Wheeler & Proctor, 2000). La jonchaie, qui recense 11 des 12 espèces inventoriées, montre une grande valeur bioindicatrice, tandis que les hêtraies ou fougeraies dépourvues d'EBI traduisent une déconnexion fonctionnelle avec l'alimentation hydrique de la tourbière.

La présence d'EBI dans des zones sans écoulement superficiel suggère une alimentation par les eaux et écoulements souterrains, confirmant le rôle des espèces végétales comme indicateurs de processus hydrologiques invisibles.

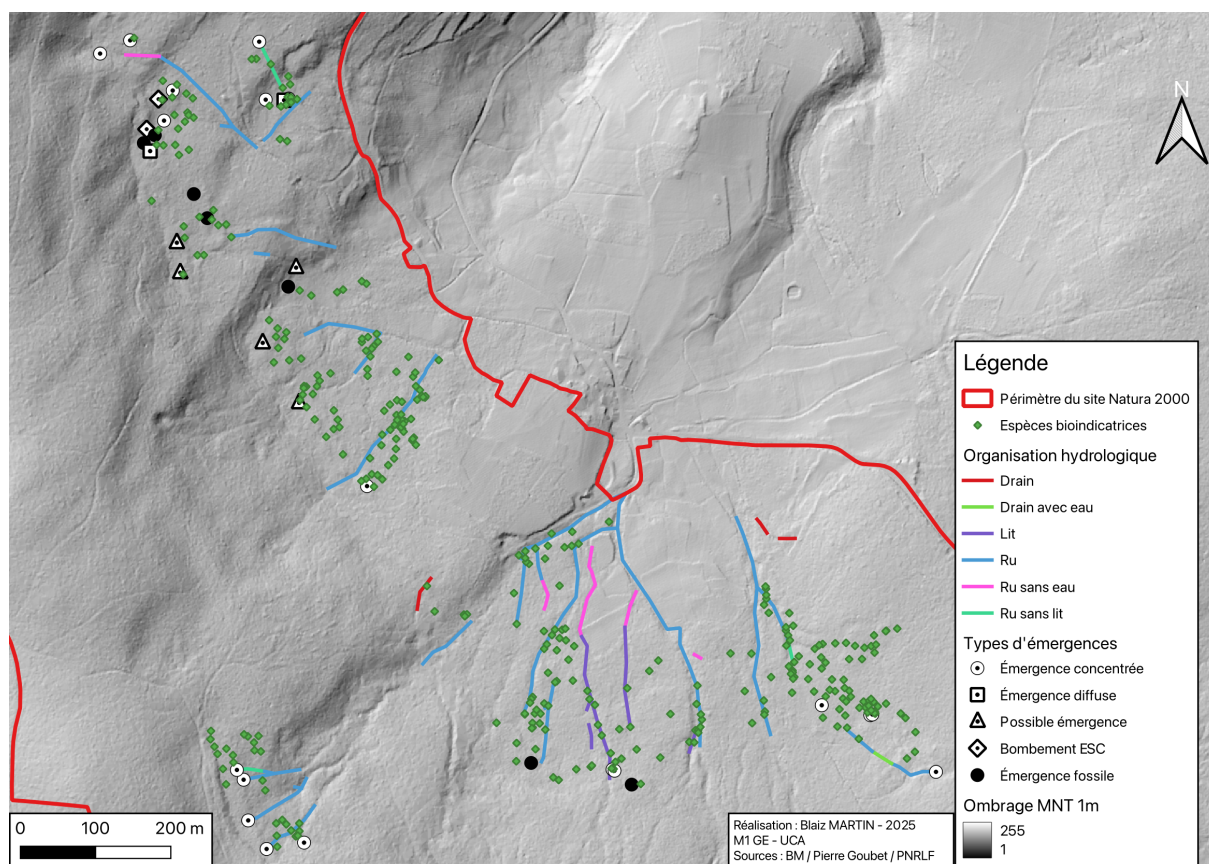


Figure 9 : Carte de l'organisation du réseau d'écoulements et espèces bioindicatrices

