

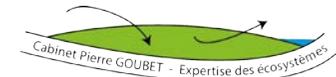
Compte rendu d'étude commandée par



Diagnostic fonctionnel des tourbières des sites Natura 2000 de Puisaye



Pierre Goubet 2021

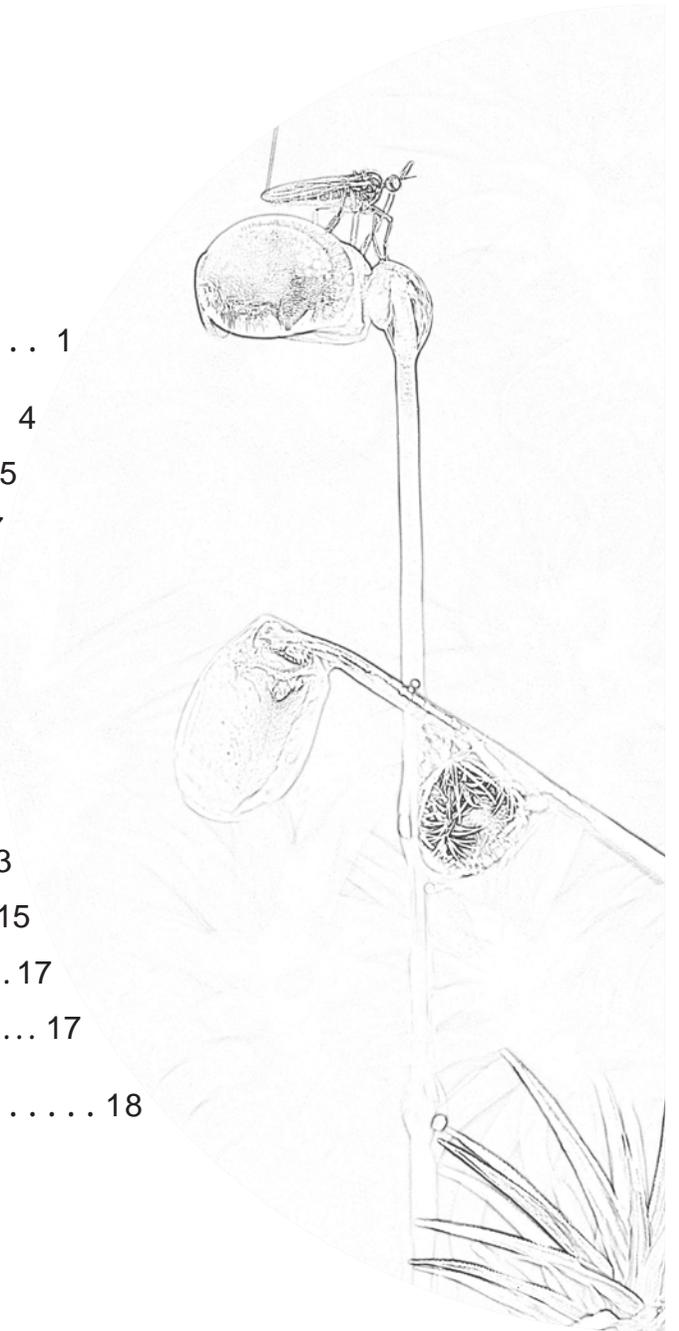


Réalisé avec le soutien financier de:

