



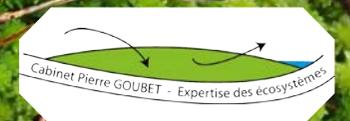
**Compte rendu d'étude commandée par le  
Parc naturel régional du Livradois-Forez**



# Prédiagnostic fonctionnel du site Natura 2000 «Tourbière du Haut-Livradois : complexe tourbeux de Vireennes» (Le Monestier, Puy-de-Dôme)

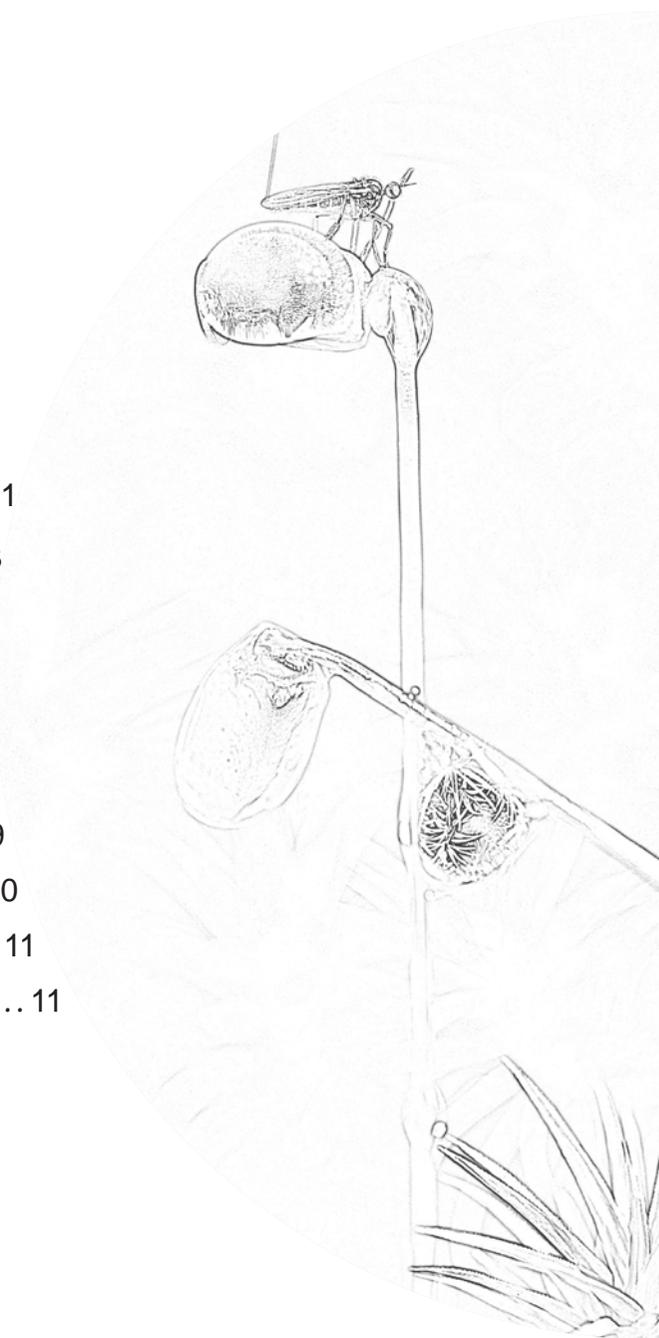


**Pierre Goubet 2024**

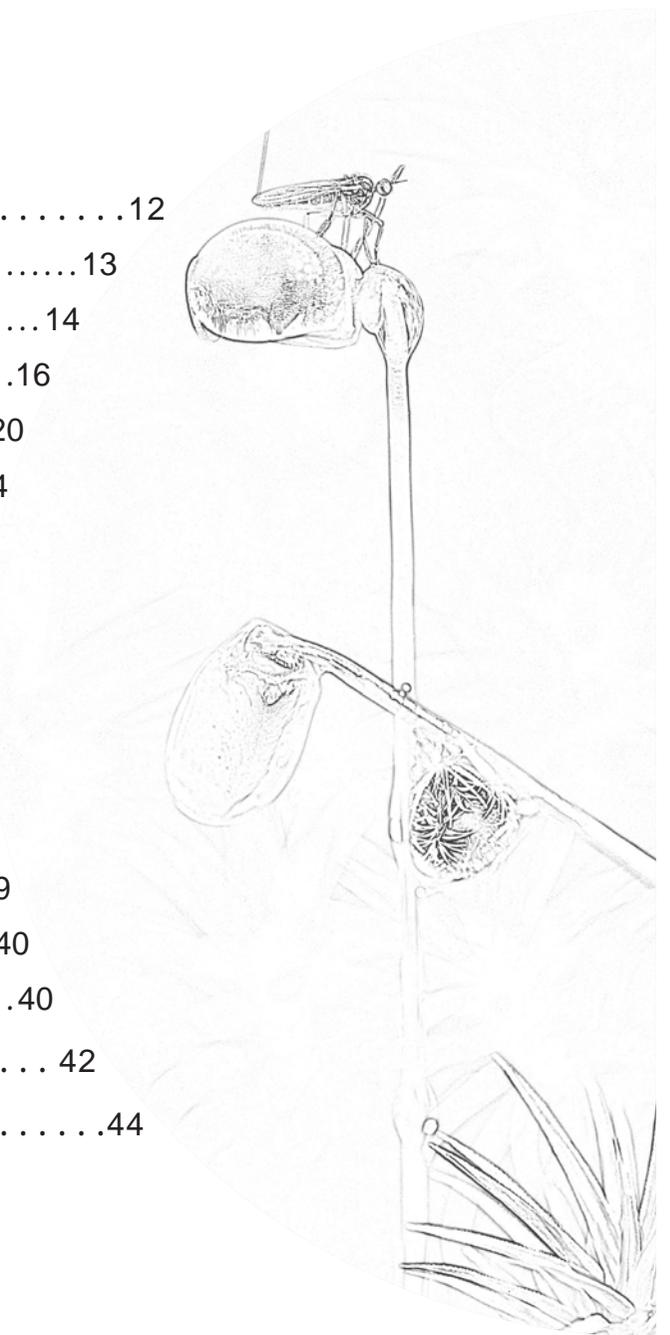


# Table des matières

I. Introduction .....	1
II. Méthodes.....	3
II.1 - Démarche globale de diagnostic.....	4
II.2 - Relief et dérivées.....	6
II.3 - Géologie et géomorphologie .....	7
II.4 - Caractérisation des épaisseurs de tourbe.....	8
II.5 - Caractérisation pédo-paléocologique de terrain .....	9
II.6 - Caractérisation des unités fonctionnelles.....	10
II.7 - Photographies aériennes anciennes .....	11
II.8 - Synthèse fonctionnelle et recommandations.....	11



III. Résultats .....	12
III.1 - Contexte.....	13
III.2 - Géologie et géomorphologie.....	14
III.3 - Données pédologiques.....	16
III.4 - Unités écologiques.....	20
III.5 - Documents anciens.....	24
IV. Interprétation fonctionnelle.....	26
IV.1 - Notions de tourbières minérotrophes et de tourbières ombrotrophes.....	27
IV.2 - Logiques pastorales et post-pastorales.....	27
IV.3 - Modèle hydrologique.....	30
IV.4 - Approche synthétique.....	35
V. Évaluation et propositions d'actions .....	38
V.1 - Actions de connaissance.....	39
V.2 - Actions de gestion.....	40
V.3 - Actions de suivi.....	40
VI. Résumé-conclusion .....	42
VII. Bibliographie.....	44



# I. Introduction



Ce document correspond au compte rendu d'une étude commandée par le Parc naturel régional du Livradois-Forez (le Parc dans le reste du document).

L'objectif de l'étude, dont le contenu formel de la commande est présenté dans l'encart ci-contre, est de réaliser un prédiagnostic du site Natura 2000 nommé «Tourbière du Haut-Livradois : complexe tourbeux de Vireennes», situé sur la commune de Le Monestier dans le département du Puy-de-Dôme.

La méthodologie du prédiagnostic s'appuie sur une phase de terrain, en général d'une demi-journée à une journée complète accompagné du

gestionnaire du site, suivie d'une analyse rapide au bureau de quelques données essentielles à la compréhension du fonctionnement du site, le tout permettant la réalisation d'une note synthétique.

Il s'agit d'un travail technique qui a pour but de produire une analyse scientifique à destination d'écologues, gestionnaires des tourbières. Son adaptation pour un public plus large pourra faire l'objet d'une prestation complémentaire.

Les données de terrain collectées sont réalisées suivant des considérations immédiates lors de la visite de terrain (pas de protocole prédéfini comme

pour un diagnostic). La stratégie n'est donc pas de générer de la donnée de long terme et représentative du site dans son intégralité, mais plutôt d'explorer des compartiments de l'écosystème de manière adaptée à certaines problématiques, en partie «générales» (type d'unités écologiques présentes, origine du complexe, état et atteintes observées, etc.), en partie spécifique à des problématiques identifiées par le gestionnaire. Parmi les données classiquement acquises lors des visites, il y a l'évaluation des épaisseurs de tourbe à la perche métallique, la nature des tourbes évaluées lors de sondages au carottier russe, l'analyse et le pointage de certaines unités fonctionnelles.

Après cette introduction (I), ce document présente les outils utilisés pour réaliser ce prédiagnostic (II), les résultats (III), puis une discussion sous la forme d'une synthèse fonctionnelle (IV) suivie de préconisations d'actions (V). Il se poursuit par un résumé-conclusion (VI) et se termine par une liste bibliographique (VII).

Ce travail a été réalisé avec la collaboration de Christine Goubet. La visite de terrain a été menée le 06/05/2024 en compagnie de Coline Peignelin, chargée de mission Natura 2000 et Sylvain Rigaud, animateur du contrat territorial Dore, tous deux au Parc naturel régional du Livradois-Forez.



## Contenu de la commande

Prédiagnostic fonctionnel du site Natura 2000 « Tourbière du Haut-Livradois : complexe tourbeux de Vireennes », (Le Monestier, puy-de-dôme)\*, comprenant :

- une visite de terrain commentée avec un membre du Parc naturel régional du Livradois-Forez, pour définir le type de tourbière ou zone humide, l'état apparent, les hypothèses fonctionnelles, les zones prioritaires, des espèces de bryophytes observées, les outils de diagnostic à mettre en place dans les domaines des végétations, de l'hydrologie et du sol (type, emplacement, etc.) ;
- un rapport synthétisant par écrit les observations de terrain.

## II. Méthodes



---

*Les explications du texte s'appuient sur de nombreuses figures. Pour faciliter la compréhension des phénomènes, des numéros dans le texte et entre crochets renvoient aux mêmes numéros dans la figure. Nous n'utilisons qu'une série de numéros par page, pour éviter les confusions.*



Les caractéristiques de la zone d'étude seront traitées dans la partie consacrée aux résultats.

Etant donné que le pré-diagnostic est une forme simplifiée de diagnostic fonctionnel, nous présenterons ici la

démarche globale de diagnostic fonctionnel et les différentes méthodes utilisées pour collecter les données. Nous ne détaillerons pas ici ces protocoles comme ils ont été appliqués dans cette étude car cela sera fait dans la partie «Résultats».

## II.1 - Démarche globale de diagnostic

Il faut concevoir la méthode d'étude comme une démarche globale, appuyée sur la notion de système, de systémique. Le complexe étudié est ainsi considéré comme un système ouvert, composé de sous-systèmes nommés «unités fonctionnelles». La notion d'écosystème ou de système écologique n'est plus définie sur la base de l'interaction entre une biocénose et un «biotope», mais comme un système complexe où matière minérale et matière organique sont intimement liées. Ce système écologique est défini par une composition, une structure et des processus d'auto-organisation. Les principes de l'auto-organisation découlent de ceux de la physique-chimie et peuvent donc être prédits par un corps de principes théoriques. L'écologie des écosystèmes a vocation à décrire les systèmes écologiques et définir les principes théoriques qui régissent leur auto-organisation, leur fonctionnement.

Notre démarche s'intègre dans le champ de l'écologie des écosystèmes

et s'appuie sur la notion de diagnostic fonctionnel. Le protocole se décline en 3 étapes successives qui peuvent être répétées si nécessaire: une description, une synthèse fonctionnelle et une série d'évaluations et de recommandations (figure II-1-1). Ces trois étapes permettent de proposer des actions de gestion et un plan de suivi qui améliorera la description d'un futur diagnostic.

La démarche de diagnostic s'appuie sur une logique d'intégration de données de différents types qui peuvent être regroupés en trois pôles majeurs (figure II-1-2) : structure ; transferts ; diachronie. Le pôle structure (au sens large) s'attache à décrire la composition et la structure (au sens strict) des complexes et de leur zone de dépendance fonctionnelle. Il s'agit donc de définir les différents composants du système (la composition) et leur arrangement spatial (la structure au sens strict), ceci à différentes échelles. Ce pôle intègre, entre autre: la caractérisation du relief de la zone d'étude, incluant les épaisseurs de

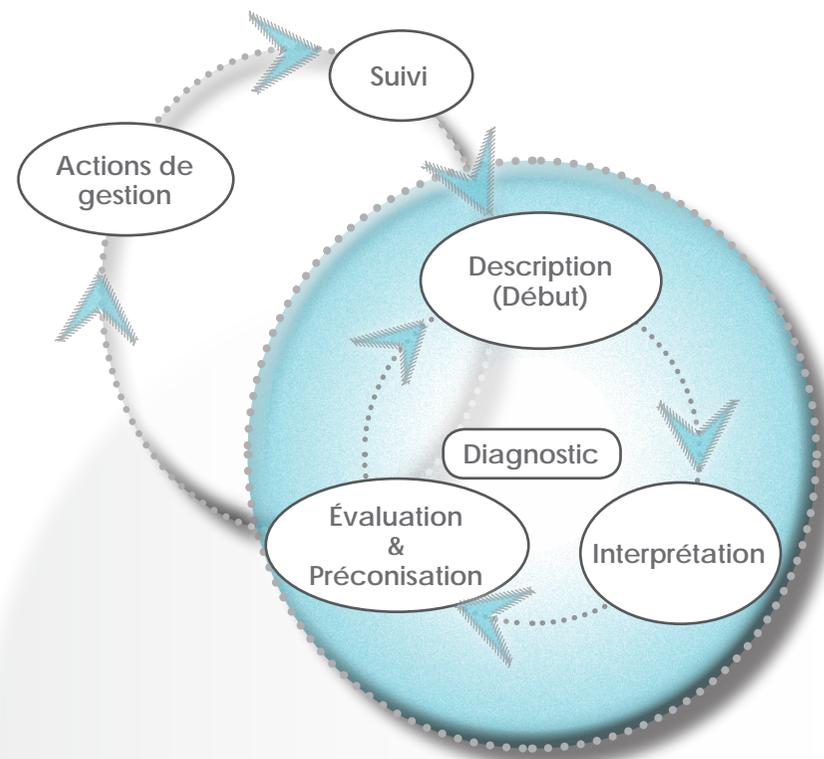


Figure II-1-1: structure du diagnostic. Le diagnostic constitue une suite logique d'actions qui débute par une description des systèmes tourbeux. A partir des données descriptives, une interprétation fonctionnelle est ensuite réalisée en comparant les résultats obtenus aux modèles de fonctionnement proposés dans la littérature scientifique. Diverses grilles d'évaluation sont ensuite appliquées, menant le plus souvent à des recommandations en termes de gestion et de suivi. Parfois, la compréhension des systèmes écologiques en jeu est trop imparfaite et il est nécessaire de réaliser une nouvelle boucle diagnostique en enrichissant les données descriptives. Les actions de gestion réalisées, incluant celle de la libre évolution, peuvent faire l'objet d'un suivi qui constituera une part de la description d'une future boucle diagnostique, à échéance d'un plan de gestion ou en cas de changements importants, par exemple.

tourbe et le réseau hydrographique; la caractérisation des unités écologiques; celle des sols; etc. En règle générale, les données inhérentes à ce pôle sont relativement simples à acquérir et analyser. Le pôle transferts concerne un ensemble de données propres au processus d'échange de matière entre les différents compartiments du système et entre le système et l'extérieur. Les matières considérées sont principalement l'eau, les éléments minéraux (Ca et Mg), les éléments trophiques (N, P et K) et les particules minérales et organiques. Les processus en jeu montrent le plus souvent une variabilité

spatiale et temporelle qui rend difficile la collecte et l'analyse des données. La prise en charge de ce volet gagne donc à s'appuyer sur une bonne analyse de la structure, pour rendre le plus efficient possible le protocole. Le dernier pôle correspond à l'analyse diachronique de la structure et des transferts, il correspond donc à la caractérisation des variations dans le temps des deux premiers pôles. Les données propres à ce volet sont de nature historique (photographies aériennes incluses) ou paléoenvironnementale (palynologie, macrorestes, etc.).

**D**ans le cadre du pré-diagnostic du complexe tourbeux de Vireennes, les données acquises sont des épaisseurs de sédiments meubles estimées à la perche métallique, cinq sondages pédo-paléoécologiques de terrain réalisés au carottier russe ou à la gouge, et des pointages d'éléments fonctionnels majeurs comme des émergences.

**A**cela s'ajoute : l'analyse de la carte des unités écologiques fournie par le Parc ; la prise en compte des données de relief, de géologie, de géomorphologie à travers des sources existantes ; l'analyse des photographies aériennes anciennes et d'autres sources de documentation fournies par le Parc.

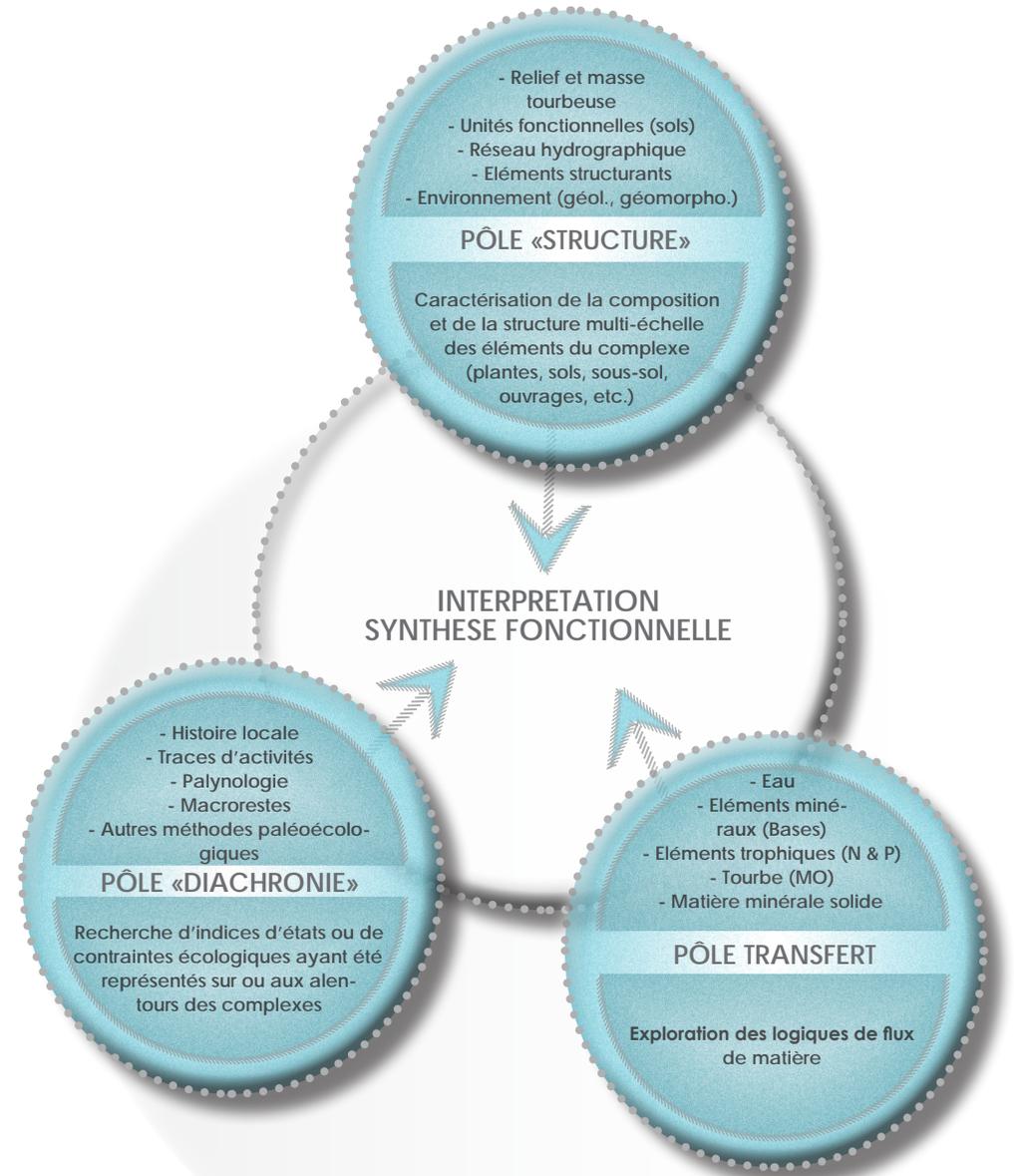


Figure II-1-2 : les 3 pôles du diagnostic avec les corps de données relatifs à chacun. Chacun des éléments des pôles, fait l'objet de protocoles clairement définis. La synthèse fonctionnelle et les évaluations et préconisations sont sensées faire aussi l'objet de protocoles stricts, mais ceux-ci sont encore peu développés des points de vue conceptuel et opérationnel.

## II.2 - Relief et dérivées

L'eau joue un rôle majeur dans le fonctionnement des tourbières, non seulement parce que l'engorgement des sols constitue une contrainte adaptative majeure pour les organismes vivants, ce qui génère une biodiversité spécialisée, mais aussi parce que l'eau constitue le vecteur principal des nutriments, principal paramètre écologique de structuration des communautés de zone humide.

Or, les écoulements sont fortement dépendants du relief, en particulier pour ceux qui se réalisent en surface.

De nos jours, le relief est principalement abordé à travers des modèles numériques de terrain (MNT) dont le fichier cœur est constitué d'une série de données de longitude (le «x»), de latitude (le «y») et d'altitude (le «z») pour un ensemble de points organisés en réseau régulier (la grille). La taille des mailles de la grille, la résolution planimétrique (en x et y), conditionne l'exploitation du MNT pour comprendre les logiques

d'écoulement, tout autant que la résolution altimétrique (en z) qui est généralement satisfaisante pour les usages les plus courants.

Le MNT est donc une représentation numérique du relief. Il peut être utilisé sous forme de dérivées à travers des modules de calcul pour générer, par exemple, des figures ombrées (figure II-2-1), des réseaux hydrographiques théoriques (figure II-2-2), des limites de bassins versants, des cartes de pentes, etc. Les MNT permettent également de réaliser des profils topographiques de manière très simple et rapide (figure II-2-1), sans la mise en place de méthodes de terrain de géomètre, comme cela était nécessaire dans le passé.

Les logiciels que nous utilisons pour travailler sur le relief et ses dérivées sont principalement QGIS (<https://www.qgis.org/fr/site>) et SAGA GIS (<http://www.saga-gis.org/en/index.html>).