5.3 - Épaisseurs de la tourbe et influence des émergences

Lors de nos mesures d'épaisseur de sol, il n'était pas possible de confirmer à chaque point qu'il s'agissait strictement de tourbe. Dans l'interprétation des résultats, nous avons considéré comme tourbe les horizons d'au moins 30 cm d'épaisseur, ce qui passe la moyenne d'épaisseur de tourbe à 73,5 cm. Ce seuil est justifié par le fait que les mesures inférieures à 30 cm ont majoritairement été réalisées en dehors des unités écologiques tourbeuses, dans des pinèdes ou des zones colonisées par des ligneux. Cette distinction permet de se concentrer sur les véritables accumulations tourbeuses et d'éviter d'interpréter comme tourbe des sols périphériques ou fortement influencés par la végétation ligneuse.

Les mesures d'épaisseur révèlent un gradient clair : faibles dans la pinaie (37 cm en moyenne et 14 cm si l'on considère l'épaisseur de tourbe à partir de 30 cm) et maximales dans les jonchaies et molinaies (80 et 100 cm), avec une mesure à 180 cm à proximité d'une émergence diffuse (Tableau 7). Ces données s'accordent avec les modèles de Clymo (1984) associant accumulation tourbeuse et excédent hydrique permanent.

Certaines zones présentent une épaisseur notable sans végétation hygrophile ni réseau hydrographique visible. Ces configurations évoquent des émergences fossiles, témoignant

d'apports souterrains passés ayant favorisé la formation de dépôts épais, un phénomène observé dans d'autres tourbières tempérées (Joosten et al., 2012).

5.4 - Réseau hydrographique et émergences

Le réseau hydrographique de Virenes ($\approx 3,7$ km) combine écoulements naturels et drains artificiels, une situation fréquente dans les tourbières occidentales (Joosten & Clarke, 2002). Cependant, ce réseau seul n'explique pas la distribution des habitats hygrophiles.

Les 35 émergences recensées apparaissent déterminantes :

- Les émergences diffuses s'accompagnent d'épaisseurs de tourbe importantes et d'une forte diversité d'EBI ;
- Les émergences concentrées génèrent des microhabitats ;
- Les émergences fossiles reflètent une dynamique hydrologique passée, influencée par les variations climatiques, les mouvements sous-jacents de la roche ou les usages humains.

Le lien avec la topographie est notable : les émergences se situent en aval des ruptures de pente, suggérant une formation par la remonter des eaux souterraines par les failles. La microtopographie conditionne ainsi la localisation des émergences et la structuration des habitats.

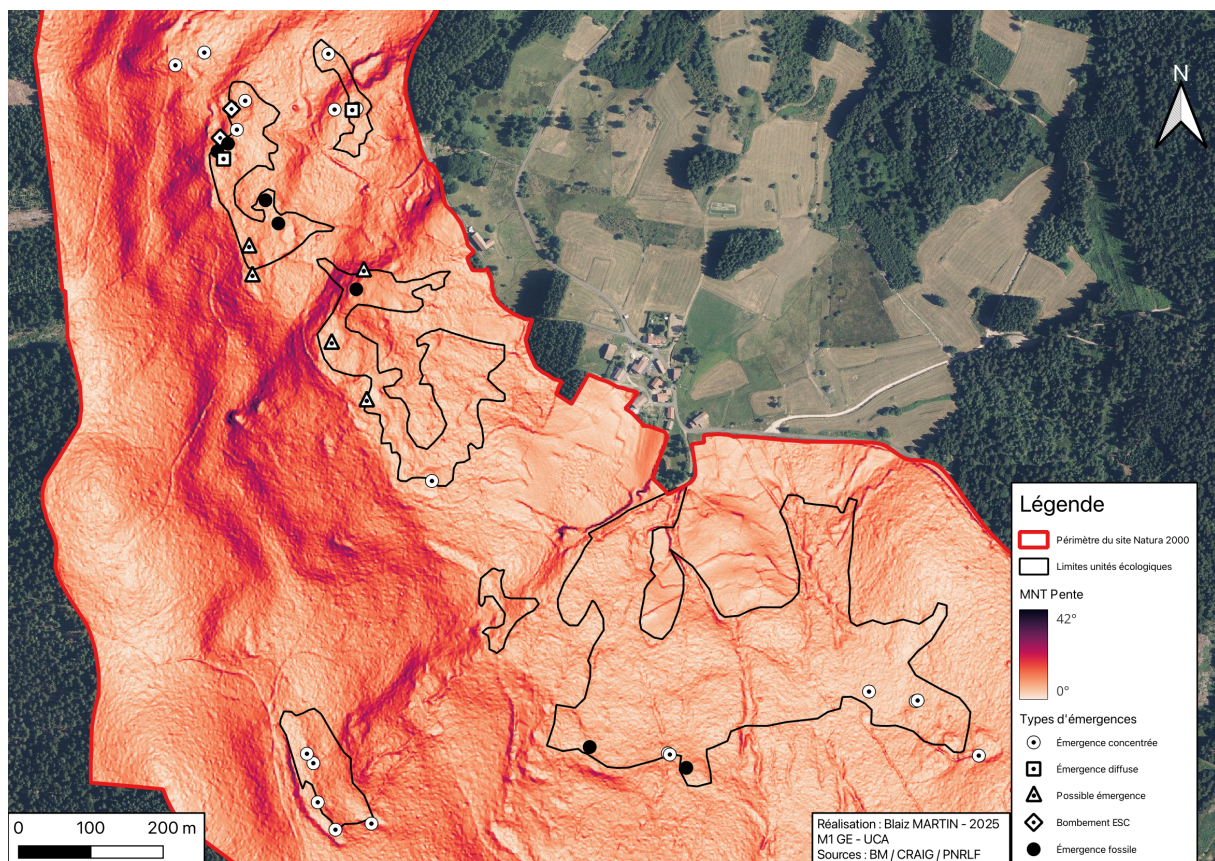


Figure 10 : Carte de la topographie et des émergences

5.5 - Vers une lecture intégrée du fonctionnement hydrique

L'ensemble des résultats montre que le fonctionnement du complexe tourbeux repose sur l'interaction entre topographie et alimentation souterraine. Les unités ouvertes riches en bioindicateurs subsistent grâce aux émergences situées en aval des ruptures de pente, permettant accumulation tourbeuse et développement de végétation hygrophile. Là où ces apports sont absents, la colonisation ligneuse progresse et certaines zones présentent des dépôts fossiles issus d'alimentations passées (Pôle-relais Tourbières, 2016).

Le croisement des cinq approches (unités écologiques, EBI, épaisseurs, réseau hydrographique, émergences) confère de la cohérence aux interprétations, permettant de formuler des hypothèses compatibles avec l'état des connaissances tout en révélant des particularités locales comme la structuration des émergences par les ruptures de pente (fracturation de la roche) et la présence d'émergences fossiles.

6 - Conclusion et perspectives

Ce travail s'inscrit dans la continuité du pré-diagnostic fonctionnel réalisé en 2024 par Pierre Goubet, qui avait souligné la nécessité de mieux comprendre le rôle des émergences d'eau souterraine dans le fonctionnement du complexe tourbeux de Vireennes, dans le Livradois. L'étude menée apporte une première cartographie détaillée des unités écologiques, des espèces bioindicatrices d'émergences, des épaisseurs de tourbe, de l'organisation hydrologique et des émergences observées sur le site.

Les résultats obtenus, bien qu'exploratoires, offrent des indications solides sur la structuration du site. La cartographie des unités écologiques met en évidence une mosaïque de vingt milieux différents, dont la répartition reflète les variations locales d'humidité et de nutriments. Les zones les plus riches en apports souterrains (jonchaies, molinaies) présentent à la fois les plus fortes accumulations de tourbe et la plus grande diversité biologique, tandis que les secteurs boisés, notamment la pinnaie, traduisent une plus faible alimentation en eau et une progression de la colonisation ligneuse.