**Pour cette étude sur le complexe tourbeux de Vireennes, nous avons travaillé avec le MNT à 1 m du RGE de l'IGN qui dérive d'un levé lidar sur une partie du secteur.**

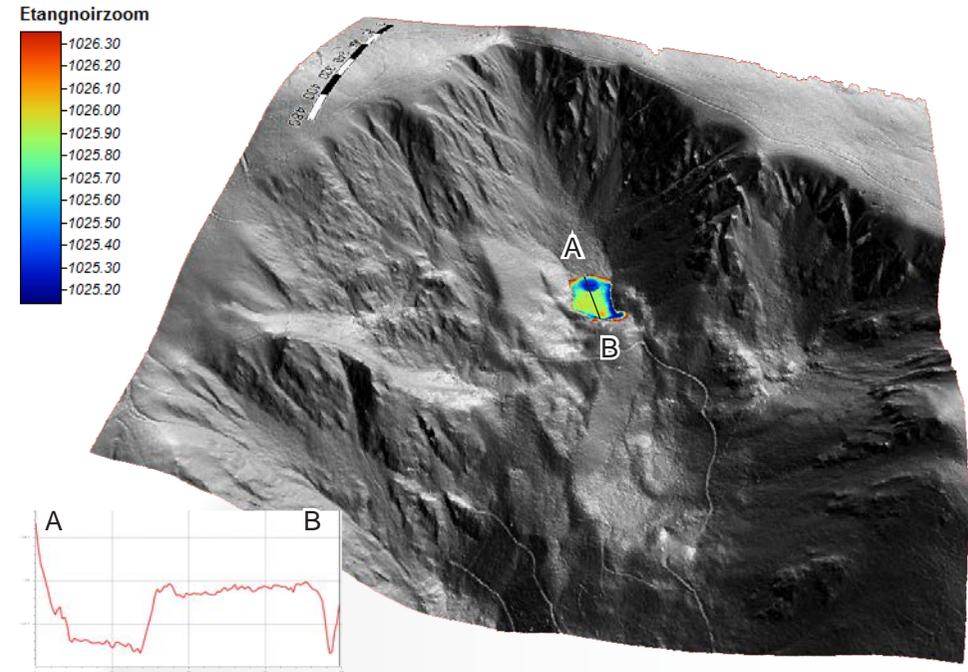


Figure II-2-1 : représentation du relief sous forme ombrée (en gris) et sous forme colorée (zone humide seulement) à partir d'un MNT de maille 1 m (CIGAL-IGN). En bas à droite, profil topographique issu du même MNT et représentant le relief en coupe du point A au point B.

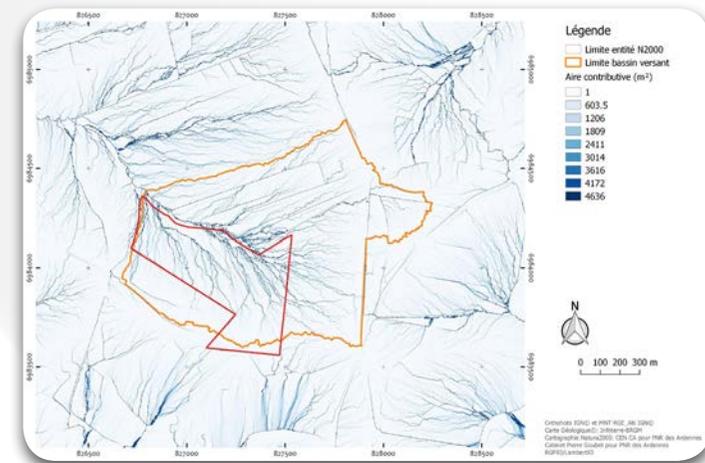


Figure II-2-2 : modélisation des écoulements de surface à partir d'un MNT de maille 1 m (IGN).

## II.3 - Géologie et géomorphologie

En tourbières, les communautés végétales s'organisent en fonction de la disponibilité des nutriments, suivant des logiques biogéochimiques complexes. De plus, la nature physico-chimique des eaux est dépendante des roches et des formations superficielles dans lesquelles s'effectuent les écoulements.

Dans ce cadre, la compréhension des écoulements souterrains est fondamentale, en particulier pour les tourbières qui dépendent des eaux de nappe. Ceci fait de l'analyse géologique et géomorphologique un volet déterminant pour la compréhension des logiques d'écoulement et, par conséquent, plus largement pour décrypter le fonctionnement des tourbières, prioritaire dans le diagnostic fonctionnel.

L'analyse géologique, et dans une moindre mesure l'analyse géomorphologique, découle d'une approche descriptive longue et cumulative, sur des objets peu changeants. Les principales ressources de données géologiques sont bibliographiques au sens large, intégrant

**D**ans le cadre de cette étude, nous avons travaillé à partir des cartes géologiques d'Arzac et d'Ambert et de leurs notices. Nous y avons ajouté quelques observations de terrain et des données bibliographiques plus générales.

des documents non publiés (thèses, mémoires d'étude, rapports de sondages, etc.), des bases de données et surtout des cartes, qui constituent le plus souvent la ressource essentielle. Une partie de l'information est regroupée sur le site Infoterre (<http://infoterre.brgm.fr>) du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), dont les cartes (figure II-3-1).

Ces cartes, et d'autres informations géologiques et géomorphologiques sont disponibles sur SIG via des protocoles de consultation internet (flux WMS) et peuvent de ce fait être croisées avec diverses données spatiales comme le relief (figure II-3-2).

Le but ultime de l'analyse géologique et géomorphologique est d'élaborer des modèles d'écoulements (figure II-3-3) et de flux nutritionnels permettant à la fois de comprendre le fonctionnement des tourbières et les moyens de les conserver.

Les modèles hydrogéologiques sont souvent validés par des études piézométriques.

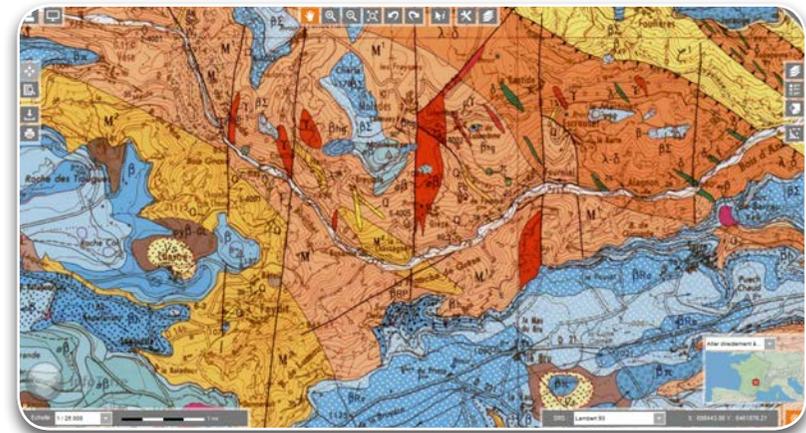


Figure II-3-1: page de consultation des informations géologiques sur le site spécialisé du BRGM (<http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do>).

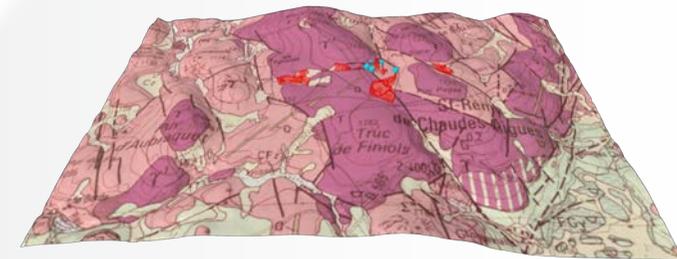


Figure II-3-2: usage des fonds de cartes géologiques à travers un flux WMS sur logiciel SIG. Ici, l'information géologique est croisée avec le relief et le contour des édifices tourbeux.

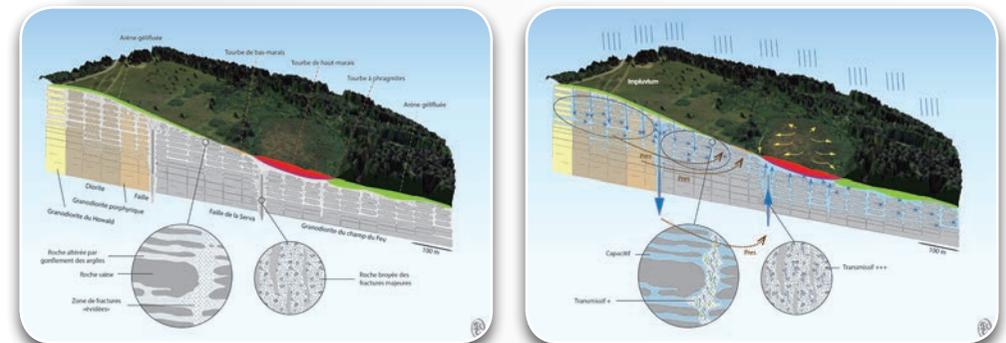


Figure II-3-3: exploitation à des fins de modèle hydrogéologique et fonctionnel des données géologiques. Le relief, la structure géologique et l'altération des roches conditionnent les écoulements qui eux-même conditionnent la présence des différentes tourbières.

## II.4 - Caractérisation des épaisseurs de tourbe

La présence de tourbe, l'épaisseur du dépôt, et plus généralement la forme de l'édifice tourbeux constituent des informations essentielles à la compréhension du fonctionnement actuel ou passé d'une tourbière. Cette information basique est utile lors de la définition des enjeux et du temps de travail sur les investigations pédologiques et paléoécologiques.

L'estimation des épaisseurs de tourbe est le plus souvent réalisée à la perche métallique (figure II-4-1). Il s'agit d'enfoncer une tige métallique verticalement dans le sol jusqu'à ressentir une résistance supposée correspondre au socle minéral sous la tourbe. Chaque point estimé est pointé au GPS à précision pluri-métrique et intégré à une couche SIG.

Les mesures à la perche sont susceptibles de contenir des erreurs liées à l'existence de tourbes

compactes ayant le même comportement que des argiles meubles, ou dans le cas de sédiments lacustres qui se comportent comme de la tourbe. La comparaison des données de la perche et de celles du carottier russe permet de valider les mesures d'épaisseur.

Il existe d'autres méthodes de caractérisation des épaisseurs de tourbe comme celles du radar géologique ou la résistivité électrique, mais l'usage de ces outils reste réservé à des problématiques spécifiques.

**P**our ce travail, la caractérisation des épaisseurs de tourbe n'a été réalisée à la perche métallique que sur une petite partie de site.

Les données de sondage à la perche sont intégrées dans un SIG et peuvent être restituées suivant différentes modalités: simples cartes (figure II-4-2), coupes ou profils (figure II-4-3) ou sous forme de dérivées comme des cartes d'altitude du socle rocheux sous la tourbe (figure II-4-4), permettant de comprendre le cadre topographique avant la mise en place de la tourbière.

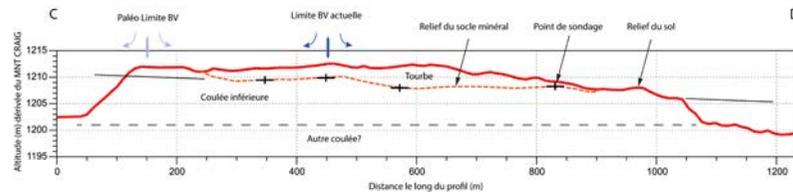


Figure II-4-4 : utilisation des données d'épaisseurs de tourbe en coupe, croisées avec un MNT à 10 m (CRAIG).

Figure II-4-2 : épaisseurs de tourbe sur fond photographique (CRAIG-IGN).



Figure II-4-1 : évaluation des épaisseurs de tourbe à la perche métallique.

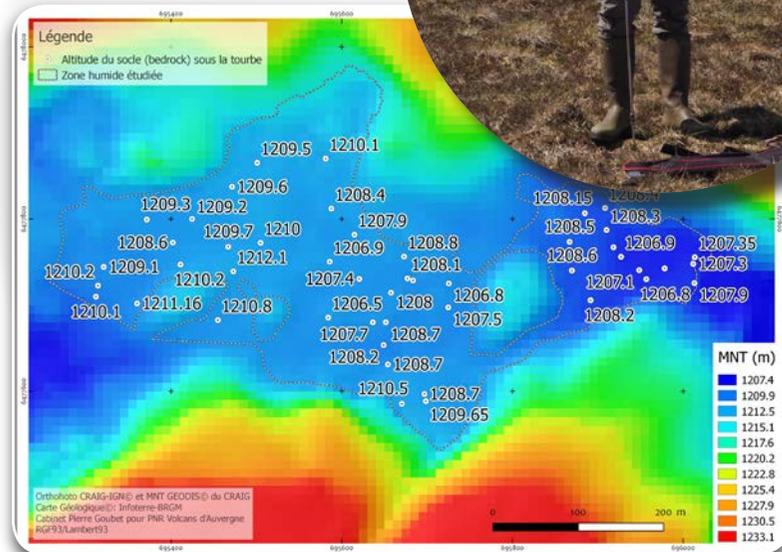


Figure II-4-3 : altitude du socle minéral sous la tourbe calculée à partir d'un MNT à 10 m (CRAIG).

## II.5 - Caractérisation pédo-paléocologique de terrain

La caractérisation de terrain des sols de tourbières et autres zones humides est basée sur une description de la couleur, de la texture et du contenu en éléments macroscopiques des différents horizons rencontrés dans les colonnes de sol prélevées. A cela s'ajoutent parfois des éléments complémentaires.

L'outil utilisé pour le prélèvement est, dans la tourbe, le carottier russe, dans les autres sols, différents types de tarières manuelles (tarière Edelman, tarière gouge) (figure II-5-1). Une fois extraites, les carottes sont étudiées directement sur le terrain. Pour valider les observations à la loupe, des échantillons sont prélevés et stockés dans des sachets plastiques, numérotés et référencés en fonction du sondage et de leur place dans celui-ci (la profondeur à laquelle il a été trouvé). Ces échantillons sont ensuite analysés à la loupe binoculaire ou au microscope, la plupart du temps

**D**ans le cadre de cette étude, cinq sondages au carottier ont été réalisés dans le temps imparti.

suivant le même protocole que celui de l'analyse des macrorestes à vocation conservatoire.

La localisation des sondages est enregistrée au GPS de précision pluri-métrique, les photographies des carottes dès leur extraction sont enregistrées également.

La restitution des résultats de ces descriptions de terrain se réalise à travers des schémas représentant des profils pédologiques lorsqu'ils ne sont épais que de 100-150 cm, ou des profils paléocologiques s'ils sont plus importants.

La réalisation de sondages allant du sol jusqu'au socle minéral sous la tourbe est un des objectifs du diagnostic ou du prédiagnostic, mais ce travail est long et il n'est pas toujours possible de dupliquer les informations.



Figure II-5-1 : le carottier russe (a), la tarière Edelman (b), la tarière gouge (c).

## Généralités sur les sols tourbeux

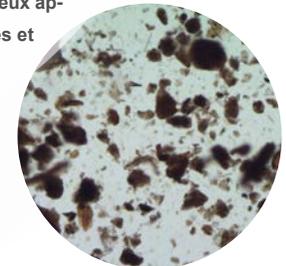
Le terme d'HISTOSOLS est proposé par les pédologues pour désigner les sols tourbeux, les sols constitués de tourbe, la tourbe étant définie comme un matériau contenant une forte part de matière organique d'origine végétale (part variable suivant les classifications).

Les horizons qui constituent les HISTOSOLS sont dits histiques, on les divise en trois types, un type fibrique où les fibres végétales sont dominantes, un type saprique, où les fibres sont absentes et où la matière organique est formée de fin débris qui tâchent les doigts, et un type mésique, qui contient les deux types à parts égales.

D'autres classifications s'appuient sur des notions de contenu en fibres et en microagégats, ces derniers étant des amas de matière organique suffisamment dégradée pour que la structure originelle ne soit plus visible. Ils résultent soit d'une dégradation initiale, dans les parties superficielles du sol (l'épisolum humifère), soit d'une dégradation de la tourbe au cours du temps (sur toute la colonne de tourbe sous l'épisolum humifère). Notre description simplifiée des tourbes tient compte des deux approches, avec la mention du pourcentage de fibres et le type de tourbe dans la série fibrique (Hf), mésique (Hm) et saprique (Hs).



Fibres dans la tourbe, ici une mousse.



Microagégats de matière organique.

## II.6 - Caractérisation des unités fonctionnelles

La connaissance de la répartition des communautés végétales sur un complexe humide permet de définir à la fois (1) l'enjeu patrimonial lié aux habitats, ce qui est généralement réalisé dans à la suite d'une cartographie par la plupart des botanistes, et aussi (2) les logiques écologiques à l'échelle du complexe, ce qui est rarement pris en compte.

Les communautés végétales de plantes vasculaires et de bryophytes (des mousses et des hépatiques) s'organisent suivant des logiques spécifiques. Chaque plante possède une niche écologique théorique qui dépend d'un ensemble de paramètres écologiques. Suivant les valeurs de ces différents paramètres en un endroit donné, un certain nombre de plantes sont susceptibles de pouvoir y vivre. Cependant, la composition et la structure des communautés ne dépendent

pas uniquement de ces paramètres théoriques, mais aussi de contraintes supplémentaires comme la capacité d'une plante à s'installer (présence de sources de propagation) ou l'état de la communauté au moment de l'arrivée d'une propagule. De plus, de nombreux processus entrent en jeu dans les relations entre les différentes plantes d'une communauté comme la compétition ou la facilitation. La niche d'une plante réalisée en un endroit donné, est donc souvent plus restreinte que sa niche théorique.

Ce concept de niche appliquée à une espèce peut être extrapolé à l'échelle des communautés végétales. Ainsi, la communauté présente à un endroit donné résulte, en grande partie, des conditions écologiques locales. On parle de déterminisme pour

signifier les paramètres les plus importants pour l'existence d'une communauté. Par exemple, certaines saulaies sont «déterminées» par des stocks ou flux de nutriments relativement importants, apportés par des ruisseaux. Elles se réalisent en l'absence de pâturage, autre élément «déterminant», au sens précis du terme en écologie.

Si les communautés végétales possèdent des déterminants écologiques, ces derniers ne sont pas toujours bien connus. Il existe beaucoup d'interprétations de déterminisme basées sur une approche naturaliste empirique et «classique», dans le sens où ces interprétations sont issues d'avis anciens, se répétant dans la littérature moderne, sans avoir été élaborée de manière détaillée. De ce fait, certaines de ces

propositions de déterminisme sont aujourd'hui amendées ou contre-dites par des observations, des faits ou des données récentes. Il s'avère,

en particulier, qu'une même communauté puisse être déterminée par de plus nombreux facteurs que ce qui est considéré habituellement.

Puisqu'une communauté végétale est déterminée par l'état des paramètres écologiques, on peut s'appuyer sur la communauté présente à un endroit donné pour définir l'état des paramètres écologiques à cet endroit. Par agrégation, sur la base de la logique spatiale de l'ensemble des unités d'un complexe, ce sont les conditions écologiques globales qui peuvent être définies. Il s'agit d'une forme de bio-indication, à l'échelle des communautés végétales.

C'est cette forme de données qui sera exploitée dans ce travail, à partir de sources existantes sous forme de couches SIG fournies par le commanditaire, complétées de quelques apports basés sur les observations de terrain.

**P**our cette étude sur le complexe tourbeux de Virenes, nous avons bénéficié des couches SIG d'une cartographie réalisée par P.-E. Mulot du CBNMC de 2006 fournie par le commanditaire et d'une étude des Herbiers de Clermont-Ferrand de 2017.

## II.7 - Photographies aériennes anciennes

Des photographies aériennes anciennes de l'Institut géographique national (IGN) sont disponibles en ligne à travers un site de consultation et de téléchargement spécialisé (<https://remonterletemps.ign.fr>).

Nous téléchargeons l'ensemble des clichés de qualité significative et utilisons ceux qui mettent en évidence des faits marquants, interprétables ou non.

Si besoin, certaines photographies sont calées sur un SIG mais non

orthonormées. Dans ce cas, les éléments de comparaison peuvent être légèrement décalés dans les figures.

Les principales informations qui peuvent être extraites des photographies aériennes anciennes sont : le réseau hydrographique à différentes époques; les émergences diffuses ou concentrées; les usages des différentes parcelles; les périodes d'aménagement; et la colonisation ligneuse.

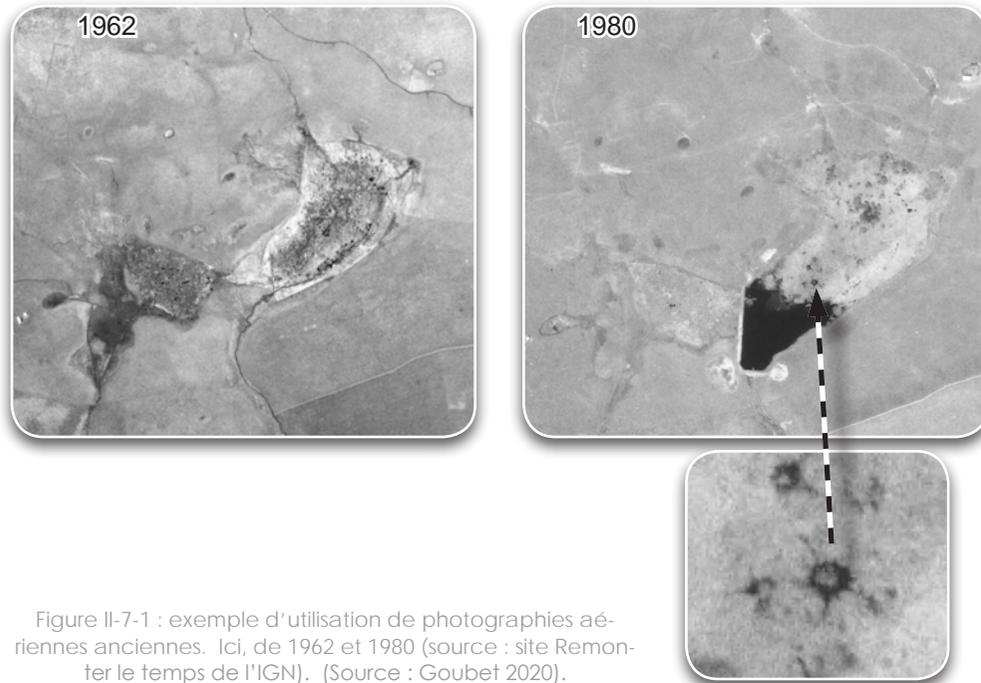


Figure II-7-1 : exemple d'utilisation de photographies aériennes anciennes. Ici, de 1962 et 1980 (source : site Remonter le temps de l'IGN). (Source : Goubet 2020).

## II.8 - Synthèse fonctionnelle et recommandations

La synthèse fonctionnelle correspond à la démarche d'élaboration des modèles de fonctionnement des unités fonctionnelles d'un complexe. Elle opère donc à des échelles spatiales variées, de l'unité fonctionnelle élémentaire (une butte à sphaignes, une mosaïque de buttes et de dépressions, une moliniaie, une saulaie) au complexe pris dans son ensemble. Elle opère aussi à des échelles temporelles distinctes, en définissant les grandes étapes de construction et de destruction de la tourbe, sur des échelles spatiales variables, en fonction des moyens mis en place pour le diagnostic.