L'analyse du réseau des écoulements visibles confirme que ces flux seuls ne suffisent pas à expliquer la distribution des habitats. Ce sont bien les émergences (diffuses, concentrées ou fossiles) qui structurent le complexe. Leur localisation systématique en aval des ruptures de pente montre l'importance des fracturations dans la circulation des eaux souterraines et donc de la localisation des émergences et dans la répartition des communautés végétales.

Ainsi, il apparaît clairement que les émergences d'eau souterraine sont des éléments déterminants du fonctionnement hydrologique et écologique du site. Le choix d'un seuil de 30 cm pour identifier les véritables horizons tourbeux a permis de distinguer les zones fonctionnelles des secteurs périphériques colonisés par les ligneux, et de mieux comprendre les liens entre accumulation de tourbe, végétation et hydrologie.

À partir de ce travail, plusieurs recommandations peuvent être formulées :

Préconisations issues du pré-diagnostic de Pierre Goubet (2024) :

- Réaliser une étude des écoulements souterrains avec des mesures physico-chimiques ;
- Mettre en place un suivi régulier des émergences et du régime hydrique, notamment avec des sondes de pression submersibles ;
- Établir une cartographie plus fine des espèces bioindicatrice en particulier des bryophytes ;
- Surveiller les aménagements hydrauliques en amont pouvant impacter le site ;
- Adopter une gestion naturelle du complexe (« laisser-faire »), afin de respecter les dynamiques propres du milieu.

Propositions issues de cette étude :

- Compléter la cartographie du réseau d'écoulements en dehors des unités écologiques ;
- Améliorer la mesure de l'épaisseur de tourbe, soit en affinant le protocole, soit en ciblant des zones spécifiques comme les émergences ;
- Poursuivre les mesures d'épaisseur dans les zones non étudiées, comme les secteurs encore pâturés, pour vérifier l'état et la présence de la tourbe.

Ces recommandations, issues à la fois de cette étude et du pré-diagnostic de 2024, fournissent une base pour poursuivre l'amélioration des connaissances du site et orienter sa gestion. Elles permettront de comprendre de manière plus précise le rôle des émergences et de préserver la dynamique écologique du complexe tourbeux de Virennés.

Bilan personnel

Ce stage de trois mois m'a permis d'approfondir mes connaissances sur les tourbières, un milieu que je connaissais déjà mais que j'ai pu explorer de manière beaucoup plus précise. Les 14 jours de terrain réalisés seul ont constitué une véritable expérience formatrice : j'y ai appris à organiser mon travail, à gagner en autonomie et à affiner mes capacités d'observation. J'ai également progressé en botanique en pratiquant l'identification des espèces directement sur le terrain. Bien que mon travail ait été mené de façon indépendante, j'ai pu bénéficier de l'accompagnement et des échanges avec des professionnels de la gestion des milieux naturels, ce qui m'a aussi permis de participer à la vie professionnelle à travers des réunions et des sorties de pôle. Cette immersion m'a ainsi offert un aperçu concret du quotidien dans ce domaine, tout en consolidant mes compétences. Par ailleurs, j'ai eu l'opportunité de présenter une première fois ma méthodologie et mes résultats préliminaires aux professionnels du parc. Enfin, le dernier jour de stage, j'ai pu restituer mes premiers résultats et hypothèses auprès d'un public plus diversifié qui étaient des habitants locaux, élus, propriétaires fonciers et touristes. N'ayant pas nécessairement de connaissances scientifiques, ce public m'a amené à adapter mon discours et à vulgariser mon étude, ce qui a constitué un exercice enrichissant et formateur.