L'ensemble des unités fonctionnelles ne fait pas l'objet d'une synthèse détaillée; seules les unités clés sont traitées.

Le plus souvent, le fonctionnement des unités a déjà été décrit par ailleurs, dans la littérature scientifique officielle ou dans la littérature non publiée. Cela est surtout vrai pour les unités de rang inférieur, plus rarement à l'échelle des complexes.

A chaque échelle, notre démarche tient principalement dans la comparaison des données disponibles avec des modèles préexistants. Cependant, parfois, les données n'entrent en résonance avec aucun modèle connu et il nous faut proposer un nouveau modèle,

avec dans ce cas une recommandation sur des processus de validation.

Avant même le recours aux modèles de fonctionnement disponibles, nous réalisons la description et des analyses spécifiques à chaque corps de données, correspondant aux sous-parties précédentes (relief, épaisseurs de tourbe, sols, unités écologiques, etc.), dans la partie dédiée aux résultats. Sauf cas particulier, dans la partie qui traite de la synthèse, nous comparerons les différents corps de données entre eux, pour mettre en évidence des logiques spécifiques.

L'analyse des faits et leur interprétation est donc réalisée soit dans la partie résultats, à un niveau «élémentaire», soit dans la partie synthèse fonctionnelle, de manière plus intégrée. Nous recommandons donc de prendre connaissance des deux parties pour intégrer l'ensemble des interprétations proposées.

La synthèse fonctionnelle sert de base à la définition des «recommandations», ou plus précisément des propositions en termes d'actions de connaissance, de gestion ou de suivi. Souvent, ces propositions sont présentées dans un tableau récapitulatif.

# III. Résultats



### III.1 - Contexte

Les tourbières objets de ce travail de prédiagnostic se situent dans une entité Natura 2000 dont l'état et la dynamique ont été résumés ainsi par le PNR Livradois-Forez dans son document de consultation :

«Le site Natura 2000 « Complexe tourbeux du Haut-Livradois : tourbière de Virennnes » est situé en Auvergne, dans le département du Puy-de-Dôme, dans le périmètre du territoire classé Parc naturel régional Livradois-Forez (PNRLF), sur la commune du Monestier. Le syndicat mixte du PNRLF est la structure porteuse de l'animation du document d'objectifs de ce site Natura 2000.

Le complexe tourbeux de Virennnes se présente sous la forme d'une mosaïque d'habitats comprenant une tourbière acide à sphaignes au sein d'une sapinière acidiphile ancienne constituant le bassin versant.

Ce site abrite 8 habitats d'intérêt communautaire (inscrits à l'annexe 1 de la directive Habitats) dont 3 tourbeux : « 7110\* tourbières hautes actives », « 7140 tourbières de transition et tremblantes », « 91 DO\* tourbières boisées ».

Les enjeux de ce site inscrits dans

son document d'objectifs sont les suivants : (1) assèchement lié à des aménagements hydrauliques anciens ; (2) pratiques sylvicoles et enrésinement à maîtriser ; (3) fermeture des milieux ouverts (déprise du pastoralisme et des pratiques de fauche) ; (4) excès de fertilisation des milieux ouverts.

Des suivis phytosociologiques réalisés en 2009, 2012 et 2017 ont permis d'évaluer l'état de conservation des habitats naturels et indiquent une évolution favorable des habitats, grâce à une non-intervention humaine depuis plus de 50 ans sur ce site et la poursuite d'une dynamique naturelle. Toutefois, la présence de drains et l'évolution du climat avec des sécheresses répétées conduisent à étudier plus précisément la fonctionnalité de la tourbière dans une optique de préservation des habitats et espèces associés et de la ressource en eau.»

Sur la base de la cartographie d'habitats disponible, les tourbières de Virennnes se définissent comme un méta-complexe situé sur les versants d'un relief en forme d'arc ouvert vers l'est et le nord (figure III-1-1). Les différents complexes s'échelonnent de 1090 à 1140 m d'altitude, dans un contexte boisé, en particulier en plantation d'épicéas.

La structure des différents complexes montre une différence entre une partie nord-est occupée par une série de petits complexes plus ou moins

connectés et une partie sud-est apparaissant occupée par une grande unité unique.

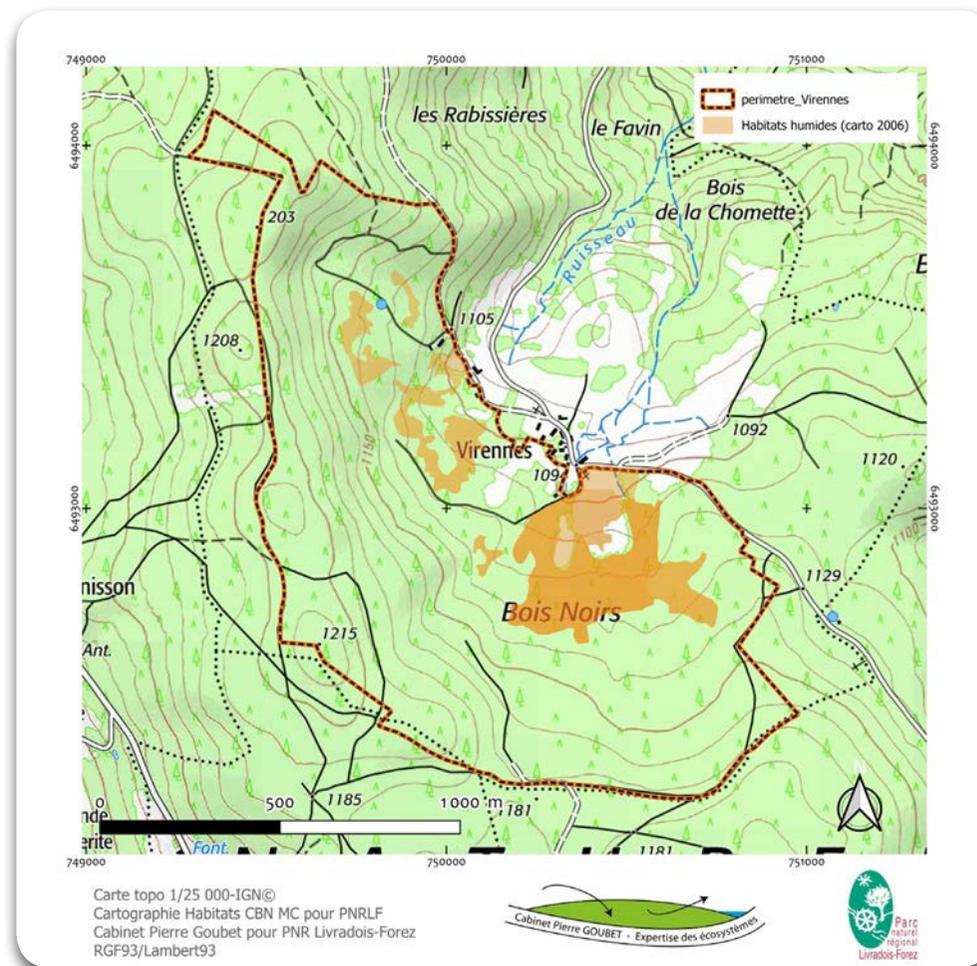


Figure III-11-1 : localisation des zones humides sur fond de carte IGN topo 1/50 000.

### III.2 - Géologie et géomorphologie

D'après la carte géologique à 1/50 000 du BRGM, le méta-complexe tourbeux de Virenesse se situe sur un substrat rocheux métamorphique

gneissique (figure III-2-1). Des colluvions d'origine gneissique ou granitique sont également indiquées pour une partie des complexes.

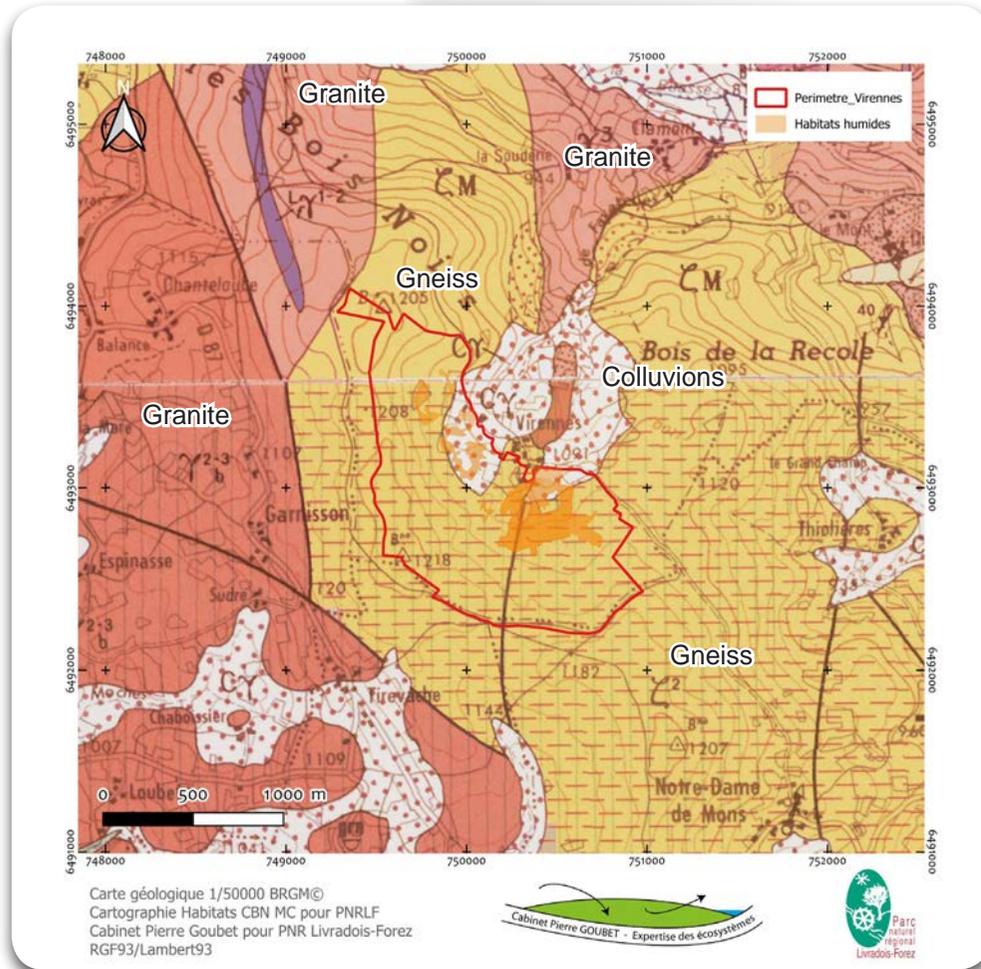


Figure III-2-1 : cadre géologique du complexe tourbeux de Virenesse sur fond de carte géologique (source BRGM).

Sur la carte, certains contacts des gneiss avec les granites environnants correspondent à des failles ; les gneiss n'apparaissent pas fracturés, à l'exception d'une faille méridienne passant par le hameau de Virenesse, représentée comme verticale. En réalité, l'analyse du MNT fin met clairement en évidence une fracturation des gneiss importante suivant des plans de pendage

autour de 30° vers le sud-est (120°), en rouge-noir sur la figure (figure III-2-2), et suivant une autre direction d'orientation ouest (280°), d'une trentaine de degrés de pendage et représentée par des couleurs bleu-mauve. Cette dernière direction est indiquée dans la carte d'Ambert, mais avec un pendage plus important, approchant la verticale.

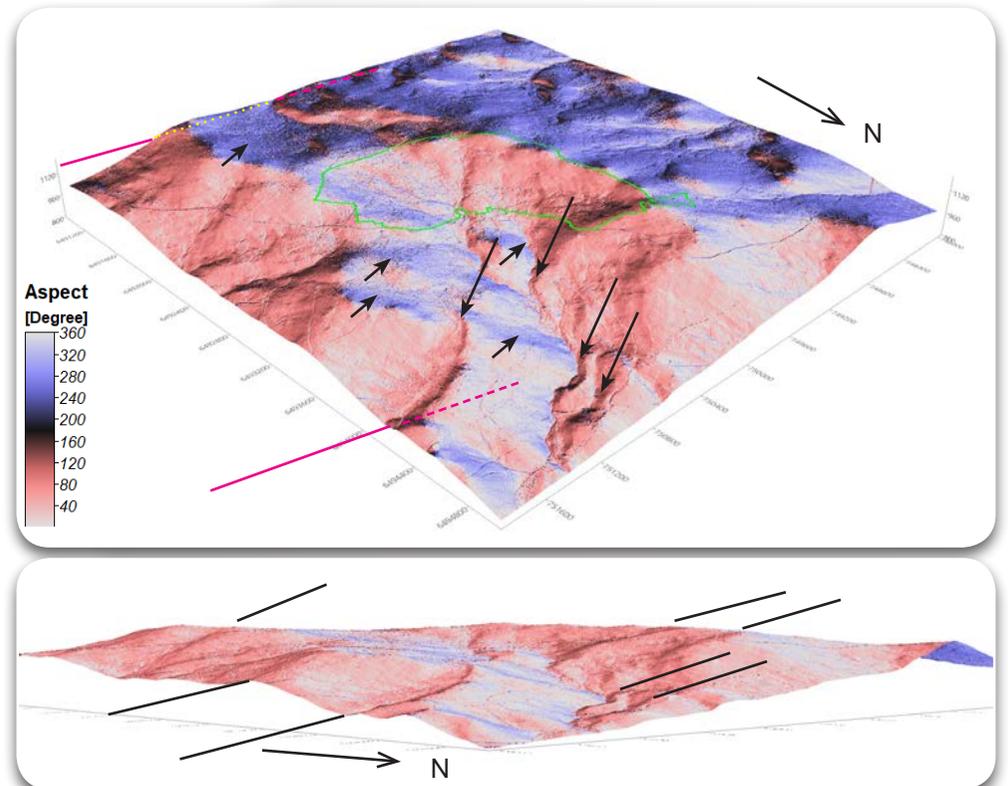


Figure III-2-2 : modélisation des directions des pentes à partir du MNT à 1 m du RGE de l'IGN mettant en évidence les plans de failles majeures. Le relief n'est pas ici exagéré.

Cette fracturation s'exprime en particulier par des talus en série visibles principalement sur les versants orientés vers l'est, comme le montre la carte des pentes et les coupes interprétatives qui peuvent être générées sur la base du

MNT et de l'interprétation géologique (figure III-2-3).

Il faut ainsi imaginer la fracturation des gneiss comme celle présentée sur la photographie 3D de gneiss

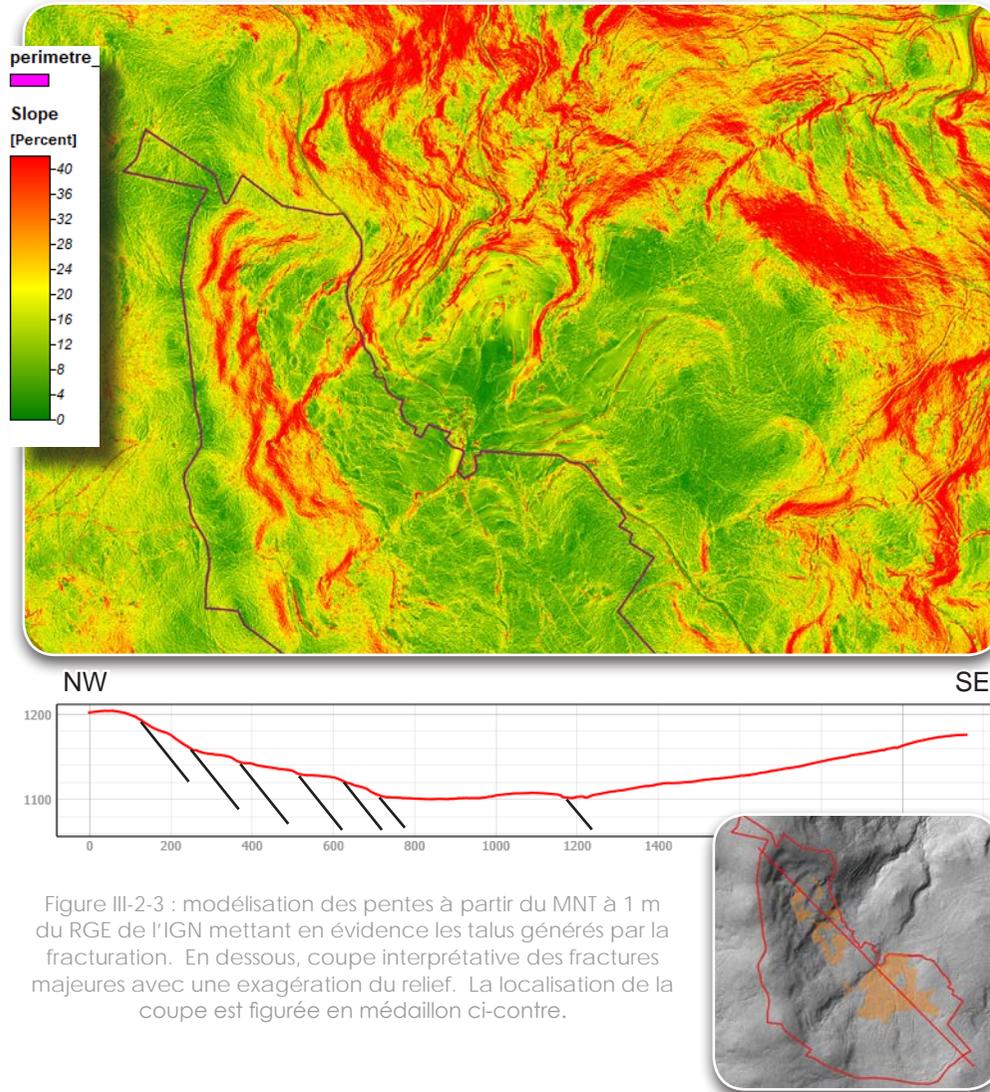


Figure III-2-3 : modélisation des pentes à partir du MNT à 1 m du RGE de l'IGN mettant en évidence les talus générés par la fracturation. En dessous, coupe interprétative des fractures majeures avec une exagération du relief. La localisation de la coupe est figurée en médaillon ci-contre.

norvégiens issu de Google Earth (figure III-2-4). Il s'agit ici de roches découpées par un glacier récent qui contrastent avec celle de Vireennes où les formations superficielles masquent une partie de la structure tectonique. La photo montre également que la fracturation des gneiss correspond en partie à des plans de foliation de la roche, ce qui génère des ondulations (non présente dans notre cas auvergnat). Elle montre aussi le rôle de la fracturation dans la disponibilité de sols plus exploitables pour la végétation, en lien avec la texture et les écoulements.

Nous verrons plus loin que cette structure contrôle en grande partie les écoulements souterrains du compartiment gneissique de Vireennes.

Un rapport d'étudiants de master de l'Université de Saint-Étienne fourni par le Parc (Brenas *et al.*, 2010) propose que la forme en cirque des versants du site soit issue d'un névé périglaciaire. Le MNT met en lumière d'autres formes qui rendent peu probable cette origine. C'est en particulier l'absence de rempart à l'aval du site qui nous fait exclure cette hypothèse.



Figure III-2-4 : exemple de fracturation dans des gneiss mis à nue par érosion glaciaire en Norvège. On observe en particulier deux plans de fractures dont un correspond à une foliation majeure de la roche et prend donc une forme ondulée. L'autre, plus classique, est plan.

### III.3 - Données pédologiques

Les mesures d'épaisseurs de sédiments meubles n'ont pas dépassées 190 cm et se situent le plus souvent entre 50 et 100 cm (figure III-3-1).

Les épaisseurs les plus fortes correspondent à des dépressions du substrat rocheux mais aussi à des

bombements de tourbe.

La taille du site et les conditions météorologiques du jour de visite n'ont pas permises de procéder à de nombreux sondages pédologiques. Nous en avons réalisés 5 (figure III-3-2), dont deux rapidement (S3, S4) pour

validation du modèle pressenti.

Les sondages S1 et S5 ont été réalisés dans des secteurs d'émergence semi-concentrée. Ils révèlent le contraste entre des horizons supérieurs de tourbes fibriques, non prélevables car trop lâches, et des horizons

inférieurs, compactes, plus ou moins riches en fibres de plantes minérotophiles. Cette structure est typique des secteurs de source en phase d'abandon pastoral. L'arrêt du pâturage a ainsi permis de passer d'une tourbe piétinée, mise à nu, à un horizon de sphaignes et cypéracées «frais», envahissant la

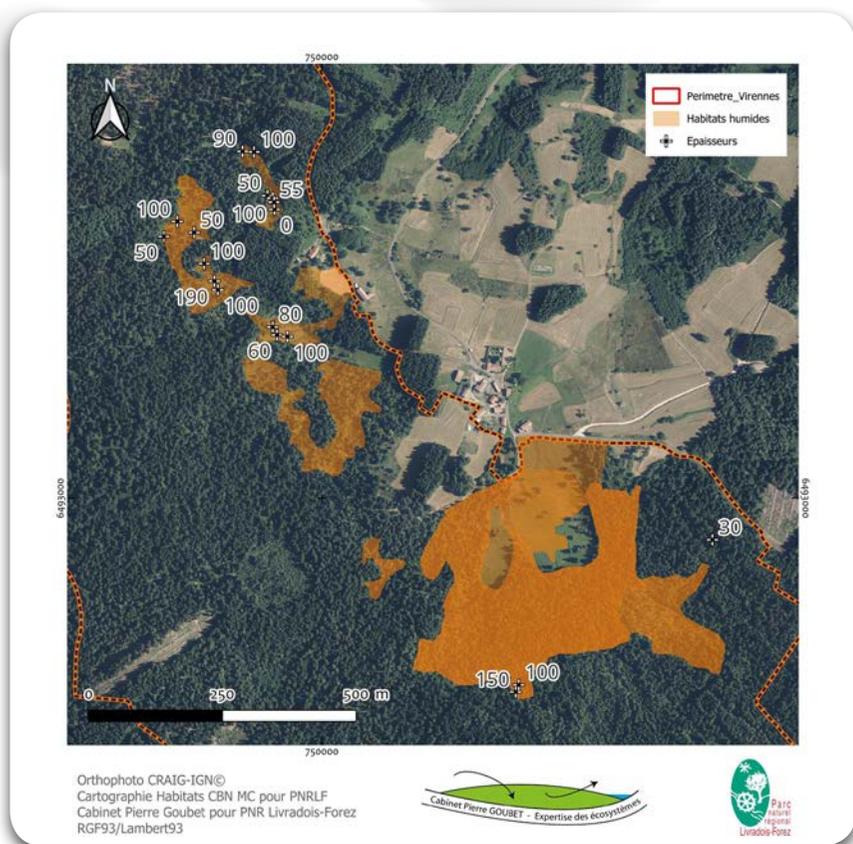


Figure III-3-1 : localisation des épaisseurs de tourbe acquises lors de l'étude sur fond ortho-photographique (source CRAIG-IGN).

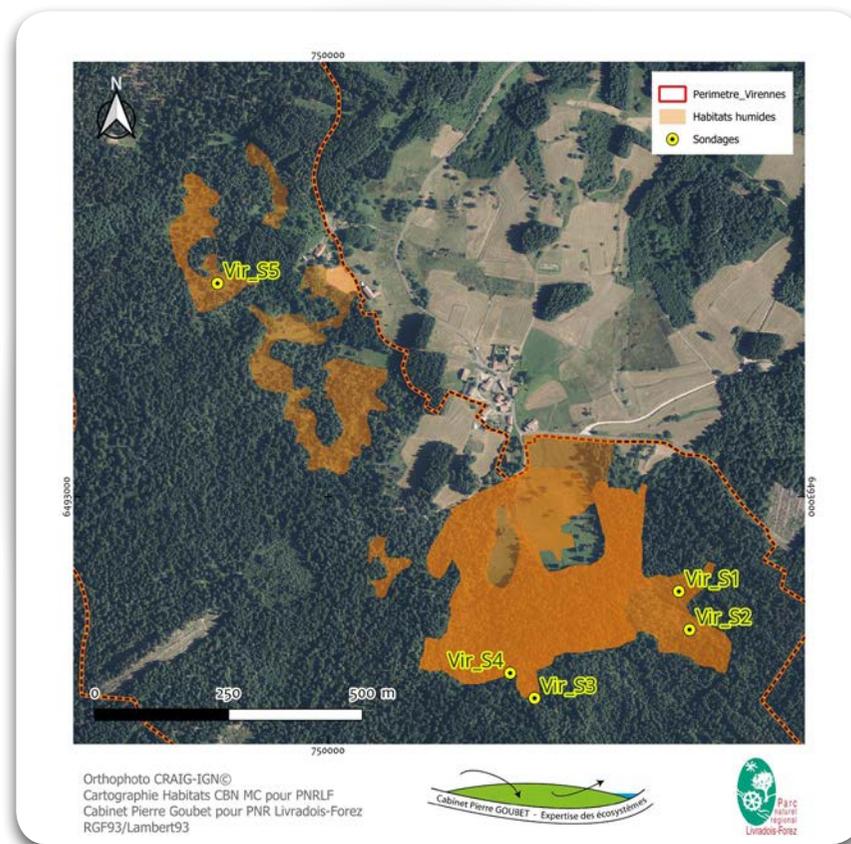


Figure III-3-2 : localisation des sondages pédologiques sur fond ortho-photographique (source CRAIG-IGN).

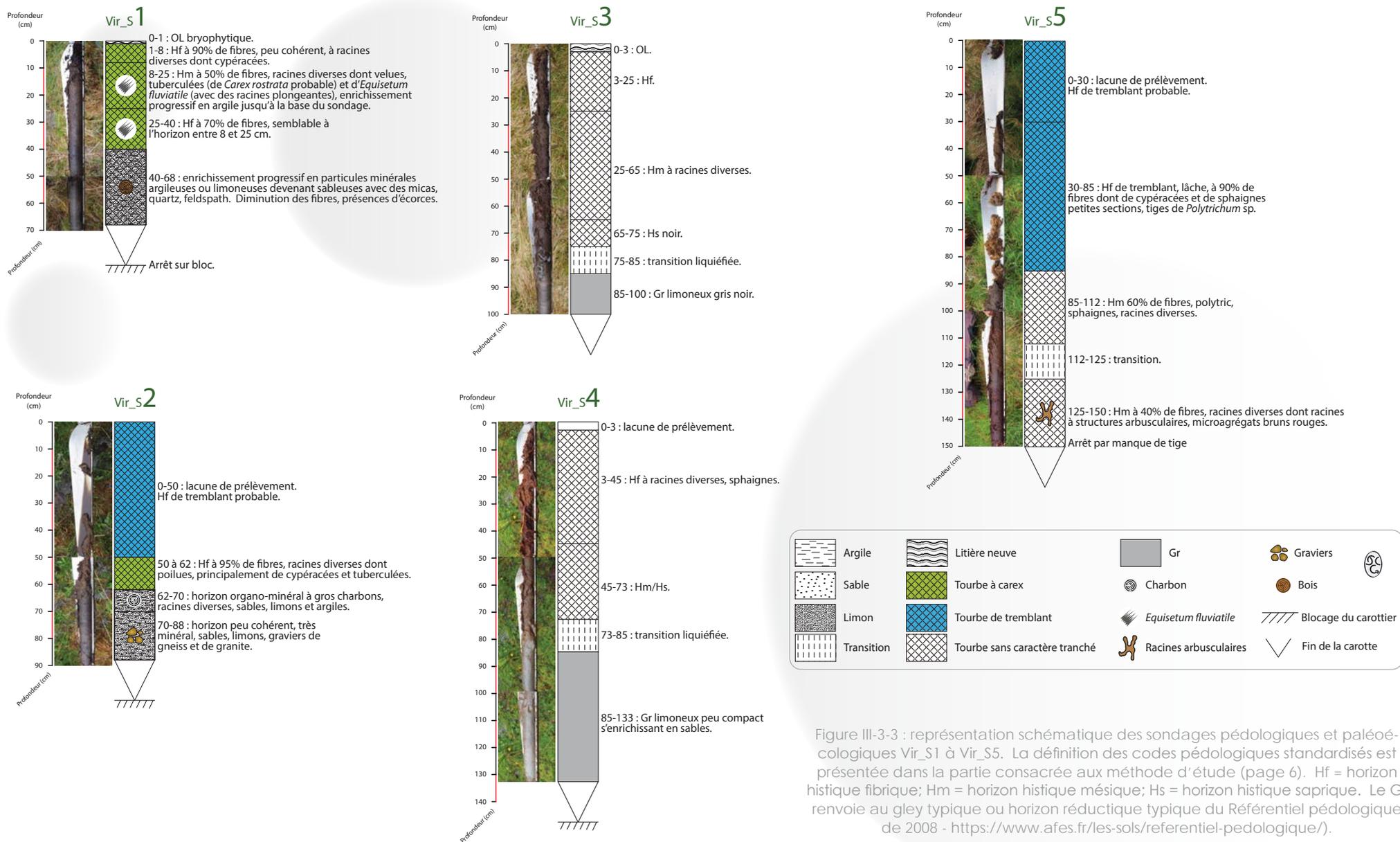


Figure III-3-3 : représentation schématique des sondages pédologiques et paléoécologiques Vir\_S1 à Vir\_S5. La définition des codes pédologiques standardisés est présentée dans la partie consacrée aux méthodes d'étude (page 6). Hf = horizon histique fibrique; Hm = horizon histique mésique; Hs = horizon histique saprique. Le Gr renvoie au gley typique ou horizon réductique typique du Référentiel pédologique de 2008 - <https://www.afes.fr/les-sols/referentiel-pedologique/>.

lame d'eau issue de l'émergence.

Les trois autres sondages, réalisés en dehors des contextes d'émergence semi-concentrée, montrent des profils de structure proche, où un horizon de surface fibrique surmonte des horizons mésiques ou sapriques, posés sur des gleys limoneux ou sableux. Le passage entre les gleys et la tourbe se réalise deux fois sur trois à travers une transition liquéfiée.

Cette structure évoque une remise en place «récente» de la turfigenèse représentée ici par les horizons fibriques de surface, sur des horizons plus anciens. Il pourrait s'agir d'un cas classique de reprise turfigène post-pastorale. Cependant, dans la plupart des cas, la tourbe ancienne est clairement dégradée, tassée, formant un horizon spécifique nommé kultureller Trockenhorizont (KTH), ce qui n'apparaît pas ici à Vireennes. Il est donc probable que l'intensité du pâturage à Vireennes n'a pas été suffisant pour générer un KTH.

Une autre hypothèse serait que l'arrêt pastoral ne soit pas à l'origine de la reprise turfigène, qui découlerait plutôt d'une modification des régimes d'émergence avec une remontée de la charge hydraulique suite à des niveaux de nappe rocheuse plus hauts.

Cependant, la nature abrupte de la transition entre les deux types de tourbe n'est pas en faveur de cette hypothèse, sachant également que de nombreux indices de pâturage sont connus.

La dernière hypothèse envisageable est celle d'une déprise pastorale en deux temps, avec un premier temps permettant la mise en place de la tourbe ancienne sur des sols minéraux ou tourbeux caractérisés ici par des horizons noirs sur le S2 et le S3, suivi d'une remise en place ou d'une intensification du pâturage avant le dépôt des tourbes de surface fibriques. Cette hypothèse n'est cependant pas conforme au profil S5 qui ne présente pas de KTH, mais qui montre dans sa partie basse des tourbes apparaissant typiquement forestières avec leur richesse en bois, la couleur brun-rouges des microaggrégats et la présence de racines à structures arbusculaires souvent associées aux ligneux, que nous pensons très anciennes, pré-pastorales.

En outre, ces structures dérivant de la symbiose avec un champignon du genre *Cenococcum* (figure III-3-4) indiquent des phénomènes d'assèchement des tourbes dans un passé lointain, possiblement pré-pastoral. Dans un modèle d'émergence, cela indique

black hyphae or seta radiating from the ECM surface (Fig. 12.1). The degree of setae emanating from the mantle surface can vary from sparse (Fig. 12.1A,B) to profuse (Fig. 12.1C-E). The mantle is generally 20–30 μm thick, composed of large diameter, darkly pigmented hyphae (5–10 μm) near the surface, and smaller diameter, paler hyphae (2.5–4 μm) adjacent to the host's epidermis. Surface hyphae of the mantle characteristically consist of clusters of isodiametric cells surrounded by radiating bundles of elongate cells forming a stellate or cephalothecoid pattern (Trappe 1971; Hawkworth 1986;

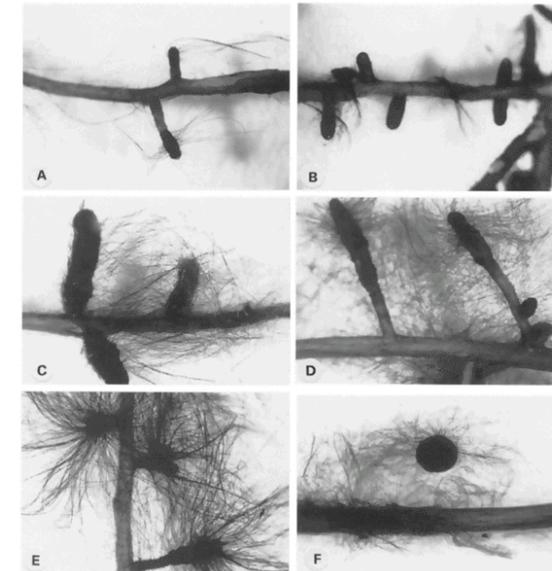


Fig. 12.1. ECM of *Cenococcum geophilum* in roots of 3-month-old seedlings of *Pinus resinosa*, synthesized in growth pouches. Presence of thick, dark, unbranched hyphae (seta) on root surface varies from limited: A isolate S8-1, ×13, and B isolate 349, ×13, to profuse: C isolate A181, ×13, D isolate CGGOLD, ×13, and E isolate WARR, ×13. F Sclerotium formed in growth pouch with mycorrhizae of isolate HUNT-6, ×13. (K. F. LoBuglio, unpubl. data; see LoBuglio et al. 1991 for origin of isolates)

Figure III-3-4 : photographie microscopique d'hyphes et de sclérotés de *Cenococcum geophilum* issues de Cairney, J. W., & Chambers, S. M. (Eds.). (2013).

une variation des hauteurs de nappes rocheuses comme il sera expliqué dans un chapitre ultérieur.

Le complexe de Vireennes a fait l'objet d'une analyse pédologique et topographique d'Hervé Cubizolle et de ses

étudiants de master à l'université de Saint-Étienne (Brenas *et al.*, 2010).

Ce travail a permis de lever des profils topopédologiques que nous reproduisons ici pour les analyser (figure III-3-5).

Les coupes montrent de manière claire le dépôt en nappe de versant de la tourbe, sur un substrat rocheux présentant des marches correspondant à la fracturation «molle» du gneiss. Il n'y a pas de dépression claire, l'ensemble du dépôt est donc soit issu d'un

processus d'émergence, soit d'un processus ombrotrophe, comme nous le présenterons plus tard.

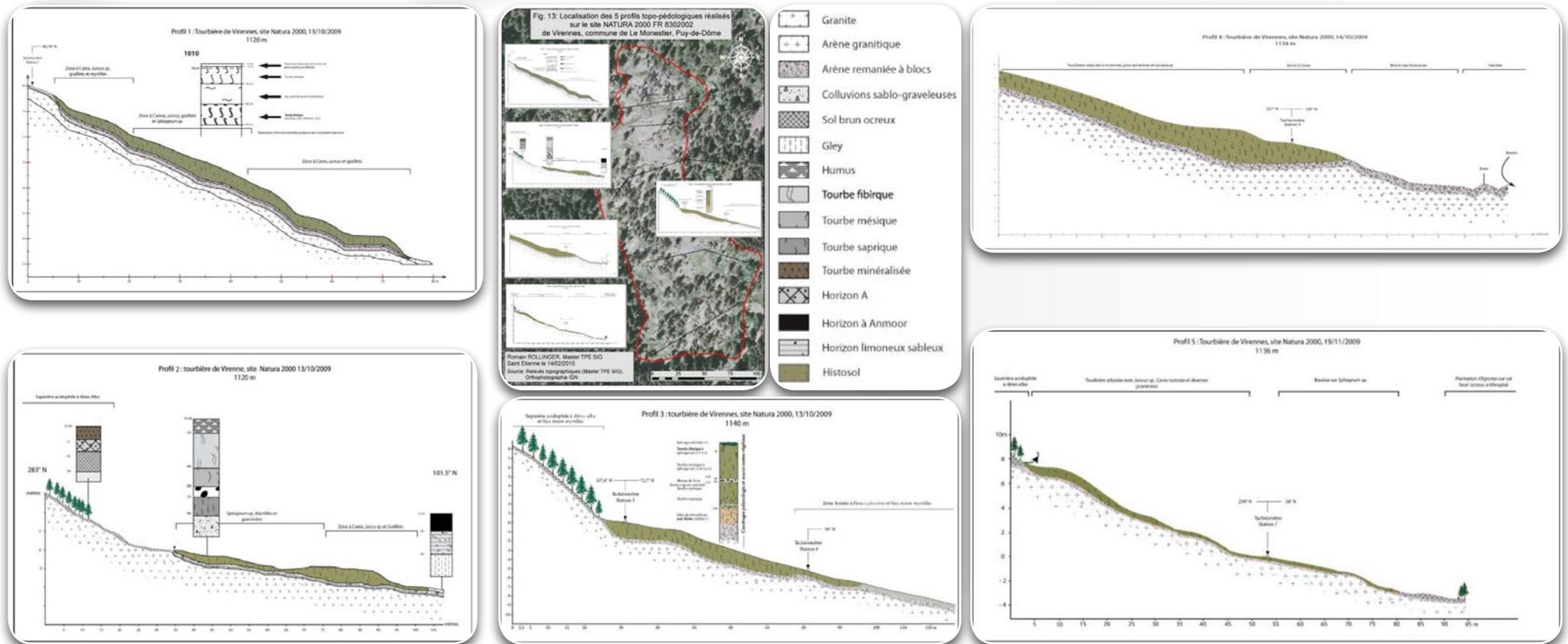


Figure III-3-5 : profils topopédologiques issus de Brenas *et al.*, 2010. La qualité du document original ne permet pas la lecture de détail. Les profils sont présentés pour leur représentation générale.

### III.4 - Unités écologiques

La définition des unités floristiques est une étape déterminante du travail de diagnostic, mais elle peut-être particulièrement difficile dans des contextes de variation à grande échelle (au sens strict, soit de petites surfaces) comme des mosaïques. De plus, les typologies existantes ne sont pas performantes dans toutes les situations. Des problèmes typologiques sont présents en particulier pour ce qui concerne les différents états post-pastoraux des tourbières comme à Vireennes.

Les données floristiques transmises par le Parc sont une cartographie d'habitats de 2006 reproduite dans la figure III-4-1 et un rapport des Herbiers universitaires (Thébaud, 2018) de 2017 synthétisant 3 campagnes de suivi.

Nos observations de terrain permettent également de définir les grands types fonctionnels présents.

La cartographie d'habitats a été structurée par son auteur en une couche de polygones de types dominants et une couche de polygones de types non

dominants avec des recouvrements possibles entre couche et au sein de la couche non dominants. Cette façon de faire exprime la nature mosaïquée des végétations et la difficulté de réaliser une cartographie satisfaisante.

L'unité dominante est identifiée comme des prairies à molinie acidiphile, largement réparties au nord et au sud. Une petite aulnaie est localisée au nord-est.

En dehors de quelques unités de la bordure est et nord du méta-complexe, les prairies à molinie sont mosaïquées de bois tourbeux à pins sylvestres, de buttes à sphaignes colorées et de tourbières de transition.

Sur la base de nos observations lors de la visite, ce choix typologique ne nous apparaît pas pertinent, ou tout du moins, il ne correspond pas à l'état actuel constaté. Nous reconnaissons néanmoins que faire entrer des objets réels dans une typologie où ils ne sont pas clairement présents est difficile, voire impossible.

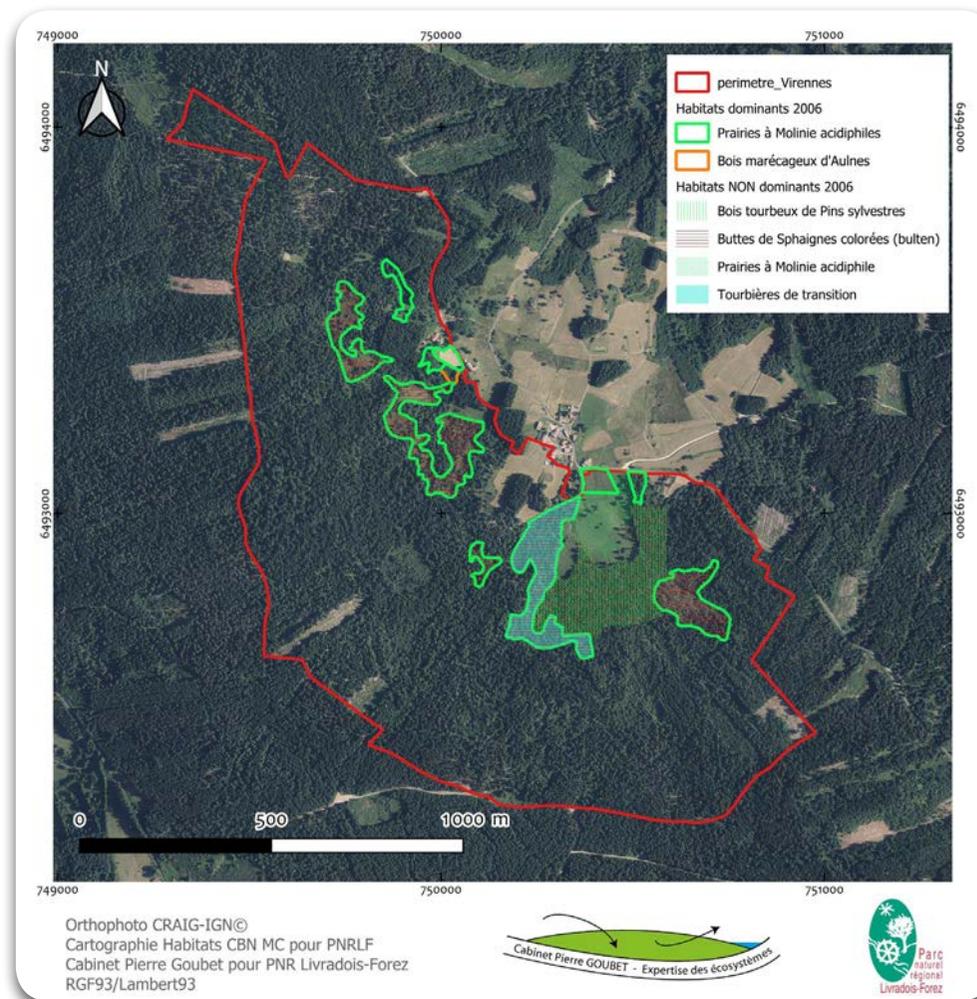


Figure III-4-1 : cartographie des habitats humides réalisée par le CBNMC sur fond orthophotographique CRAIG-IGN (explications dans le texte).

Pour les mêmes raisons de carcan typologique non approprié, l'approche des Herbiers universitaires est difficile à exploiter du point de vue fonctionnel, sans compter les erreurs d'interprétation proposées dans le document que nous détaillerons en partie plus tard.

Cependant, le travail des Herbiers rend compte de relevés floristiques qui constituent de la donnée exploitable que nous représentons ici pour l'analyser (figures III-4-2 et III-4-6).

Les espèces présentes partout sur le profil 1 des Herbiers sont en particulier le pin sylvestre, des sphaignes

vertes, dont *Sphagnum palustre*, le jonc acutiflore, la succise des prés, la molinie, la myrtille des bois et la tormentille.

De fait, la visite révèle la présence étendue de boulaies-pinèdes à sphaignes vertes (figure III-4-3) dont la dynamique apparaît exceptionnelle, avec des poussées de l'espèce sur divers substrats comme sur le tronc couché de la figures III-4-4 et III-4-5).

Au sein de ces boulaies s'individuent localement à plus ou moins forte densité des buttes et replats à sphaignes rouges (*Sphagnum rubellum*, *S. capillifolium*, *S. russowii* et localement *S.*



Figure III-4-3 : boulaie-pinède à sphaignes vertes.

Not relevé donné par l'auteur	2321	2322	2324	2326	2327
N° de point	0-1	1-3	3-5	5-7	7-8
Relevé area (m2)	2x20	2x10	2x20	2x15	2x5
Rec. totale (%)	100	100	100	100	100
Rec. strate arborée (%)	15	5	20	5	30
Rec. strate arbustive (%)	10	5	15	5	0
Rec. strate herbacée (%)	50	40	55	100	35
Rec. strate bryo (%)	90	100	95	40	85
<b>arbres arbustives (A, a, h)</b>					
<i>Pinus sylvestris</i> a	■				
<i>Betula pubescens</i> h	■				
<i>Picea abies</i> A	■				
<i>Juniperus communis</i> L. subsp. communis		■			
<i>Pinus sylvestris</i> A	■		■	■	■
<i>Betula pubescens</i> a			■		
<i>Picea abies</i> h			■		
<i>Betula pubescens</i> A			■		
<i>Sorbus aucuparia</i> a			■		
<i>Sorbus aucuparia</i> h			■		
<i>Sorbus aria</i> h			■		
<i>Pinus sylvestris</i> h			■		
<i>Salix atrocinerea</i> a		■			
<i>Betula</i> sp. A			■		
<i>Betula pendula</i> h			■		
<b>herbacées et muscinées</b>					
<i>Pleurozium schreberi</i>		■			
<i>Nardus stricta</i> Ia			■		
<i>Agrostis stolonifera</i>			■		
<i>Galium saxatile</i>			■		
<i>Epikeras pyrenaëus</i>			■		
<i>Holcus mollis</i>			■		
<i>Deschampsia flexuosa</i>			■		
<i>Athyrium filix-femina</i>			■		
<i>Melampyrum pratense</i> Ib	■				
<i>Blechnum spicant</i>			■		
<i>Carex echinata</i>			■		
<i>Eriophorum angustifolium</i>			■		
<i>Viola palustris</i>			■		
<i>Festuca rivularis</i>			■		
<i>Juncus effusus</i> II	■				
<i>Agrostis canina</i>			■		
<i>Carex nigra</i>			■		
<i>Doctylorhiza maculata</i>			■		
<i>Aulacomnium palustre</i>			■		
<i>Sphagnum palustre</i>	■	■	■	■	■
<i>Sphagnum flexuosum</i>	■	■	■	■	■
<i>Juncus acutiflorus</i>	■				
<i>Succisa pratensis</i>	■				
<i>Molinia caerulea</i> III	■				
<i>Potentilla erecta</i>	■				
<i>Vaccinium myrtillus</i>	■				
<i>Calluna vulgaris</i> IV	■				
<i>Polytrichum commune</i>			■		
<i>Lotus pedunculatus</i>			■		
<i>Calliergonella cuspidata</i>			■		
<i>Sphagnum teres</i>			■		
<i>Cirsium palustre</i>			■		
<i>Dryopteris carthusiana</i>			■		
<i>Valeriana dioica</i> V			■		
<i>Caltha palustris</i>			■		
<i>Epilobium palustre</i>			■		
<i>Epilobium tetragonum</i>			■		
<i>Galium uliginosum</i>			■		
<i>Poa trivialis</i>			■		
<i>Rubus idaeus</i>			■		
<i>Carum verticillatum</i>			■		
<i>Scorzonera humilis</i>			■		
<i>Dryopteris dilatata</i> VI			■		
<i>Myosotis lamottiana</i>			■		
<i>Potentilla palustris</i>			■		

Figure III-4-2 : Profil floristique T1 réalisé par G. Thébaud en 2017 dans la tourbière de Virenes (Thébaud, 2018).