Références bibliographiques

- Agence Européenne pour l'Environnement. (2013). *Guide d'interprétation des habitats Natura 2000 (EUNIS et habitats)*. Copenhague : Agence Européenne pour l'Environnement, 132 p.
- Ardouin, É. (2010). *Document d'objectifs du site Natura 2000 FR8302002 : Tourbière du Haut-Livradois – Complexe tourbeux de Virennnes*. Parc naturel régional Livradois-Forez, 162 p.
- Bensettiti, F., Gaudillat, V., & Haury, J. (coord.). (2002). *Cahiers d'habitats Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 3 : Habitats humides*. Paris : La Documentation française, 456 p.
- Braun-Blanquet, J. (1964). *Pflanzensoziologie. Grundzüge der Vegetationskunde*. Wien : Springer, 865 p.
- Chambers, F. M., & Charman, D. J. (2004). Holocene environmental change : contributions from peat stratigraphy. *The Holocene*, 14(1), 1–6.
<https://doi.org/10.1191/0959683604hl691xx>
- Clymo, R. S. (1984). The limits to peat bog growth. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 303(1117), 605–654.
<https://doi.org/10.1098/rstb.1984.0002>
- Georges, P. (1970). *Dictionnaire de géographie*. Paris : Presses Universitaires de France, 590 p.
- Gorham, E. (1991). Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. *Ecological Applications*, 1(2), 182–195.
<https://doi.org/10.2307/1941811>
- Goubet, P. (2024). *Prédiagnostic fonctionnel du site Natura 2000 « Tourbière du Haut-Livradois : complexe tourbeux de Virennnes » (Le Monestier, Puy-de-Dôme)*. Parc naturel régional Livradois-Forez, 49 p.
- Joosten, H., & Clarke, D. (2002). *Wise Use of Mires and Peatlands*. Saarijärvi : International Mire Conservation Group / IUCN, 304 p.
- Joosten, H., Tapio-Biström, M.-L., & Tol, S. (2012). *Peatlands – guidance for climate change mitigation through conservation, rehabilitation and sustainable use*. Rome : FAO, 100 p.
- Lunt, P., Allott, T., Anderson, P., Buckler, M., Coupar, A., Jones, P., Labadz, J., & Worrall, P. (2011). *Review of Peatland Restoration*. Edinburgh : IUCN UK Peatland Programme, 92 p.

Monteverde, S., Healy, M. G., O’Leary, D., Daly, E., & Callery, O. (2022). Management and rehabilitation of peatlands: The role of water chemistry, hydrology, policy, and emerging monitoring methods to ensure informed decision making. *Ecological Informatics*, 69, 101638. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101638>

Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M., & Stringer, L. (Eds.). (2008). *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change*. Kuala Lumpur : Global Environment Centre / Wageningen : Wetlands International, 179 p.

Pôle-relais Tourbières. (2016). *Panorama des services écosystémiques des tourbières en France*. Paris : Ministère de la Transition écologique et solidaire, 72 p.

Rameau, J.-C., Bissardon, M., & Guibal, L. (1997). *CORINE Biotopes : types d’habitats français*. Paris : École nationale du génie rural, des eaux et des forêts (ENGREF) / ATEN, 175 p.

Wheeler, B. D., & Proctor, M. C. F. (2000). Ecological gradients, subdivisions and terminology of north-west European mires. *Journal of Ecology*, 88(2), 187–203. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2000.00455.x>