Figure III-4-4 : la dynamique des sphaignes vertes et en particulier *Sphagnum palustre* est très importante à Vireennes, Les troncs couchés sont souvent recouverts de cette sphaigne.

*magellanicum* (*S. medium-divinum*) et éricacées (*Calluna vulgaris*, *Vaccinium myrtillus*, *V. vitis-idaea*).

Ce fait est parfaitement décrit par le profil T2 de G. Thébaud (figure III-4-6) où ces sphaignes sont présentes sur l'ensemble des relevés.

Les profils montrent également la présence plus ou moins forte de compagnes prairiales comme le sélin des pyrénées, la scorzonère humble, la

luzule multiflore, le nard, la fétuque des rives, probables relictés du passé pastoral qui s'exprime d'ailleurs parfois localement par des jonçaises enrichies de ces plantes et d'autres.

Un autre type d'unités présent sur le complexe est celui des sources. Nous avons par exemple observé des tremblants typiques d'émergences semi-concentrées à *Sphagnum fallax*, *Carex rostrata* et saules, oligotrophes, et d'autres plus riches en nutriments



Figure III-4-5 : autre cas de recouvrement avec ici un aspect montrant que la sphaigne n'est pas dépendante d'une nappe d'eau du sol, perchée sur le tronc. Il s'agit bien-sûr de l'indication d'une humidité atmosphérique forte et constante tout au long de l'année.

à *Calliergonella cuspidata*, *Brachythecium rivulare*, montie des fontaines.

De manière plus discrète, de nombreux secteurs d'émergence diffuse sont indiqués par le populage, la violette des marais, la valériane dioïque et *Sphagnum teres*, comme sur le profil T1 de G. Thébaud.

En résumé, le méta-complexe tourbeux de Vireennes est occupé majoritairement par : des boulaies-pinèdes

à sphaigne palustre ; des jonçaises et tremblants d'émergence avec ou sans saules ; des communautés ombrotrophes à sphaignes rouges et éricacées ; des moliniaies paucispécifiques et des communautés de prairies ou mégaphorbiaies plus localisées.

La répartition précise de ces différents types n'a pas pu être clairement établie lors de la visite, mais le lien de nombreux types avec les écoulements souterrains est évident.

No relevé donné par l'auteur	2313	2314	2315	2316	2317	2318	2319	2320
N° de point	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8
surface: L x l(2m)	1,15 x 2	0,80 x 2	2,65 x 2	1,2 x 2	4,9 x 2	7 x 2	5 x 2	5 x 2
Rec. total (%)	100	100	100	100	100	100	100	100
Rec. strate arborée (%)	0	0	0	0	50	25	0	0
Rec. strate arbustive (%)	0	35	20	10	30	0	10	10
Rec. strate herbacée (%)	45	40	40	60	70	50	70	50
Rec. strate bryo (%)	100	100	100	95	100	100	90	100
<b>Arbres arbustes (A, a, h)</b>								
<i>Betula pubescens</i> h		+						
<i>Betula pubescens</i> a								
<i>Juniperus communis</i> a								+
<i>Juniperus communis</i> h I				+				
<i>Pinus sylvestris</i> A								
<i>Pinus sylvestris</i> h				+				
<i>Salix aurita</i> a								
<b>herbacées muscinées</b>								
<i>Sphagnum girgensohnii</i>								
<i>Aulacomnium palustre</i> II		+	+	+				
<i>Eriophorum angustifolium</i>	+	+	+	+				
<i>Galium saxatile</i>			+					
<i>Pseudoscleropodium purum</i>								
<i>Dicranum scoparium</i>				+				
<i>Cladonia</i>								
<i>Pleurozium schreberi</i> III			+					+
<i>Hylocomium splendens</i>			+					
<i>Nardus stricta</i>					+			
<i>Deschampsia flexuosa</i>	+	+	+	+	+		+	+
<i>Holcus mollis</i>			+	+				+
<i>Polytrichum strictum</i>								
<i>Sphagnum rubellum</i>								
<i>Sphagnum capillifolium</i>								
<i>Vaccinium vitis-idaea</i>								
<i>Calluna vulgaris</i> IV	+	+	+					+
<i>Vaccinium myrtillus</i>					+			
<i>Melampyrum pratense</i>	+		+	+		+		+
<i>Sphagnum russowii</i>								
<i>Potentilla erecta</i>		+	+	+	+	+	+	
<i>Carex nigra</i>								
<i>Sphagnum flexuosum</i>								
<i>Sphagnum palustre</i> II			+		+			
<i>Sphagnum angustifolium</i>								
<i>Carex echinata</i>					+			
<i>Polytrichum commune</i>	+							
<i>Juncus acutiflorus</i>	+		+	+				
<i>Dactylorhiza maculata</i>						+		+
<i>Malina caerulea</i>						+		
<i>Scorzonera humilis</i>						+		
<i>Succisa pratensis</i> V						+		
<i>Festuca rivularis</i>	+							
<i>Epilobos pyrenaicus</i>								+
<i>Agrostis capillaris</i>								+
<i>Luzula multiflora</i>			+					
<i>Dicranum borjeanii</i>							+	

Figure III-4-6 : Profil floristique T2 réalisé par G. Thébaud en 2017 dans la tourbière de Virenes (Thébaud, 2018).

### III.5 - Documents anciens

L'exploitation des données anciennes a été en partie réalisée par les étudiants de master d'Hervé Cubizolle (Brenas *et al.*, 2010), en particulier celles relatives au cadastre

napoléonien qui mettent en évidence la nature pastorale des secteurs humides.

Pour ce qui concerne l'analyse des photographies aériennes anciennes,

leur exploitation fine nécessiterait un temps qui dépasse largement celui du prédiagnostic. En particulier, le méta-complexe présente des disparités en termes de colonisation ligneuse qui mériteraient une analyse spécifique.

Les clichés de 1955 montrent ainsi des complexes nord-ouest ouverts, contrastant avec ceux du sud-est, déjà bien couverts de possibles pins (figures III-5-1 et III-5-2), en accord avec les mesures dendrologiques effectuées par

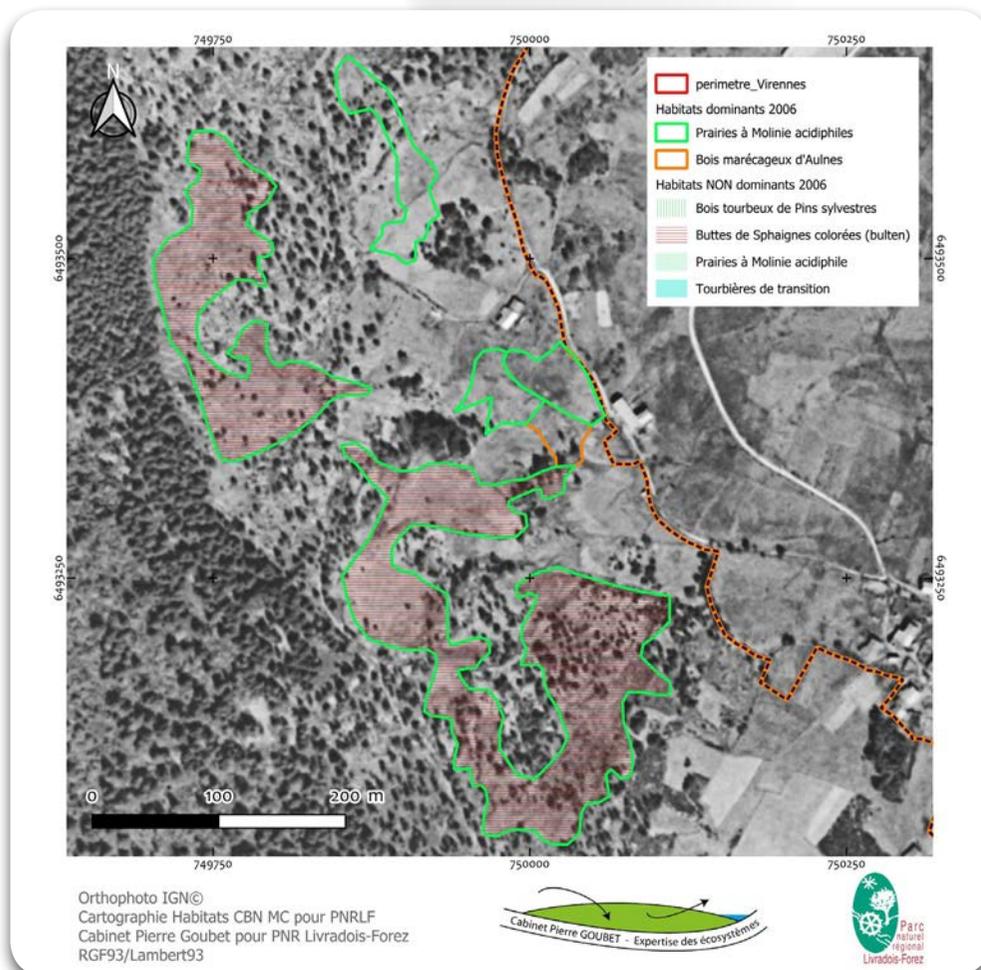


Figure III-5-1 : localisation des habitats de 2006 sur fond photographique IGN ancien (1955), complexes du nord-ouest.

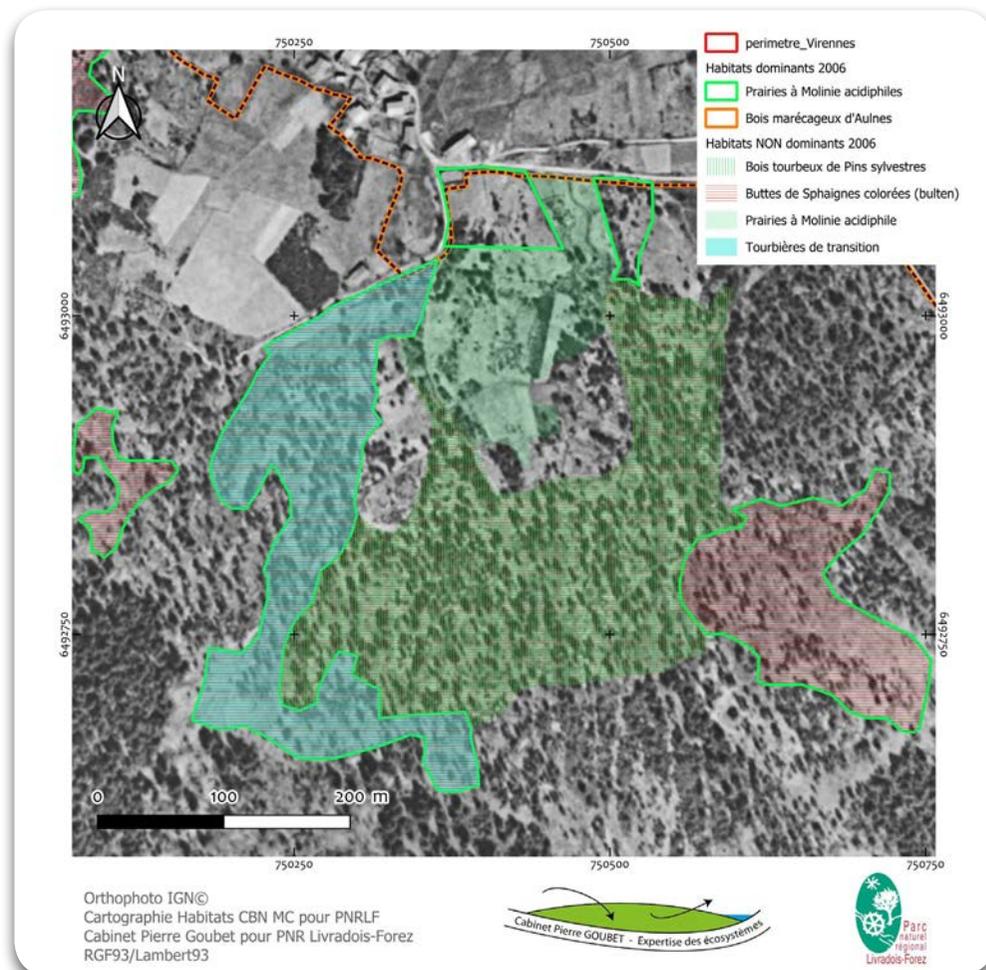


Figure III-5-2 : localisation des habitats de 2006 sur fond photographique IGN ancien (1955), complexes du sud-est.

les étudiants en 2010 qui établissaient l'âge de nombreux pins à un siècle (Brenas *et al.*, 2010) (figure III-5-3).

La question historique des aménagements hydrauliques qui sont aujourd'hui non ou peu visibles a été évoquée mais non traitée par les étudiants en 2010. Il ne semble pas qu'elle ait fait l'objet d'une analyse ultérieure.

Sur cette question, nous ne disposons comme source d'information que du MNT à 1 m du RGE de l'IGN.

Il ne montre pas de réseau particulièrement dense de drains en dehors d'un aménagement forestier de versant

en dehors des secteurs cartographiés comme habitats humide (figure III-5-4).

Il existe cependant des secteurs aménagés semblant plutôt dédiés à la conduite rectiligne des eaux de sources des parties hautes qu'au drainage. Dans ce cadre, il est difficile de différencier ce qui dérive du naturel, de l'aménagement léger ou de la création de conduites.

La même chose s'observe pour le secteur nord-ouest du méta-complexe où des aménagements de captage et de dérivation sont visibles sur le terrain sans se matérialiser sur le MNT.

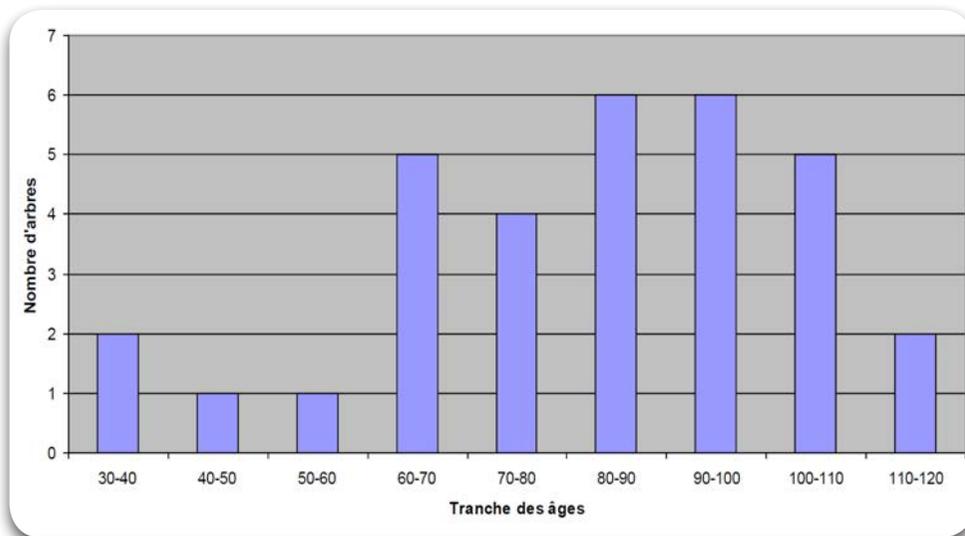


Figure III-5-3 : répartition par décades de l'âge de 32 pins sylvestres estimé sur le comptage des cernes du bois (Brenas *et al.*, 2010).

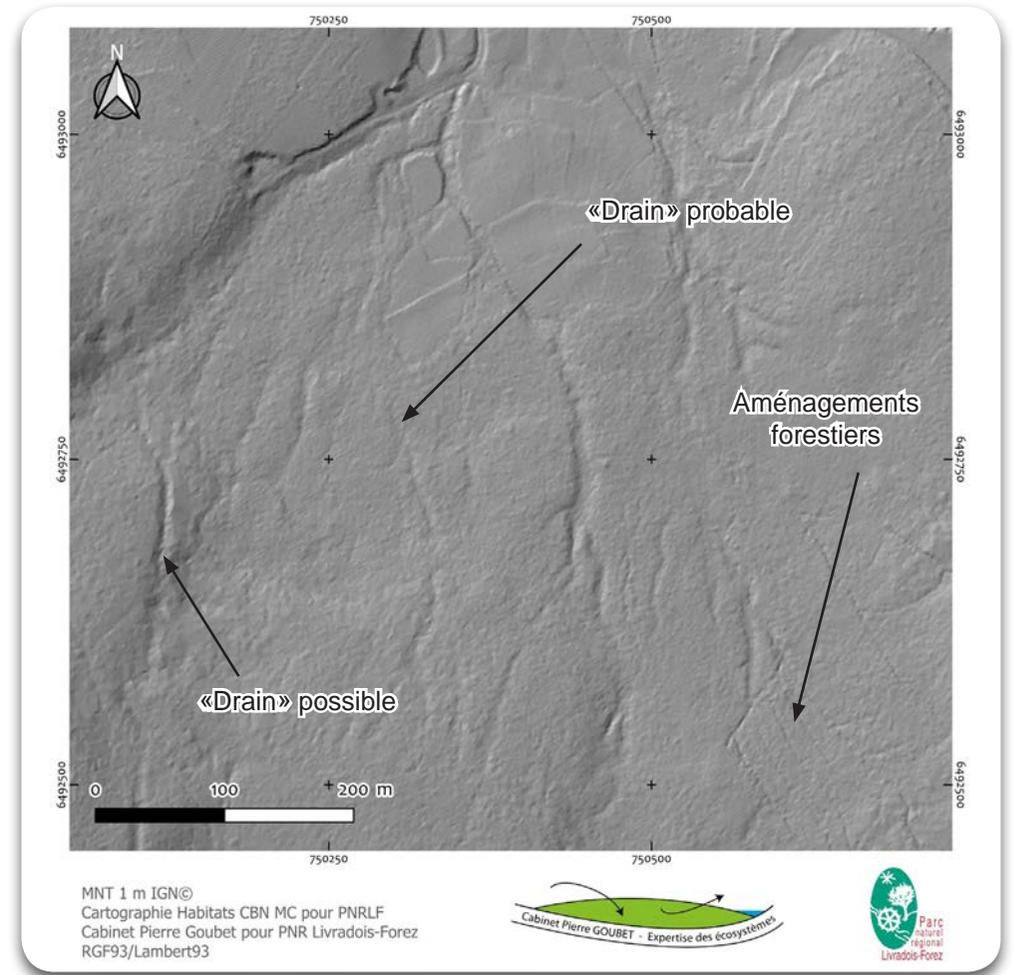


Figure III-5-4 : réseau hydrographique apparaissant sur le MNT à 1 m de l'IGN et localisation des aménagements hydrauliques probables.

# IV. **I**nterprétation fonctionnelle



Comprendre le fonctionnement du complexe tourbeux de Virennnes implique la compréhension des modalités fonctionnelles des tourbières et autres zones humides de manière plus générale. Dans un premier temps, avant de développer le sujet spécifique de l'origine, de l'état et du potentiel des différents complexes étudiés, nous rappellerons donc quelques notions

essentielles du fonctionnement des tourbières. Nous développerons les sujets concernant les grands types de végétations, qui dépendent des logiques nutritionnelles ; celui des sols et en particulier la notion d'altération de la tourbe et de ce qu'elle induit sur le long terme ; et les logiques hydrologiques, processus clés dans la possibilité de créer la tourbe.

## IV.1 - Notions de tourbières minérotrophes et de tourbières ombrotrophes

Les tourbières minérotrophes, nommés aussi bas-marais, sont définies comme des milieux tourbeux occupés par des communautés végétales relativement exigeantes en nutriments, qui dépendent d'une alimentation hydrique issue des ruisseaux, des sols ou des roches. Les bas-marais sont fortement diversifiés suivant un gradient minéral (présence de bases, calcium ou magnésium), d'une part, et suivant un gradient trophique (azote, phosphore principalement), d'autre part.

Les tourbières ombrotrophes, nommés aussi hauts-marais, sont des systèmes majoritairement dépendants des précipitations, mais pouvant aussi fonctionner comme un bas-marais dans des contextes de pauvreté en nutriments des substrats géologiques (sables, grès). Dans tous les cas, ils sont oligotrophes et l'apport de nutriments

contribue soit à détruire directement les plantes présentes, soit à rendre ces dernières moins compétitives que celles des bas-marais.

En première approche, pour simplifier, la biomasse aérienne restitue assez bien la richesse trophique d'un milieu. Les tourbières oligotrophes, acides ou alcalines, sont caractérisées par des mousses et des plantes basses graminoides ou ligneuses sempervirentes. Les tourbières plus riches en nutriments sont caractérisées par des graminoides hautes (formant des «magnocariçaies» ou des «roselières») ou des ligneux souvent hauts et caduques (saules, bouleaux, aulnes). Dans tous les cas, les arbres indiquent des disponibilités en nutriments accrues, sans pour autant signaler des processus d'assèchement.

Enfin, pour compléter les quelques données théoriques essentielles, il faut indiquer que certaines communautés de tourbières hautes sont indépendantes de toute nappe phréatique : elles sont dites aérohygrophiles. Elles peuvent donc croître sur des substrats étanches comme des rochers ou des tourbes sèches.

Les termes de minérotrophe et ombrotrophe sont aussi utilisés pour désigner la nature des apports hydriques et par extension les unités écologiques ou les communautés végétales qui en sont dépendantes. Minérotrophe (ou géotrophe) renvoie à une eau issue du sol ou des nappes ; ombrotrophe à une eau issue des précipitations.

## IV.2 - Logiques pastorales et post-pastorales

Comprendre le fonctionnement des tourbières de Virennnes et définir une stratégie de conservation de ses services écosystémiques passe par la prise en compte essentielle de la nature «post-pastorale» ou plus précisément de la charge pastorale historiquement variable du méta-complexe, autant que sa nature primaire d'écosystème d'émergence.

Le pastoralisme est une perturbation majeure des tourbières qui s'exprime surtout dans la partie méridionale de l'aire de répartition des milieux tourbeux, là où elles sont relativement rares. La recherche scientifique sur les tourbières a été majoritairement réalisée dans des pays du nord des continents eurasiens et nord-américain, dans des secteurs relativement peu impactés par le pastoralisme. Le sujet de la tourbière pâturée n'est donc que peu traité par la science.

Même dans la sphère des

gestionnaires d'espaces naturels, la perception des tourbières comme milieu ayant pu faire l'objet d'un usage pastoral relativement intensif est faible, souvent à cause d'un regard biaisé par la valeur agronomique donnée aujourd'hui à ces secteurs. De plus, dans l'histoire, l'usage le plus intensif de ces milieux se situe en général probablement avant l'usage des engrais et de la force motrice carbonée, d'abord le charbon et en particulier le train, puis le pétrole et les véhicules à moteur. Cela correspond probablement à un paroxysme entre la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle et la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, même si la traction animale en zone rurale et les engrais chimiques ne se développent dans certaines parties de la France qu'à partir du milieu du XX<sup>ème</sup> siècle.

Il faut ainsi concevoir que la pression de pâturage n'est pas appliquée qu'en termes de production alimentaire ou de loisir comme aujourd'hui, dans un monde productif grâce aux engrais

chimiques, mais surtout en termes d'énergie pour le travail agricole et les transports, et cela dans un monde aux sols appauvris par des millénaires d'agriculture. Il existe même des méthodes d'extraction de nutriments à travers le pâturage des zones humides dont les tourbières, comme cela est documenté pour les landes de Gascogne. Là, les moutons étaient utilisés sur les tourbières pour fournir des engrais organiques à travers leurs déjections. Les tourbières qui n'ont pas fait l'objet d'un pâturage sont donc probablement rares en France, seulement là où des conditions particulières existent, comme sur des tremblants lacustres peu portant où des terres gardées spécifiquement.

La tourbière pastorale ou post-pastorale est donc une règle en France, et la présence d'un horizon pédologique d'origine pastorale le prouve souvent, même si cela n'est pas clairement le cas à Virennnes.

Le pastoralisme induit donc une perturbation directe, évidente, simple à constater lors de la comparaison d'une

parcelle en défens avec son environnement pâturé, mais il induit aussi un héritage pédologique dont nous avons déjà parlé et, de plus, un héritage dans la sphère nutritive, fondamental pour comprendre la dynamique des tourbières concernées par une colonisation comme à Virennnes.

En effet, les logiques de stocks et de flux de nutriments dans les milieux tourbeux changent en fonction de leur état pré- ou apastoral, pastoral et post-pastoral comme présenté dans la figure IV-2-1. L'élément clé est le phosphore, reconnu comme l'élément limitant dans le plupart de cas. Le phosphore est «rare» et son cycle est particulier. Même présent dans les sols, il n'est pas forcément disponible pour le vivant. Sa disponibilité varie en fonction des quantités présentes, des formes présentes, des conditions physico-chimiques et varie en fonction des groupes organismes présents. Dans des conditions normales (pas d'importants excès d'azote par exemple), c'est donc le phosphore qui induira le processus d'eutrophisation.

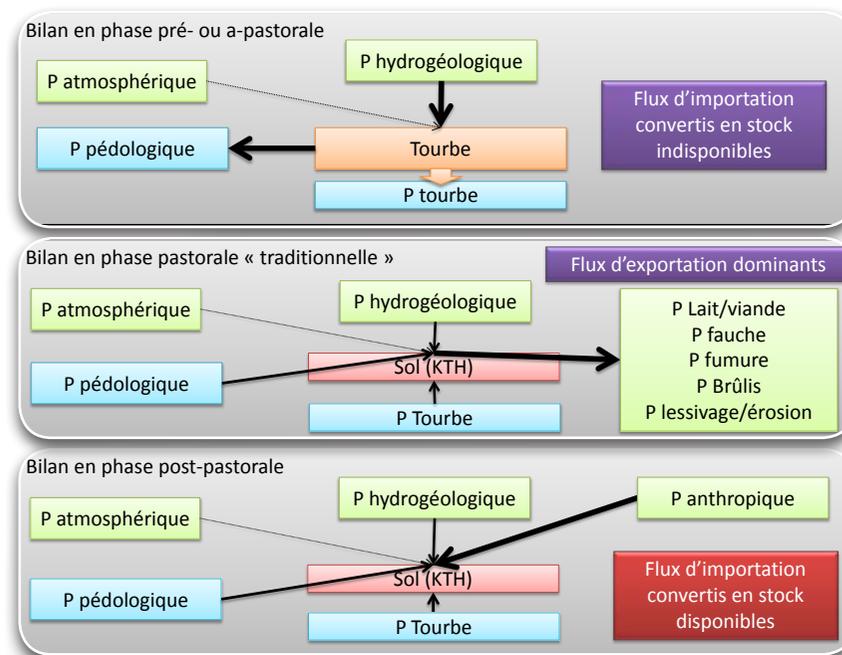


Figure IV-2-1 : comparaison des bilans nutritionnels pour les phases pré ou a-pastorale, pastorale et post-pastorale. Les tourbières de Virennnes sont en majeure partie en phase post-pastorale, avec l'eutrophisation associée présentée dans la figure suivante.

En général, les apports de phosphore atmosphérique sont limités. En phase pré- ou apastorale, les apports sont réalisés par les eaux souterraines, qui n'en transportent que très peu. Ce phosphore est rapidement rendu indisponible par la construction de la tourbe, il en reste cependant dans le sol. On peut donc résumer que le flux d'importation est converti en stocks indispensables dans la tourbe.

En phase pastorale, les apports peuvent rester identiques, mais la tourbe n'est pas produite, et l'élément est exporté à travers la viande, le lait, les excréments, les cendres ou le lessivage et les processus érosifs induits par le pâturage.

A Virennnes, la phase actuelle est celle du ré-équilibre trophique, avec probablement peu ou pas d'apports

anthropiques directs vu le contexte forestier à l'amont. Ici, le phosphore est apporté par l'eau de la nappe, en faible quantité, et peu par les ruissellements sur les pentes car les mégaphorbiaies typique liées à ce processus ne sont pas présentes.

Les processus d'augmentation de la disponibilité nutritionnelle indiqués par la colonisation ligneuse sont probablement induits par l'exploitation, par les ligneux, du phosphore pédologique concentré dans les écoulements d'émergence, accompagné de possibles autres effets comme présentés dans la figure IV-2-2. Les pins, peu exigeants en nutriments, se rencontrent de manière diffuse, alors que les émergences les plus actives favorisent les saules ; les bouleaux ayant une stratégie intermédiaire, profitant des deux contextes avec un certain délai.

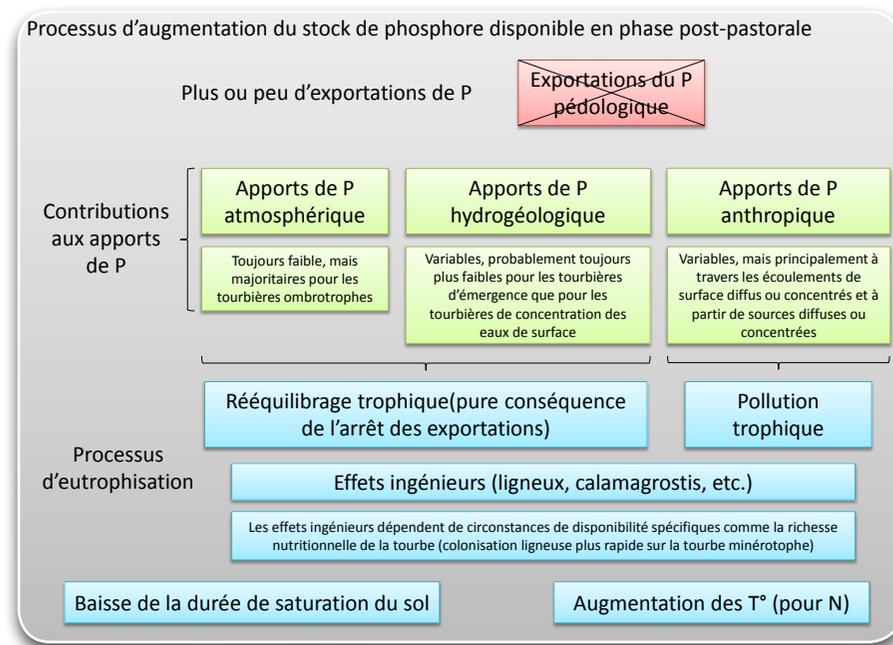


Figure IV-2-2 : processus d'eutrophisation post-pastoraux.

## IV.3 - Modèle hydrologique

La mise place et le fonctionnement du complexe tourbeux de Virenes dépendent de processus hydrologiques relatifs aux émergences de nappes rocheuses méritant d'être présentés dans le détail.

Les modalités de circulation des eaux souterraines varient en fonction de la nature des roches qu'elles traversent. Dans les systèmes dits fissurés et poreux, les logiques de circulation de l'eau se modélisent suivant une logique de circulation en arc de cercle, mettant en évidence des zones de

recharge de nappe par infiltration et des zones de décharge, par émergence. Différents systèmes s'emboîtent, du local au régional. Ce modèle a été proposé par Tóth en 1963 (figure IV-3-1). Il est couramment utilisé dans différents pays du monde mais relativement peu diffusé en France où la notion de flux ascendants reste encore peu utilisée, même si elle tend à se généraliser. Encore trop souvent, les mesures qui correspondraient à des logiques de flux ascendants sont interprétées comme résultant de simples processus de captivité de nappe. Le modèle proposé

par Tóth (1963) s'applique avec profit aux logiques d'émergence de nappe en zone humide, en l'adaptant comme nous le proposons.

Les études menées dans le Haut-Bugey dans le massif du Jura (dépôts glaciaires dans un contexte de séries calcaires mésozoïques), ont montré, de manière directe (suivi piézométrique) ou indirecte, les modalités de fonctionnement de tourbières alimentées par émergences diffuses par transfert de charge (Goubet, 2013). D'autres études dans des contextes

différents valident ce modèle.

La clé de voûte fonctionnelle est l'existence d'un compartiment hydrogéologique dit «diffusif», nappant les roches, en lien avec un compartiment transmissif, alimenté par un dernier compartiment hydrogéologique dit capacitif (ou réserve hydrogéologique) (figure IV-3-2). L'absence du compartiment diffusif entraîne en général l'existence d'émergences concentrées, et l'absence de tourbière.

Le système est analogue à un

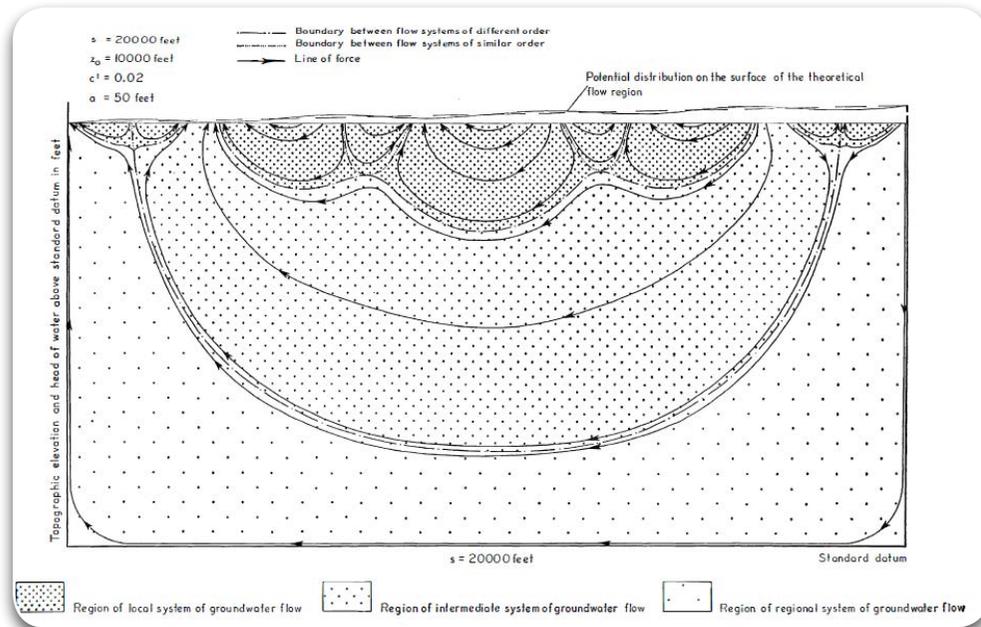


Figure IV-3-1 : circulations des eaux souterraines montrant l'importance des flux ascendants dans l'alimentation des émergences (Tóth, 1963).

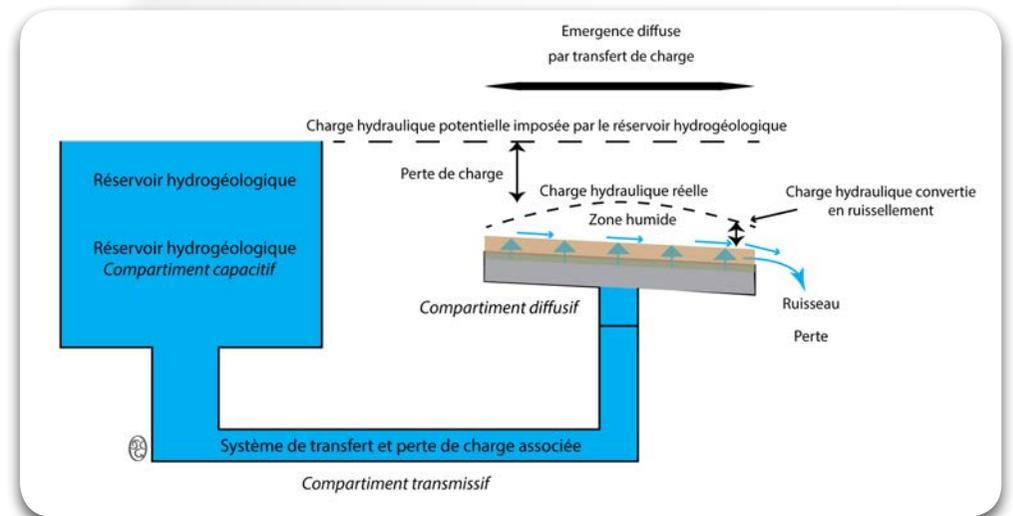


Figure IV-3-2 : schéma explicatif du modèle d'émergence diffuse par transfert de charge. Échelles non respectées.

réservoir, situé en hauteur, qui est connecté par un tuyau à une céramique poreuse située plus bas. L'eau émerge de la céramique de manière diffuse et s'écoule suivant la pente. A porosité constante, l'arrêt de l'émergence ne dépend pas de l'épaisseur de la céramique, mais surtout de sa hauteur relative par rapport au réservoir. Il s'agit d'une forme de vases communicants. Le niveau théorique d'émergence de l'eau au dessus de la céramique dépend des «pertes de charge» inhérentes aux propriétés structurales de chacun des trois compartiments. Certaines chroniques piézométriques mettent en évidence un gradient de

charge hydraulique (figure IV-3-3). Ce genre de trait piézométrique clé est à rechercher dans les analyses hydrologiques.

Dans ce modèle, la mise en place d'un terre tourbeux se réalise à l'endroit de l'émergence diffuse en constituant une sorte de compartiment diffusif secondaire, en continuité hydrologique avec celui des formations minérales poreuses. Le roseau (*Phragmites australis*), et certains carex, semblent tout à fait adaptés à ce type de contexte. Ils forment de la tourbe sur la base d'une ingénierie pédogénétique qu'on peut dénommer «boucle

litière-engorgement-rhizome» (figure IV-3-4). Contrairement à des systèmes de type hauts-marais où la matière produite est peu décomposable, où le sol est relativement stable mais pauvre en nutriments disponibles, le système de boucle litière-engorgement-rhizome est basé sur une forte productivité de biomasse annuelle, restituée dans une litière qui sert de substrat au système

racinaire des producteurs de biomasse, mais qui est immédiatement engorgé à cause du niveau de charge hydraulique plus élevé que le niveau du sol (d'où la notion de boucle répétitive). Il est probable que d'autres types de végétations soient capables d'édifier de la tourbe dans ce type de contexte, mais nos données sont encore trop peu nombreuses pour le confirmer.

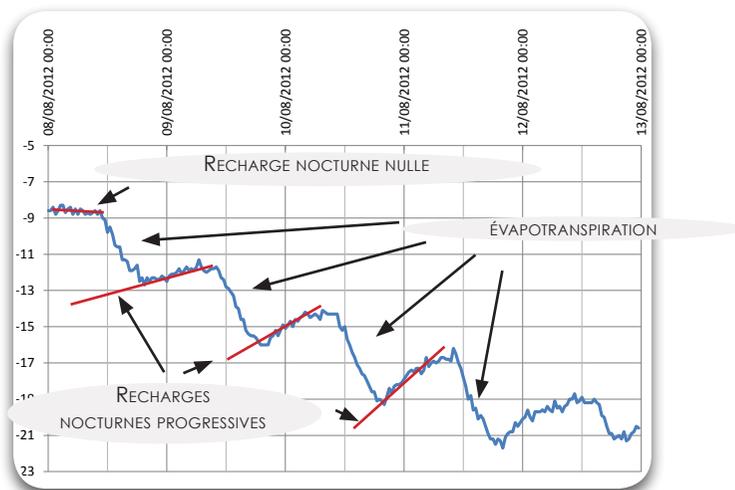


Figure IV-3-3 : chroniques piézométriques montrant un gradient de charge ascendante (Goubet, 2013).

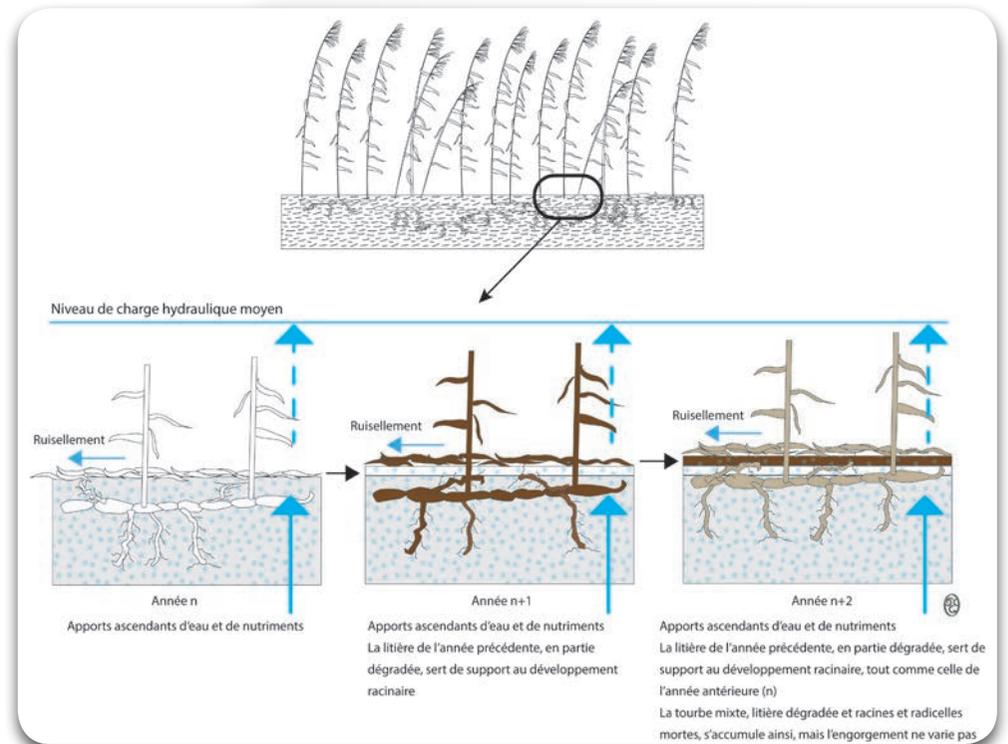


Figure IV-3-4 : modèle de croissance d'un terre tourbeux à phragmite.

La photographie issue de Google Earth présentée en figure IV-3-5 met en évidence la structure typique d'un secteur d'émergence avec des points d'émergence concentrée à l'amont de zones d'émergence diffuse et des écoulements concentrés à l'aval des émergences. Ici, le contexte est volcanique, mais cette structure classique s'assimile aussi à celle du secteur de

Vireennes comme une simple visite le démontre.

Il faut aussi concevoir ce modèle d'écoulement ascendant en termes de potentiel et de variation spatio-temporelle. En effet, les pertes de charge dépendent de nombreux facteurs dont la structure des roches et des formations superficielles. Il existe ainsi des zones

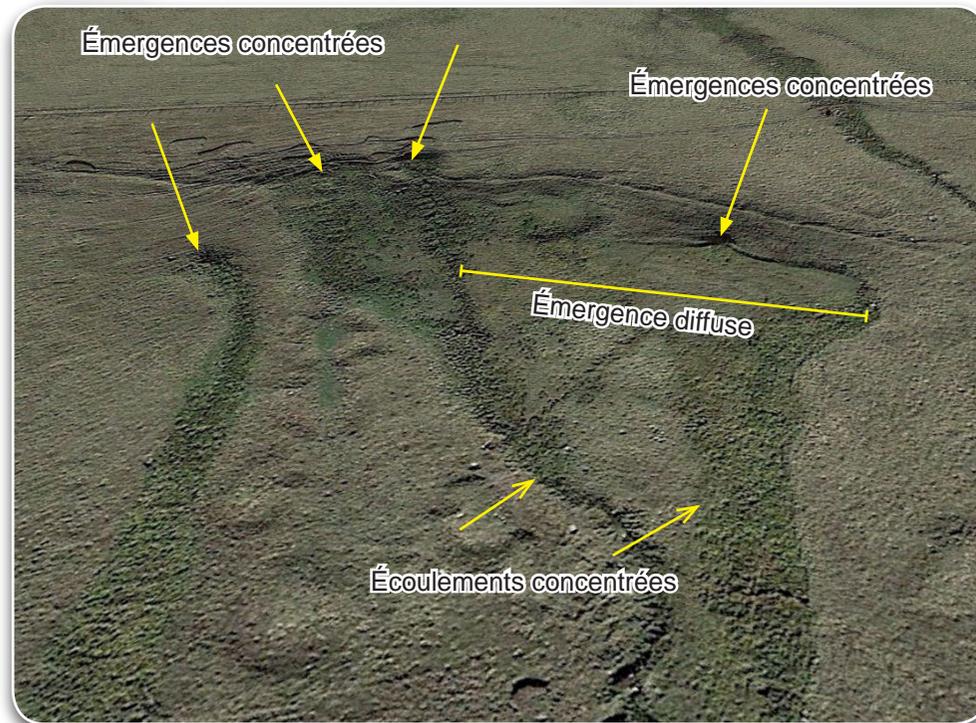


Figure IV-3-5 : exemple de système d'émergence d'intercolée basaltique avec ses émergences concentrées de l'amont, le tertre de diffusion (à droite seulement) et les écoulements concentrés à l'aval. L'émergence de gauche montre la structure en l'absence de formation diffusive. La largeur de la photo couvre 150 m.