Annexes

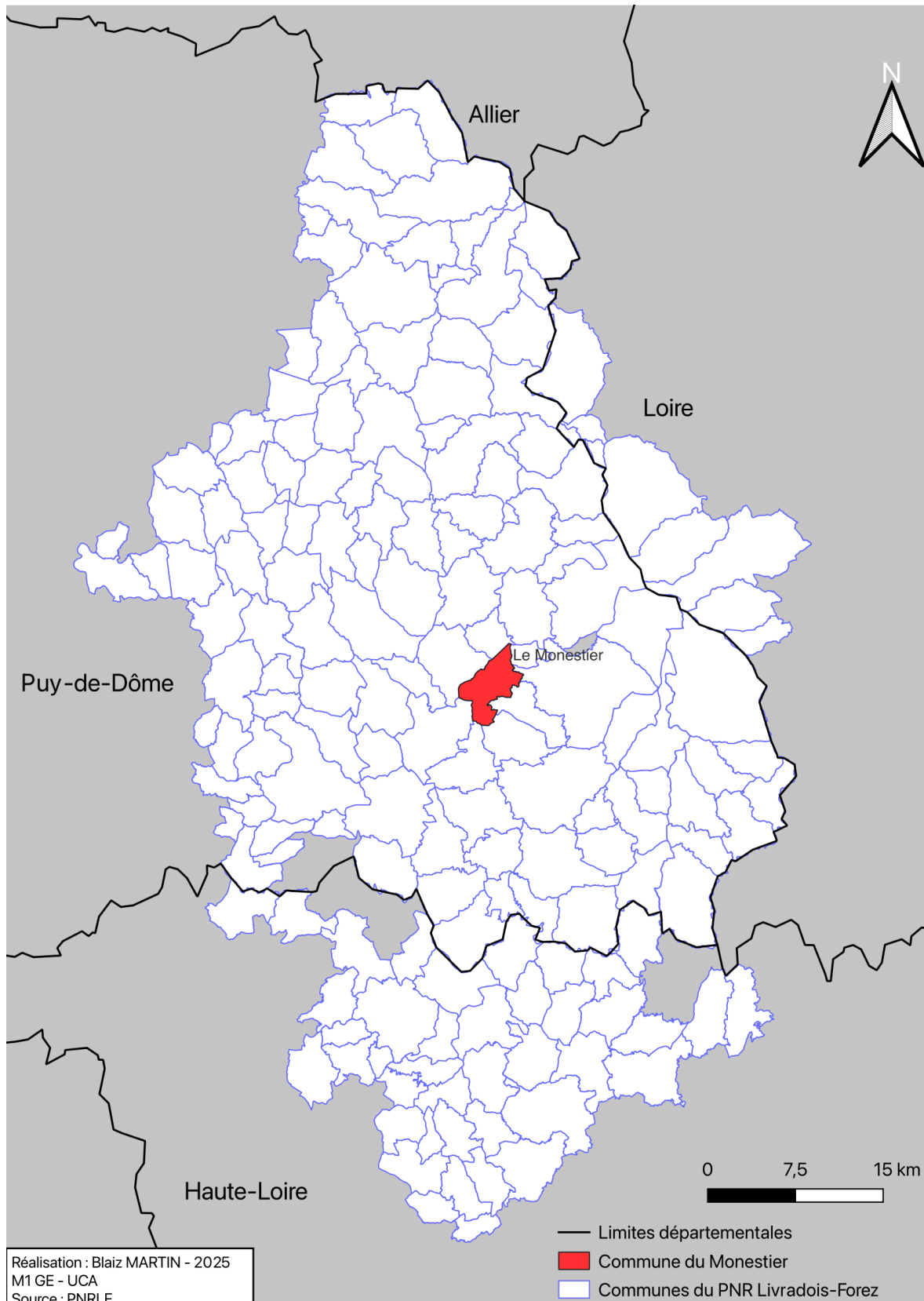
Annexe 1 : Présentation du Parc naturel régional Livradois-Forez

Créé en 1986, le Parc naturel régional Livradois-Forez (PNRLF) gère un territoire rural d'environ 300 000 hectares situé à cheval sur trois départements : le Puy-de-Dôme, la Haute-Loire et la Loire. Il s'agit de l'un des plus vastes parcs naturels régionaux de France. Ce statut, attribué par l'État, reconnaît un espace remarquable pour la qualité de ses patrimoines naturels, culturels et paysagers, tout en étant habité et aménagé. L'objectif principal d'un parc naturel régional est de concilier préservation de l'environnement et développement local durable.

Le PNRLF intervient dans de nombreux domaines : gestion des milieux naturels, développement économique local, tourisme durable, sensibilisation à l'environnement, soutien à l'agriculture de qualité, ou encore préservation du patrimoine culturel. Sa mission est encadrée par une charte de territoire, renouvelée régulièrement, qui fixe les objectifs communs à l'ensemble des collectivités partenaires et des acteurs locaux (Charte du PNRLF, 2011).

Dans le cadre de la politique européenne de conservation de la biodiversité, le Parc est fortement impliqué dans la gestion du réseau Natura 2000, qui regroupe des sites identifiés pour la richesse de leurs habitats naturels ou des espèces d'intérêt communautaire. Sur son territoire, le PNRLF est opérateur ou structure animatrice de plusieurs sites Natura 2000, dont le complexe tourbeux de Virennnes.