La Loubeyre à La Godivelle (63), bassin versant du lac d'en Bas (photo Google Earth (2019)).

de plus « libre » passage où la charge est plus élevée constituant souvent des émergences semi-concentrées. Il existe aussi une variation de charge induite par le relief comme présentée

dans la figure IV-3-6. Dans cet exemple réel, la charge est relativement moins élevée par rapport au sol à l'amont de la tourbière, avec une altitude inférieure au sol en été.

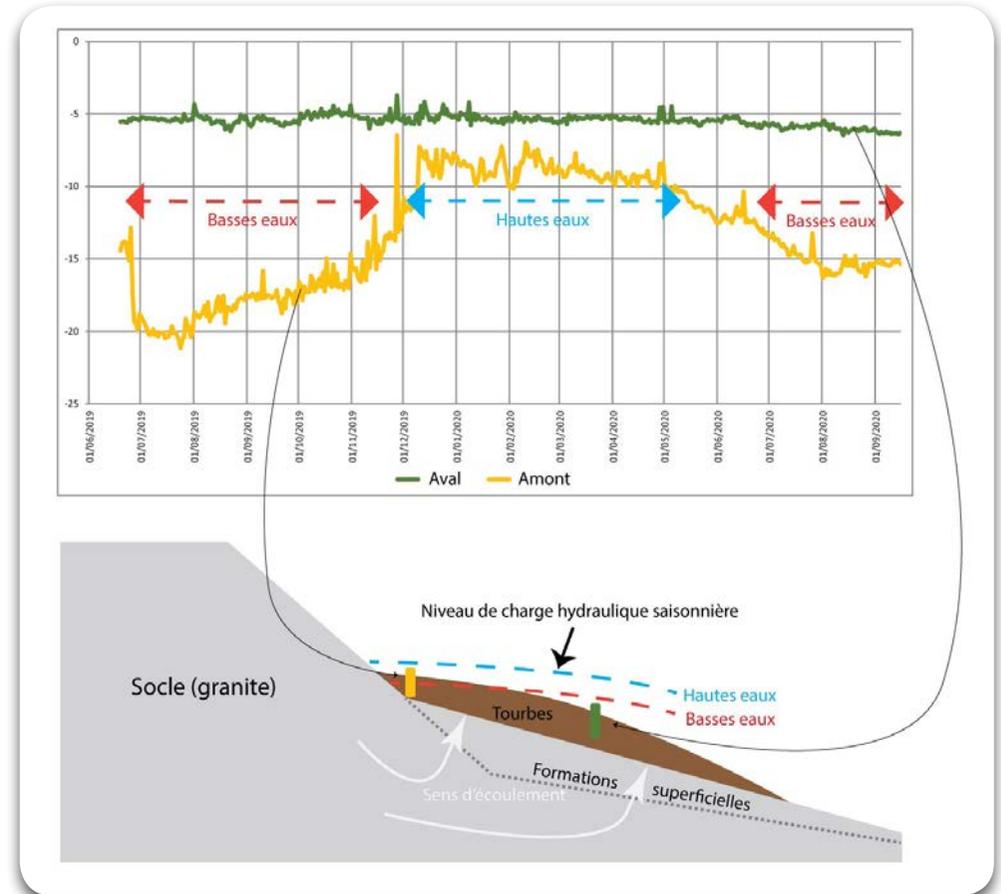


Figure IV-3-6 : signal piézométrique et structure géologique correspondante avec l'expression de la charge hydraulique variable dans le temps et l'espace imposant un tarissement de la partie amont.

Mais au-delà de la variation saisonnière et du tarissement local, il faut aussi envisager des systèmes d'émergence «fossiles», où la charge hydraulique n'est plus à l'altitude qu'elle avait lors de la mise en place du terre tourbeux, comme illustré dans la figure IV-3-7.

Bien-sûr, les conditions d'émergence déterminent fortement le potentiel de restauration des tourbières pastorales ou post-pastorales et leur capacité à produire de la tourbe. A Virennnes, l'analyse pédologique, avec de nombreuses émergences à tourbes récentes épaisses, révèle que la charge hydraulique appliquée sur certains

secteurs est largement au-dessus du sol, offrant un potentiel de turfigenèse important. Contrairement à ce qui a été proposé par Thébaud (2018), ce n'est probablement pas l'arrêt de l'entretien des ouvrages hydrauliques qui est à l'origine de ce processus de turfigenèse récente, mais simplement l'arrêt du piétinement des animaux. En effet, de nombreuses zones analogues pâturées et non drainées sont caractérisées par des tourbes ou autres horizons nus, boueux. La mise en défens de tels secteurs permet une colonisation plus ou moins rapide de communautés turfigènes de composition dépendante de la charge minérale ou trophique de l'eau de nappe.

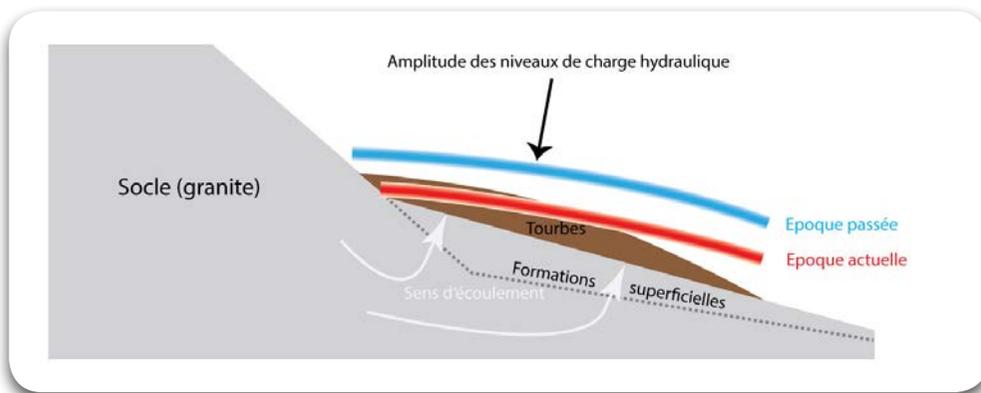


Figure IV-3-7 : processus d'abaissement de la charge hydraulique sur une longue période (10-1000 ans) modifiant fortement la capacité d'alimentation actuelle.

L'arrêt du pâturage est donc à l'origine des tourbes récentes des systèmes d'émergence semi-concentré, mais il est aussi à l'origine des communautés et des tourbes ombrotrophes locales, mais de manière plus complexe que dans les tourbières ombrotrophes «classiques», comme celles qui occupent la crête de Forez voisine.

Les processus d'émergence déterminent donc à la fois l'existence des unités minérotrophes (tremblants d'émergence, jonçaias, cariçaias à *Carex rostrata*, etc.), mais ils déterminent aussi très probablement les unités ombrotrophes à sphaignes rouges à travers une modalité «d'assistance» estivale.

En effet, il semble exister trois types d'ombrotrophie : (1) un type régional, climatique, où les conditions du climat de la région sont favorables aux espèces ombrotrophes, comme sur la crête du Forez ou dans les Bois-Noirs ; (2) un type local, où la survie estivale des sphaignes est induite par une «bulle» d'humidité atmosphérique générée par une pièce d'eau (lac, étang, rivière), une émergence (l'évapotranspiration permise par l'apport d'eau de nappe indépendant des conditions

météorologiques génère la bulle humide) ou un flux d'air frais qui induit une condensation (souvent en bas d'éboulis) ; (3) et un type microclimatique, où c'est une condition très locale qui permet l'expression des sphaignes ombrotrophes, comme l'ombre d'un arbre ou d'un rocher, un suintement, etc.

Il faut rappeler que l'ombrotrophie chez les sphaignes s'exprime de manière différente. Pour *Sphagnum capillifolium*, et pour le plus rare *Sphagnum fuscum*, seules les précipitations comptent, elles sont dites aérohygrophiles.

Par exemple, les buttes à *Sphagnum capillifolium* constituent une unité fréquente des tourbières françaises, de la plaine à l'étage alpin. Elles apparaissent en systèmes de tourbière ombrotrophe ouverts ou boisés, en buttes isolées dans les systèmes minérotrophes comme des bas-marais acides ou des pinèdes, pessières sapinières ou boulaies tourbeuses. A l'étage alpin, elles se rencontrent dans des situations diverses et même sur des pentes fortes et des rochers. Elles se rencontrent également dans des zones d'éboulis (Vosges, Pyrénées Atlantiques) où les processus

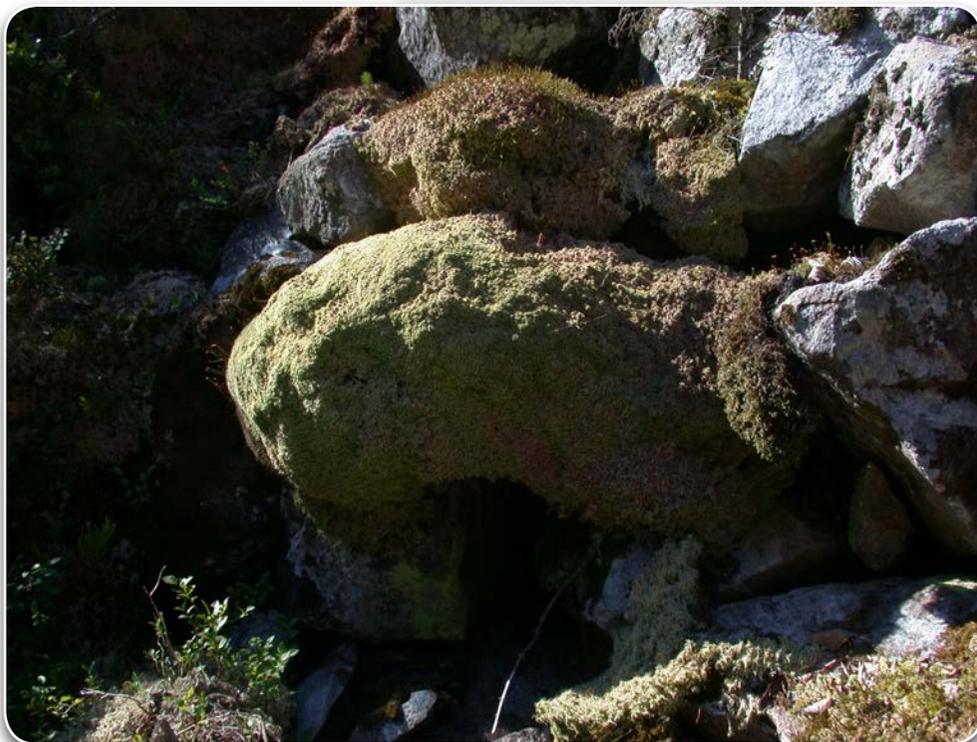


Figure IV-3-8 : les plantes aérohygrophiles se contentent des eaux atmosphériques pour vivre et peuvent ainsi croître sur des rochers, des tas de branches, parfois même la «tête» vers le bas comme cela s'observe dans des éboulis. Ici, *Sphagnum capillifolium*, dans les Vosges.

de condensation sont importants. Cela permet à la sphaigne de pousser sur des rochers la tête en bas (figure IV-3-8).

D'autres espèces, telles que *Sphagnum rubellum*, *Sphagnum medium/divinum* (ex *magellanicum*) montrent également des capacités fortes à se contenter d'eau de pluie pour vivre en formant des buttes élevées, mais elles se rencontrent aussi en replats baignant dans une eau de pluie concentrée entre les buttes dans les tourbières ombrotrophes ou des eaux de sols de landes ou de tourbières minérotrophes, seulement en contexte rocheux acides et oligotrophes. Enfin, il existe également le groupe de *Sphagnum palustre*, *S. papillosum*, *S.*

*centrale*, qui est principalement minérotrophe, mais qui peut profiter d'une humidité atmosphérique élevée, le plus souvent en contexte boisé, pour former de petites buttes, des larges replats relativement hauts ou croître sur des supports comme des souches, des troncs couchés ou des herbes raides. C'est le cas ici à Vireennes pour *Sphagnum palustre* (et possiblement *S. papillosum*) sur des troncs d'arbres comme figuré dans une partie antérieure du rapport. Ce comportement peut-être qualifié d'ombro-minérotrophe vrai, avec la réserve que ces sphaignes ne forment pas de tourbe durable de manière significative ; elles sont en effet absentes des profils analysés en France, en dehors d'horizons de surface récents, comme ici à Vireennes.

## IV.4 - Approche synthétique

Nous proposons ici de résumer l'ensemble des faits majeurs issus de la littérature ou de notre travail, tout en proposant, à partir de ces faits, un modèle de fonctionnement des tourbières de Virenes.

Le méta-complexe de Virenes occupe les versants et piémont d'un massif gneissique (migmatitique) fracturé de manière majeure sur au moins deux axes, non verticaux, dont un pourrait correspondre à la stratification des roches dont il est issu et qui rentre donc dans la logique de foliation de la roche.

Sur ce massif culminant à 1215 m, la couverture d'altérite semble conséquente car les auteurs de la notice de la carte d'Ambert précisent qu'aucun affleurement n'a été observé dans le secteur d'étude. Le MNT révèle des processus d'affaissements récents, probablement induite par une altération ou une fissuration importante des gneiss (figure IV-4-1). D'un autre côté, des talus apparaissent assez nettement d'origine tectonique, laissant supposer l'existence de zones de roches à structure bien conservée, sans altération épaisse.

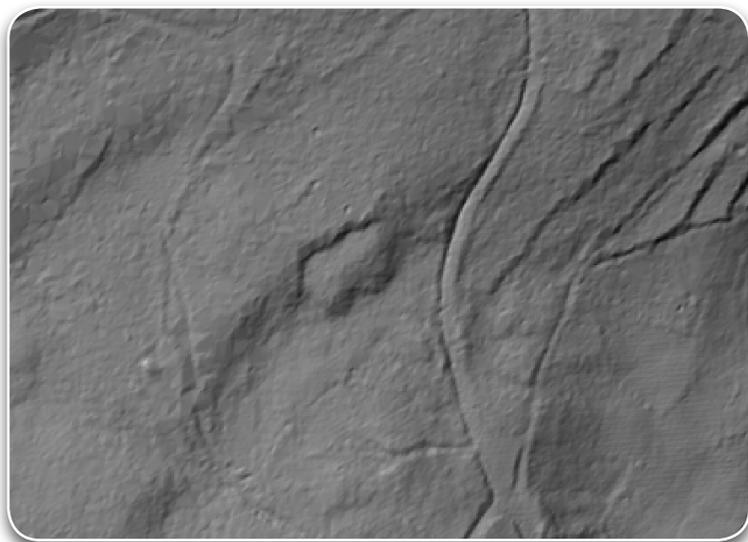


Figure IV-4-1 : logiques d'écoulements en contexte de socle sur la base du modèle structural de socle de Wyns et ses collaborateurs (1999) reprise ici de Maréchal et al. (2003).

Le secteur se caractérise par de nombreuses émergences concentrées ou semi-concentrées, laissant présumer de propriétés capacitives assez spécifiques du gneiss et de son altérite.

Le complexe se tient sur deux contextes structuraux différents qui génèrent deux grandes unités, au nord-ouest et au sud-est (figure IV-4-2).

Au sud-est, la zone tourbeuse forme une entité de grande surface sise sur un plan peu pentu d'engorgement assez généralisé. Il semble se définir

ainsi une nappe de tourbe peu épaisse typique de grand secteur d'émergence sur une nappe colluviale de glacis (le replat qui raccorde le bas de versant au ruisseau dans les alvéoles cristallins non englacés ; il n'est pas clairement mis en évidence sur la figure à cause de l'orientation du profil topographique).

Au nord-ouest, la logique est celle d'une série de complexes situés sur des marches tectoniques plus ou moins raccordées. Sur le terrain, certains édifices tourbeux apparaissent clairement appuyés sur le talus comme représenté

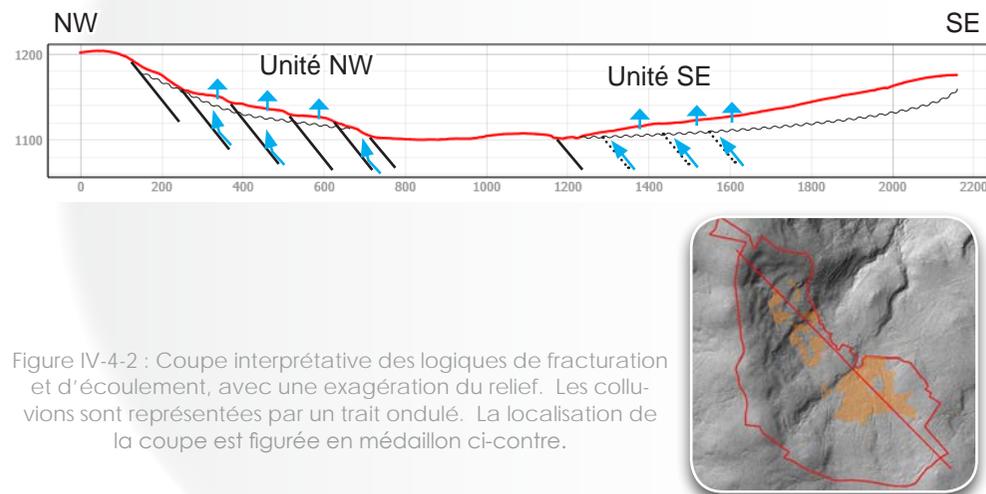


Figure IV-4-2 : Coupe interprétative des logiques de fracturation et d'écoulement, avec une exagération du relief. Les colluvions sont représentées par un trait ondulé. La localisation de la coupe est figurée en médaillon ci-contre.

sur la figure IV-4-3. Nous avons également observé un nombre important d'émergences fossiles, des secteurs tourbeux à composition et structure floristique diverses mais sans indicateur d'engorgement ou de turfigenèse forte. En général, une émergence active est présente à proximité. La cause de ces changements de lieu d'émergence n'est pas formellement connue, mais la fraîcheur de certains glissements de terrain laisse supposer une certaine instabilité rocheuse qui pourrait mener à des réorientations de flux. Il est également possible que les activités humaines soient à l'origine de certains changements d'écoulement. Une analyse spatiale des émergences actuelles et fossiles permettrait certainement de mieux comprendre le phénomène et éventuellement restaurer certains secteurs. En l'occurrence, il existe un captage et un réservoir à l'amont de l'entité

nord-ouest qui pourrait être à l'origine de l'assèchement d'émergences.

Les communautés présentes sont pour une bonne part typiques des systèmes d'émergence semi-concentrée et diffuse du Massif central en phase post-pastorale. Elles s'intègrent dans une logique hydrologique de socle conceptualisée par Wyns et ses collaborateurs que nous avons adaptée pour faire apparaître les zones humides (figure IV-4-4).

Nous avons ainsi observé la présence localisée de tremblants ou de pseudo-tremblants d'émergence ; ces derniers étant caractérisés par l'absence d'une lame d'eau libre sous le mat racinaire de surface et l'enracinement d'une partie des plantes dans le fond humide au contraire du vrai tremblant qui flotte intégralement. Ces

pseudo-tremblants sont cependant de composition floristique quasi identique aux autres, avec une adaptation aux variations de niveaux d'eau plus faible, mais rendue moins nécessaire à travers la constance du débit d'émergence. La diversité de ces tremblants et pseudo-tremblants s'exprime principalement sur la base d'un gradient trophique certainement relatif au temps de résidence des eaux de nappe dans les roches et à leur parcours plus ou moins en profondeur. La cartographie de bio-indicateurs permettrait certainement de définir les différentes logiques à l'œuvre. La dynamique post-pastorale de ces émergences mène à moyen terme à la saulaie, puis la saulaie-boulaie, dont

les couverts herbacés et bryophytiques dépendent de la richesse trophique des eaux d'émergence. Lorsque le phosphore est relativement présent, l'auline prend aussi sa place.

Les écoulements de surface plus ou moins diffus qui prolongent ces émergences à tremblants sont souvent occupés par des cariçaias à *Carex rostrata* et des jonçaias acutiflores peu diversifiées. Ces dernières peuvent aussi indiquer la présence d'émergences diffuses à débit relativement important. Ces unités sont également vouées à la colonisation ligneuse des saules et des bouleaux.

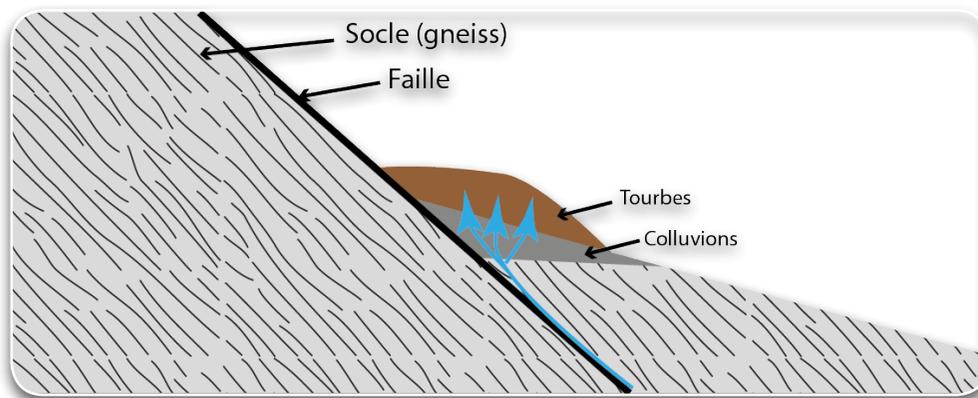


Figure IV-4-3 : coupe interprétative des logiques de fracturation et d'écoulement, avec une exagération du relief.

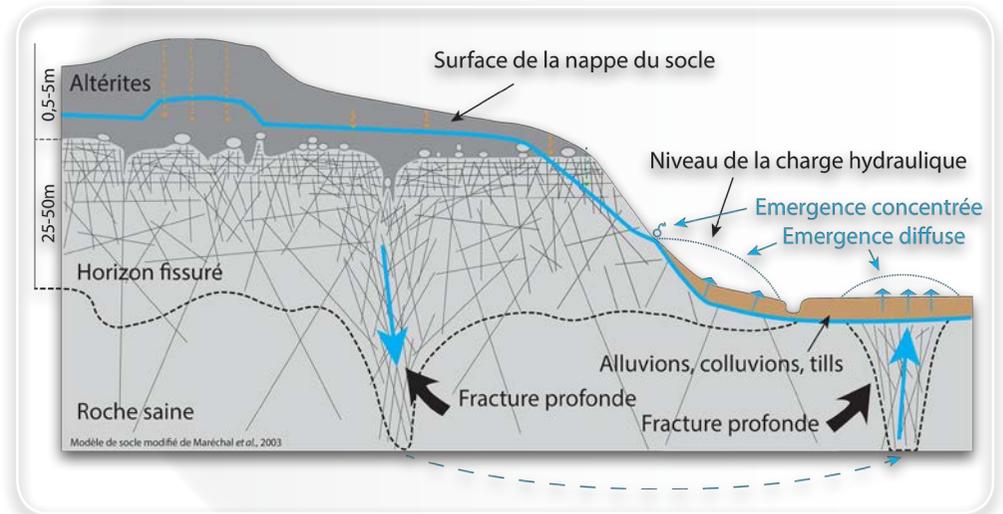


Figure IV-4-4 : logiques d'écoulements en contexte de socle sur la base du modèle structural de socle de Wyns et ses collaborateurs (1999) reprise ici de Maréchal et al. (2003). Ce modèle s'applique parfaitement à Vireennes.