Plus largement, le PNRLF mène depuis plusieurs années un travail approfondi sur la préservation des milieux humides, en développant des outils de diagnostic, des partenariats scientifiques, et des actions de gestion conservatoire. Il valorise également l'intérêt des zones humides auprès des habitants et des usagers par des actions de sensibilisation.



Carte de présentation du territoire du Parc naturel régional Livradois-Forez

Populage des marais / *Caltha palustris*



Caractéristiques :

- Tige de 20-40 cm, ascendante, creuse, glabre et luisante
- Feuilles en cœur arrondi, crénelées ou dentées, tige fleur directement
- Fleurs d'un jaune doré, grandes, ouvertes, solitaires
- 5 sépales, pétaloïdes, caducs
- Pétales nuls
- Floraison mars-Juin

Violette des marais / *Viola palustris*



Caractéristiques :

- Feuilles toutes radicales, orbiculaires en rein, légèrement crénelées
- Fleurs d'un lilas (rose blanc) pâle, assez petites, inodores
- Sépales ovales, obtus
- Pétale inférieur veiné de violet à la base
- Floraison avril-juin

Valériane Dioïque / *Valeriana dioica*



Caractéristiques :

- Plante vivace, glabre et verte, oblique, presque inodore, longuement rampante
- Tige striée, finement pubescente aux nœuds
- Feuilles inférieures ovales ou elliptiques, entières, longuement pétiolées, à 5-9 segments
- Fleurs rosées, dioïques, les fleurs mâles sont deux fois plus grandes que les femelles
- Floraison mai-juin

Comaret / Comarum palustre



Caractéristiques :

- Plante vivace de 20-50 cm, pubescente, à souche longuement rampante
- Tiges ascendantes, rougeâtres, feuillées
- Feuilles imparipennées, à 5-7 folioles oblongues, vertes en dessus, glauques en dessous, fortement dentées en scie tout autour
- Fleurs d'un rouge foncé, peu nombreuses
- 5 pétales
- Floraison juin-août

Trèfle d'eau / *Menyanthes trifoliata*



Caractéristiques :

- Plante vivace, aquatique, glabre, rampante
- Feuilles alternes et comme radicales, robustes, à long pétiole engainant, à 3 folioles obovales-obtuses
- Fleurs d'un blanc rosé, en grappe simple
- Floraison avril-juin

Laîche en ampoules / *Carex rostrata*



Caractéristiques :

- Plante vivace de 30-70 cm, glaucescente, à souche rampante
- Tige trigone, à angles obtus et lisses
- Feuilles dépassant la tige, étroites (2-4 mm)
- Épis mâles 2-3, linéaires, fauves
- Les femelles 2-4, cylindriques, denses, assez écartés, dressés
- Écailles roussâtres, lancéolées
- Utricules jaune clair, glabres, étalés-divergents, renflés en vessie subglobuleuse (4 mm) nervés, contractés en bec fin lisse bidenté dépassant l'écaille.
- Floraison mai-juillet

Jonc acutiflore / *Juncus acutiflorus*



Caractéristiques :

- Plante vivace de 40-80 cm, glabre, à rhizomes longuement traçants
- Tiges dressées, un peu comprimées, feuillées
- Feuilles écartées, cylindriques-comprimées
- Fleurs d'un brun fauve, petites, glomérulées par 3-8, en panicule ordinairement étalée
- Floraison juin-août

Linaigrette / *Eriophorum angustifolium*



Caractéristiques :

- Racème d'apis
- Tiges dressées, fines, creuses, feuillées à la base
- Fleur de couleur blanche
- Ne pas confondre avec un seul pompon (*Vaginatum*)
- Floraison mai-juillet

Polytric commun / Polytrichum commune



Caractéristiques :

- Grande mousse vivace, 10–40 cm, en touffes denses
- Tiges dressées, robustes, densément feuillées
- Feuilles lancéolées, avec nervure forte et lamelles chlorophylliennes sur la nervure (ce qui donne un aspect rigide)
- Feuilles sèches étalées-récurvées, humides dressées-étalées
- Organes mâles : en rosettes terminales, ressemblant à de petites coupes
- Sporogones : soie rougeâtre, longue ; capsule cylindrique, brunâtre
- Floraison juin-septembre

Saule à oreillettes / *Salix aurita*



Caractéristiques :

- Arbrisseau vivace, 0,5–2 m, à tiges souples, légèrement velues chez les jeunes pousses
- Feuilles alternes, simples, elliptiques à ovales, 2–5 cm, bord finement denté, face supérieure vert foncé, face inférieure plus claire et légèrement velue
- Fruits : capsules brunâtres, libérant de petites graines plumeuses, transportées par le vent

Sphaignes vertes



Caractéristiques :

- Plante vivace, formant des coussins ou tapis denses, de couleur vert vif à vert foncé
- Tiges dressées ou légèrement rampantes, ramifiées en mottes étoilées à l'extrémité
- Feuilles très petites, imbriquées, en forme d'écailles, souvent translucides sur les bords
- Capsules brunâtres ou verdâtres, libérant des spores microscopiques pour la reproduction

Sphaignes rouges



Caractéristiques :

- Plante vivace, formant des coussins ou tapis denses, de couleur rougeâtre à brun-rouge parfois teinté de vert
- Tiges dressées ou légèrement rampantes, ramifiées en mottes étoilées à l'extrémité
- Feuilles très petites, imbriquées, en forme d'écailles, souvent translucides sur les bords
- Capsules brunâtres ou verdâtres, libérant des spores microscopiques pour la reproduction

Résumé

Cette étude s'inscrit dans la continuité du prédiagnostic fonctionnel de Pierre Goubet (2024) et cherche à préciser le rôle des émergences d'eau souterraine dans le fonctionnement hydrologique et écologique du complexe tourbeux de Virennnes. Pour ce faire, plusieurs approches de terrain ont été mobilisées : cartographie des unités écologiques, inventaire des espèces bioindicatrices d'émergence, mesures d'épaisseur de sol, relevé du réseau d'écoulements et localisation des émergences.

Les unités herbacées ouvertes, riches en espèces bioindicatrices, coïncident avec les plus fortes épaisseurs de tourbe, soulignant l'influence directe des émergences. À l'inverse, les formations boisées se développent dans des secteurs moins alimentés, caractérisés par des dépôts organiques plus minces. Les émergences se concentrent majoritairement en bas de pente, favorisant à la fois l'accumulation tourbeuse et la diversité végétale.

L'ensemble des observations souligne la cohérence entre végétation, hydrologie et épaisseur de sol, et confirme que le site fonctionne comme un système intégré où chaque unité est interdépendante. Dans cette perspective, plusieurs pistes de recherche et de gestion sont proposées : compléter la cartographie, affiner les sondages d'épaisseur, poursuivre l'exploration des zones non suivies et mettre en place un suivi piézométrique et physico-chimique, afin de mieux comprendre et préserver le rôle central des émergences.

Mots-clés : Tourbière, émergences d'eau souterraine, indicateurs, cartographie, hydrologie

Summary

This study follows up on the functional pre-diagnosis by Pierre Goubet (2024) and aims to clarify the role of groundwater emergences in the hydrological and ecological functioning of the Virennnes peatland complex. To this end, several field approaches were used: mapping of ecological units, inventory of bio-indicator species for emergences, soil thickness measurements, surface flow network survey, and localization of emergences.

The open herbaceous units, rich in bio-indicator species, coincide with the greatest peat thicknesses, underscoring the direct influence of the emergences. Conversely, wooded formations develop in less-fed sectors, characterized by thinner organic deposits. The emergences are mainly concentrated at the bottom of the slope, promoting both peat accumulation and plant diversity.

All the observations emphasize the coherence between vegetation, hydrology, and soil thickness, and confirm that the site functions as an integrated system where each unit is interdependent. From this perspective, several avenues for research and management are proposed: completing the mapping, refining the thickness soundings, continuing the exploration of unmonitored areas, and implementing piezometric and physicochemical monitoring to better understand and preserve the central role of the emergences.

Keywords : Peatland, groundwater emergence, indicators, cartography, hydrology