Les émergences diffuses à débit faible sont principalement occupées par des boulaies-pinèdes à sphaigne palustre et polytrich commun. Elles occupent de belles surfaces à Virennnes, ce qui n'est pas commun en France, mais qui se rencontre, par exemple, dans des contextes de tourbière de concentration des eaux de surface ré-humectée par endiguement au Marais de Limagne ou au Mont Bar plus au sud.

Le rattachement dans les typologies classiques s'avère difficile. Il ne

s'agit pas des Pineraies tourbeuses à Pin sylvestre des Cahiers d'Habitats, mais plus probablement d'une forme de Boulaie pubescentes tourbeuses.

L'autre grand groupe d'unités présentes fonctionne suivant une modalité ombrotrophe. Il se caractérise par la présence de sphaignes rouges (*Sphagnum capillifolium*, *S. rubellum*, *S. medium/divinum* (ex *magellanicum*), *S. russowii*) et d'éricacées. Nous avons également observé la présence de la linaigrette engainante, espèce caractéristique de l'ombrotrophie, en

particulier des stades initiaux. Il ne s'agit probablement pas de systèmes ombrotrophes classiques permis par l'existence d'une fenêtre climatique favorable mais d'éléments ombrotrophes disséminés qui profitent d'une bulle d'humidité atmosphérique dépendante du processus d'émergence, de l'exposition de piémont nord et est, et du contexte forestier (figure IV-4-5). Aucune tourbe d'origine ombrotrophe n'a été observé sur les sondages. Il faut avoir clairement conscience que ces éléments d'ombrotrophie n'ont pas vocation à développer de véritables tourbières ombrotrophes, simplement parce que les conditions climatiques locales ne le permettent pas. L'extension de ces unités ombrotrophes est limitée par la nécessité de maintenir une bulle humide, et donc par le maintien des unités minérotrophes qui génèrent de l'évapotranspiration importante. Il s'agit de ce que l'on nomme une mosaïque variable dans un état dynamique stable (*shifting sosaic steady-state*), contrôlée par une boucle de rétroaction négative : l'extension des unités ombrotrophes limite l'évapotranspiration dont elles ont besoin.

La majorité de ces unités se réalise dans un contexte post-pastoral plus ou moins avancé, mais il existe probablement aussi des unités humides ou tourbeuses dans les parties pâturées non

visitées.

Les différents auteurs ayant travaillé sur la caractérisation floristique des tourbières utilisent le concept de «Prairies humides à molinie». Il s'agit d'un type d'habitat qui regroupe des éléments très divers et de nature fonctionnelle différente, avec la molinie qui réalise une part plus ou moins importante du cortège. On y inclut ainsi différents types de jonçaies, pastorales, des moliniaies pauci-spécifiques, post-pastorales, et des formations plus ou moins boisées à pins et bouleaux comme ici à Virennnes. Il faudra ainsi, à l'avenir, correctement distinguer ce qui ressort des moliniaies au sens strict, qui traduisent des phases post-pastorales transitoires basées sur l'économie du phosphore ; des boulaies-pinèdes à sphaigne palustre, des jonçaies pauci-spécifiques et des jonçaies diversifiées.

Différents auteurs ont aussi signifié le rôle essentiel de la dégradation des ouvrages hydrauliques pour expliquer l'importance des processus de saturation hydrique des sols et de la reprise turfigène. De notre côté, nous pensons que c'est principalement l'arrêt du piétinement des troupeaux qui a permis la mise en place des grands tapis de sphaignes vertes, sur des sols très engorgés même dans les temps de pâturage.

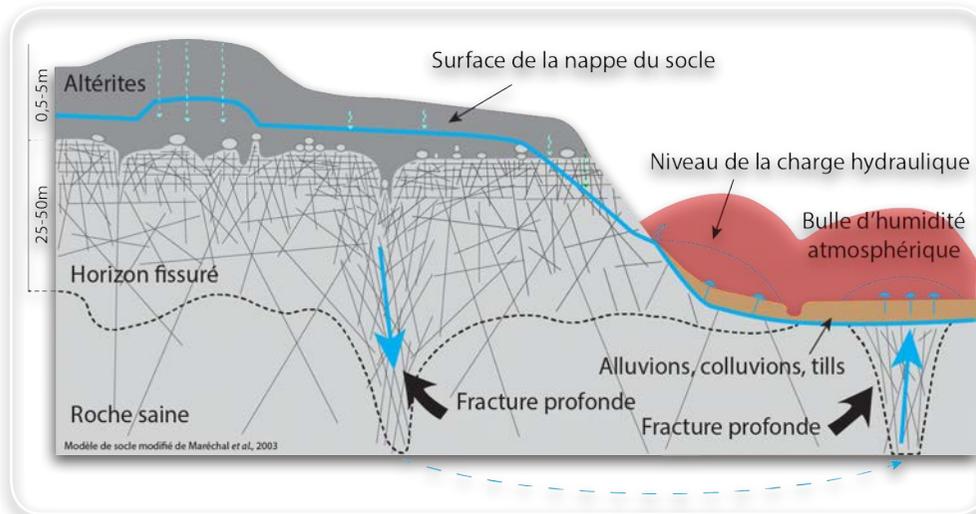


Figure IV-4-5 : Le modèle est dans cette figure enrichi du concept de bulle d'humidité atmosphérique induite par les émergences qui permet la mise en place de communautés ombrotrophes.

# v. **É**valuation et propositions d'actions



La nature post-pastorale des complexes de Virennnes les rend instables par nature, susceptibles de se modifier à court terme. C'est en particulier la colonisation ligneuse qui devrait se tenir encore pendant quelques années, voire des décennies, avec la mise en place, à terme, de boulaies à sphaignes et localement d'aulnaies, si le phosphore ne peut pas être stocké de manière pérenne dans la tourbe. Cela ne veut pas pour autant dire que les communautés ombrotrophes ne se maintiennent pas localement. On peut s'attendre à ce que la plus marquante évolution se tienne au niveau des tremblants de sources avec la mise en place de sau-laies.

L'ensemble des complexes visités apparait répondre à une évaluation de l'état de conservation «favorable», au sens de la démarche indiquée dans la directive Natura 2000, à savoir que les

processus écologiques à l'œuvre sont de nature à maintenir les Habitats d'intérêt communautaire, certains s'orientant à termes vers des Habitats d'intérêt communautaire d'une autre nature mais plus stables dans le temps (la plupart des Habitats s'orientant vers des Boulaies à sphaignes). Bien-sûr, les Prairies à molinie sont vouées à disparaître, étant donné que leur déterminisme est pastoral. Sur la base de l'analyse pé-dologique, il est évident que le site est en excellente dynamique de stockage de carbone dans le sol.

Le cadre du prédiagnostic n'est pas celui de recommandations détaillées et adaptées aux différentes unités fonctionnelles d'un complexe et encore moins d'un méta-complexe comme celui de Virennnes. Ceci-dit, nous pouvons proposer un cadre général de besoin d'action en termes de connaissance, de gestion ou de suivi.

## V.1 - Actions de connaissance

Autant pour les communautés ombrotrophes que pour les unités minérotrophes, la force motrice des tourbières de Virennnes est le processus d'émergence. La compréhension à minima des logiques d'écoulement souterrain est donc une priorité d'action pour ce qui concerne la connaissance. Sachant que ce type d'étude est rendu difficile par le recours à la caractérisation à minima de la structure

géologique, action complexe et coûteuse, le plus simple serait de travailler d'abord sur les signaux de sortie des nappes que sont les modalités de saturation des sols des émergences et les propriétés physico-chimiques des eaux de ces émergences, soit de manière directe (mesures T°, pH, CE de terrain, complétées par de l'analyse de laboratoire), soit indirecte, avec une cartographie de bio-indicateurs fonctionnels,



principalement des espèces d'émergence, plantes vasculaires et bryophytes.

De manière plus générale, une bonne cartographie des unités fonctionnelles et de certaines espèces de plantes serait utile à une définition des unités clés pour la gestion conservatoire. Il s'agit d'une action importante, mais difficile et des compétences spécifiques en tourbières et en particulier sur les bryophytes de ces milieux sont indispensables.

On peut ajouter que de manière détournée, la cartographie de bio-indicateurs permettra aussi d'établir une cartographie des émergences comme celle débutée lors de la visite de terrain (figure V-2-1)

Des compléments de connaissance sur les sols et en particulier une cartographie des épaisseurs de tourbe sur les secteurs encore non connus de ce point de vue serait utile à une meilleure compréhension du fonctionnement général et local.

Les suivis des niveaux d'eau et les cartographies de bio-indicateurs et d'unités écologiques que nous

préconisons constituent également la base d'un suivi fonctionnel que nous présenterons ci-après.

## V.2 - Actions de gestion

En accord avec les différents auteurs qui ont travaillé sur la question, nous préconisons comme principale action de gestion le laisser faire «actif», dans le sens où le suivi constitue une action déterminante, à vocation d'alerte et d'évaluation. La notion d'alerte fait référence à la mise en place de protocoles d'évaluation ou de gestion dès que la dynamique apparait ne plus être en accord avec l'état favorable constaté

actuellement.

La seule action précise que nous proposons est la neutralisation des épicéas pour éviter leur impact néfaste sur le milieu, soit en coupe directe des jeunes individus avec exportation hors tourbière, soit par annélation pour les grands individus dont la coupe impacterait le sol.

## V.3 - Actions de suivi

Le suivi constitue donc une sorte d'action fondamentale de gestion conservatoire sur un site comme Vireennes.

Cependant, suivre l'état d'une tourbière n'est pas simple, et c'est encore plus difficile lorsqu'on a affaire avec un méta-complexe et de surcroît boisé, ce qui ne permet pas l'utilisation de photographies aériennes ou au drone.

Actuellement, les méthodes les plus appliquées sont relatives à la composition et la structure floristique, d'une part, et aux variations de niveau d'eau,

d'autre part. Le suivi des variations d'épaisseur de tourbe sont aussi possible, mais leur exploitation nécessite des temps longs.

Concernant la composition et la structure floristique, le suivi peut s'effectuer à plusieurs échelles, celle du site, celle du transect (=profil) et celle de la placette. Elle peut aussi se réaliser à l'échelle du taxon et à celle de la communauté.

Pour le suivi floristique, nous recommandons un travail de cartographie des unités écologiques et de bioindicateurs

par des personnes spécialisées, compétentes en tourbières (ce qui impose la connaissance des mousses de tourbière). Nous recommandons aussi la réalisation de profils de structure et de suivi à l'échelle du mètre et du taxon. Ceci correspond à réaliser un inventaire des taxons sur un continuum de

placettes mesurant un mètre sur 20 cm, entre deux bornes de référence. Un profil de 50 m génère donc 50 relevés. Ceci est différent du protocole proposé par les Herbiers universitaires qui correspond en fait à la réalisation de quelques relevés sur un transect, dont le nombre et la surface sont choisies de

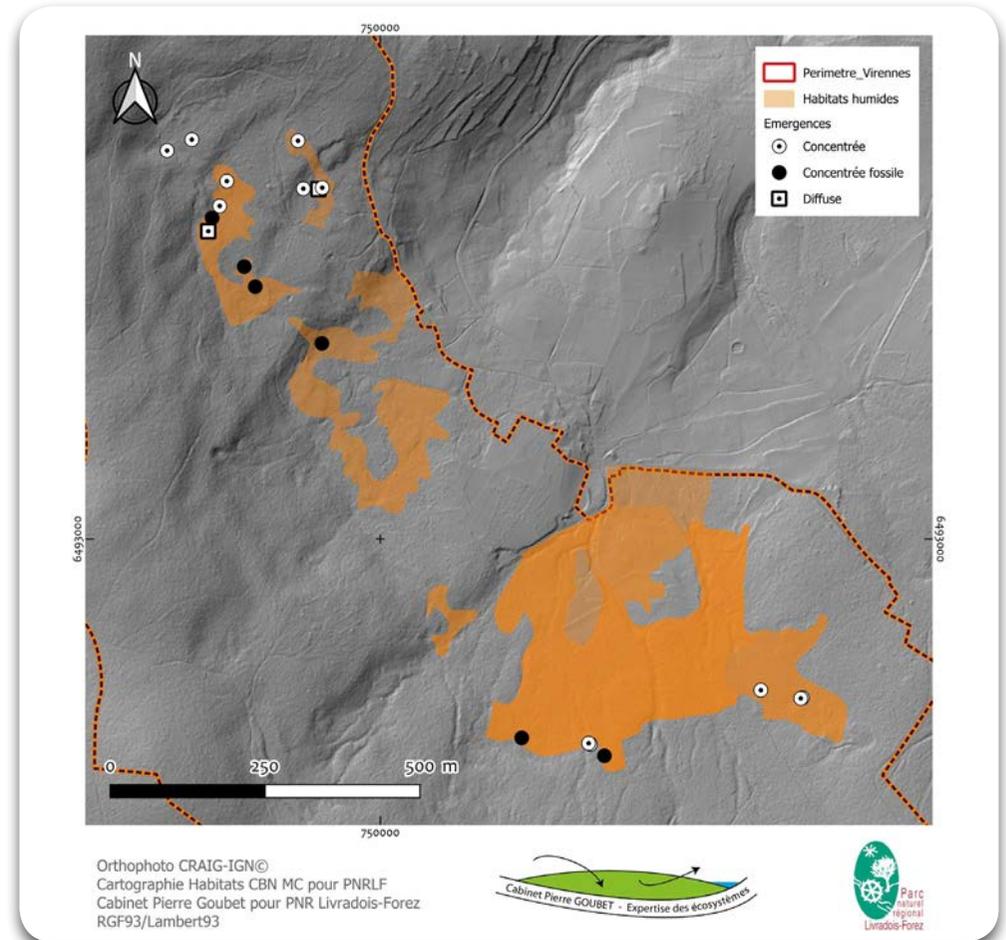


Figure V-2-1 : cartographie partielle des émergences suivant leur type réalisée lors de la visite.

manière arbitraire par l'opérateur. La pondération du taxon est ensuite évaluée par l'opérateur suivant ses propres critères. Il paraît impossible, dans ces conditions, de pondérer les mousses. La méthode que nous proposons est basée sur une indication de la présence d'une espèce sur une surface donnée, de manière indépendante de l'observateur et reproductible. Les analyses pouvant être réalisées sur les données intègrent toutes celles pouvant être produites sur les transects types Herbiers,

et bien d'autres encore.

Pour le suivi des niveaux d'eau, nous préconisons exclusivement l'usage de sondes de pression submersibles et d'appareillages légers (tubes de 32 mm longs de 1 m percés en usine (résille standardisée). Le pas de mesure est de 15 ou 30 minutes.

Le suivi des variations d'épaisseurs de tourbe se réalise avec des perches métalliques ancrées dans le substrat

minéral sous la tourbe.

Au-delà, un plan de suivi global nécessite une amélioration des connaissances en termes de cartographies des bio-indicateurs et unités écologiques, une action prioritaire, ainsi qu'une caractérisation des aménagements hydrauliques et des écoulements de surface.

En complément, parce que les systèmes d'urgence sont dépendants

des nappes qui les alimentent, nous préconisons de suivre et de faire évaluer tous projets de prélèvement d'eau sur le massif rocheux à une altitude supérieure aux émergences.

L'importance de la qualité du suivi et la complexité des processus en jeu et du site met en évidence la nécessité d'élaborer un plan de suivi comme une action en soi, préliminaire à la mise en place des différents protocoles.

	Types	Lieux (unités) d'application	Priorités
Connaissance	Cartographie de bio-indicateurs	Partout	1
	Cartographie d'unités écologiques	Partout	1
	Caractérisation des régimes de niveau d'eau	Émergences concentrées et diffuses + éventuellement autres éléments (rus, drains)	1
	Caractérisation des épaisseurs de tourbe	Entité sud-est	2
	Cartographie des aménagements hydrauliques	Partout	1
Gestion	Résumée à un suivi d'alerte et d'évaluation	Partout	1
	Neutralisation des épicéas	Partout	1
Suivi	Cartographie de bio-indicateurs	Partout ou lieu choisi après évaluation	1
	Cartographie d'unités écologiques	Partout ou lieu choisi après évaluation	1
	<b>Profils de structure et de suivi</b>	Lieu choisi après évaluation	1
	Caractérisation des régimes de niveau d'eau	Lieu choisi après évaluation	1
	Veille sur les projets de prélèvements d'eau	Massif rocheux au-dessus des tourbières	1

Tableau V-1-1 : récapitulatif des actions proposées en termes de connaissance, gestion et suivi.

# VI. **R**ésumé-conclusion



Le hameau de Virennas est bordé à l'ouest et au sud d'une série de complexes tourbeux occupant les versants.

Une visite de terrain et l'analyse rapide de la géologie et des données de relief permettent de définir que ces zones humides sont des tourbières d'émergence de versant sur socle non englacé à secteurs d'ombrotrophie assistée probables.

En effet, de nombreuses émergences semi-concentrées soit actives, soit fossiles ont été observées dans un état parfaitement typique pour le Massif central plutonique et métamorphique. Des secteurs d'émergence diffuse sont aussi présents, là encore dans un état typique. De manière plus originale, des secteurs ombrotrophes sont assez bien représentés, dans une forme discontinue, boisée, qui laisse présumer

d'une dépendance forte à l'humidité atmosphérique locale probablement issue des systèmes d'émergence. L'ombrotrophie y est donc « assistée » et ne présente pas le caractère typique des systèmes permis par une fenêtre climatique régionale comme c'est le cas sur les crêtes du Forez. Aucune tourbe ombrotrophe n'a été observée lors de la visite.

D'un point de vue dynamique, les tourbières de versant de Virennas se tiennent dans le cadre d'un post-pastoralisme lui aussi typique, dans un stade assez avancé par endroit. On peut y distinguer deux axes majeurs : celui des systèmes d'émergence, où les ligneux comme les saules et les bouleaux apparaissent en phase de colonisation élevée, et les systèmes ombrotrophes, où les pins, moins exigeants que les saules et bouleaux, sont

déjà bien présents et jouent probablement un rôle de renfort dans les effets de bulle d'humidité atmosphérique.

L'analyse du relief fin permise par la disponibilité d'un MNT à 1m issu d'un lidar met en évidence une fracturation importante du substrat qui détermine une partie des formes du versant, là où se tiennent de nombreuses émergences. Cela correspond aux parties hautes des complexes. En aval, à l'approche du bas de versant aux formes correspondantes aux dépôts de colluvions, les émergences diffuses semblent plus représentées.

Une spatialisation correcte des éléments hydrologiques et de bio-indicateurs fonctionnels permettrait certainement de mieux comprendre le fonctionnement et le potentiel de chacun des secteurs humides avec comme

conséquence une meilleure définition du potentiel d'état des différentes unités fonctionnelles suivant les modalités de gestion envisageables. En complément, une caractérisation des régimes d'émergence permettrait de valider le modèle fonctionnel et d'établir un état zéro dans le cadre d'un suivi à long terme, en partie au regard particulier de la dérive climatique. Dans cette logique, la compréhension des phénomènes à l'origine de l'arrêt du fonctionnement de certaines émergences dites fossiles nous paraît nécessaire.

Pour limiter la colonisation ligneuse, il n'y a pas d'autre choix que la remise en place d'un pâturage, ce qui ne nous apparaît pas nécessaire vu la dynamique actuelle qui mène à la mise en place d'une boulaie à sphaignes. Nous recommandons aussi la neutralisation des épicéas.



# VII. Bibliographie



Boulaine J. (1995). Quatre siècles de fertilisation. *Étude de la gestion des sols*, 2(3), 201-208.

Boulaine J. (2006). Histoire de la fertilisation phosphatée. *Étude et gestion des sols*, 13(2), 129-137.

Brenas I., Ferraton M., Loiseau V., Meley A., Monnier C., Muntaner N., Rollinger R., Valorge A. (2010). Expertise concernant le fonctionnement hydrologique et l'état de l'histosol de la tourbière de Virennnes (commune Le Monestier, Puy-de-Dôme). Site NATURA 2000 FR 8302002. «Tourbière du Haut-Livradois, complexe tourbeux de Virennnes». Stage étudiants de MASTER 1ère année «Territoires, Patrimoines et Environnement». 70 p. + annexes.

Cairney J. W. & Chambers S. M. (Eds.). (2013). *Ectomycorrhizal fungi key genera in profile*. Springer Science & Business Media.

Goubet P. (2011a). Compte rendu d'expertise commandée par le Conservatoire Régionale d'Espaces Naturels Rhône-Alpes. Caractérisation paléocologique du complexe tourbeux de La Béroutte (Les Neyrolles, Ain, France). Cabinet Pierre Goubet, Jenzat, 12 p.

Goubet P. (2011b). Compte rendu d'expertise commandée par le Syndicat Intercommunal d'Aménagement du Bassin Versant de l'Albarine. Diagnostic fonctionnel du complexe tourbeux du Montoux (Brénod, Ain, France). Cabinet Pierre Goubet, Jenzat Volume 1 (texte), 25 p. Volume 2 (figures), 35 p.

Goubet P. (2013). Compte rendu d'étude commandée par le CEN Rhône-Alpes. Pourquoi, à la suite de quelques fauches, les moliniaies de l'étang de Brénod (Ain) régressent au profit des cariçaies ? Le rôle de l'eau et du phosphore. *Chroniques piézométrique 2012-2013 et conclusion de l'étude*. Cabinet Pierre Goubet, Jenzat, 16 p.

Lachassagne P., Dewandel B., & Wyns R. (2014). The conceptual model of weathered hard rock aquifers and its practical applications. *Fractured Rock Hydrogeology*, (20), 13-46.

Sjögren P., Van der Knaap W. O., Van Leeuwen J. F. N., Andrič M. & Grünig A. (2007). The occurrence of an upper decomposed peat layer, or "kultureller Trockenhorizont", in the Alps and Jura Mountains. *Mires and Peat*, 2(Article 5), 1-14.

Thébaud G. (2018). Suivi d'habitats d'intérêt européen de l'écosystème tourbeux de Virennnes (Le Monestier, 63). Site Natura 2000 (FR 8302002). Etude comparative 2009-2012-2017. Université-Clermont-Auvergne; UNIVEGE/Herbiers CLF. 46 p.

Tóth J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68(16), 4795-4812.



Photo : Coline Peignelin

**Résumé en page 43.**

GOUBET P. (2024). Compte rendu d'étude commandée par le Parc naturel régional du Livradois-Forez. Prédiagnostic fonctionnel du site Natura 2000 «Tourbière du Haut-Livradois : complexe tourbeux de Virennnes» (Le Monestier, Puy-de-Dôme). Cabinet Pierre Goubet, Ardes-sur-Couze, 45 p.

Expertise des Écosystèmes - Cabinet Pierre GOUBET  
9, rue de la Petite Côte - 63 420 Ardes-sur-Couze  
Téléphone : 09 67 45 69 53 - Mobile : 06 09 84 96 11  
pierre.goubet@sphagnum.fr - Siret: 49539019700020