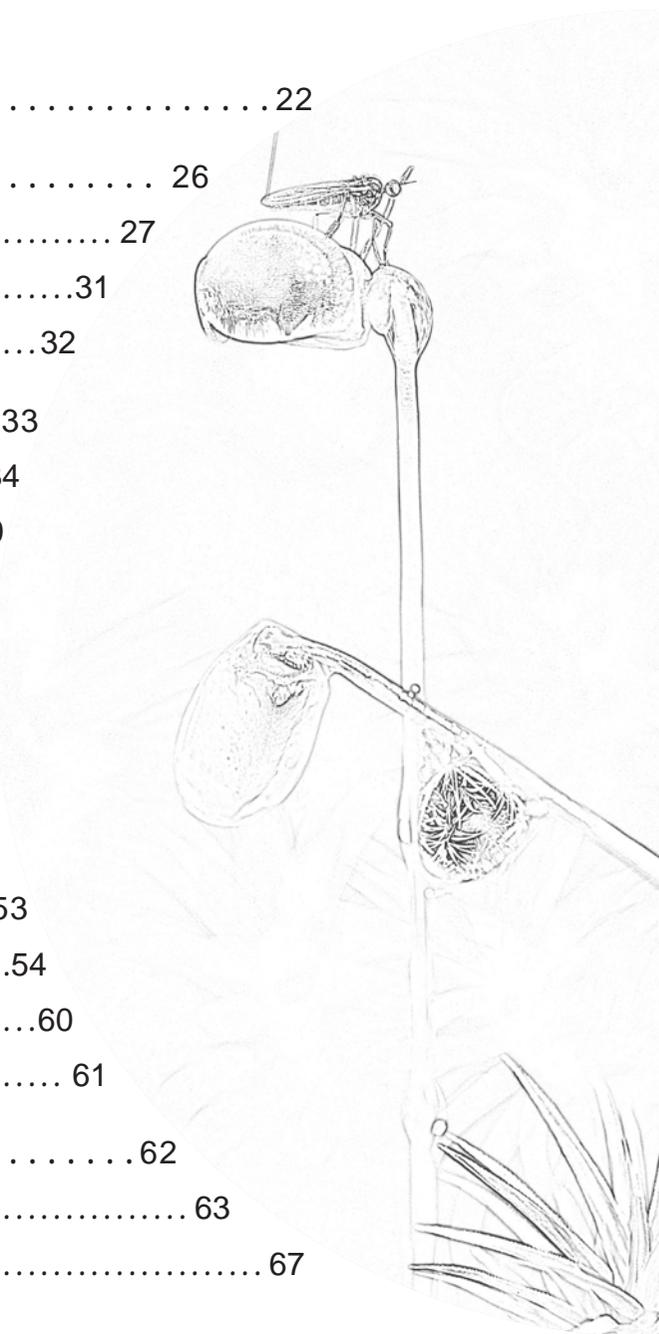


Table des matières

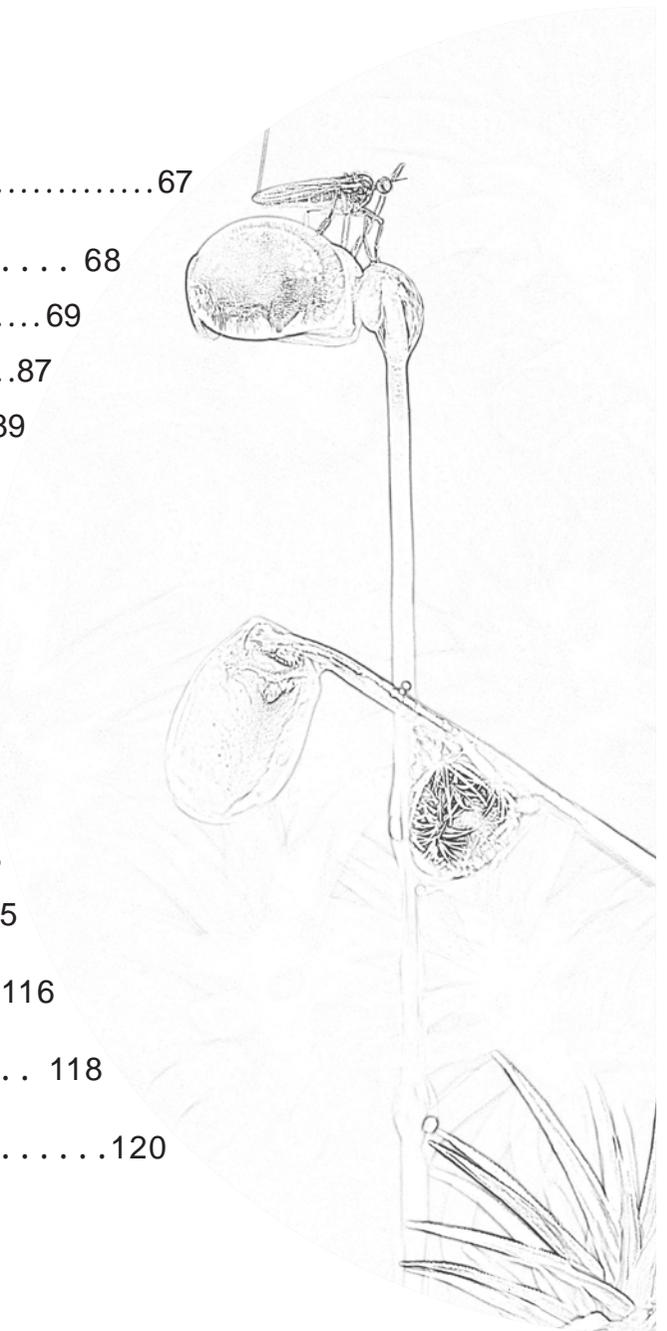
I.	Introduction	1
II.	Méthodes.....	4
	<i>II.1 - Démarche globale de diagnostic.....</i>	<i>5</i>
	<i>II.2 - Relief et dérivées.....</i>	<i>7</i>
	<i>II.3 - Géologie et géomorphologie</i>	<i>8</i>
	<i>II.4 - Caractérisation des épaisseurs de tourbe.....</i>	<i>9</i>
	<i>II.5 - Caractérisation pédo-paléocologique de terrain</i>	<i>10</i>
	<i>II.6 - Analyse des macrorestes.....</i>	<i>11</i>
	<i>II.7 - Datation au carbone 14 (¹⁴C)</i>	<i>12</i>
	<i>II.8 - Caractérisation des unités fonctionnelles.....</i>	<i>13</i>
	<i>II.9 - Caractérisation piézométrique</i>	<i>15</i>
	<i>II.10 - Photographies aériennes anciennes</i>	<i>17</i>
	<i>II.11 - Synthèse fonctionnelle et recommandations.....</i>	<i>17</i>
III.	Contexte, relief et géologie	18



IV. Analyse piézométrique: généralités à l'échelle des sept sites étudiés	22
V. L'étang de Guédelon	26
V.1 - Résultats-données.....	27
V.2 - Interprétation fonctionnelle	31
V.3 - Propositions d'action	32
VI. Les Carrières	33
VI.1 - Résultats-données.....	34
VI.2 - Interprétation fonctionnelle.....	40
VI.3 - Propositions d'action	40
VII. Chassin.....	41
VII.1 - Résultats-données	42
VII.2 - Interprétation fonctionnelle	51
VII.3 - Propositions d'action.....	51
VIII. Guédelon sud	53
VIII.1 - Résultats-données.....	54
VIII.2 - Interprétation fonctionnelle	60
VIII.3 - Propositions d'action	61
IX. Les Pâtures Pourries.....	62
IX.1 - Résultats-données.....	63
IX.2 - Interprétation fonctionnelle.....	67



IX.3 - Propositions d'action	67
X. Les Comailles.....	68
X.1 - Résultats-données.....	69
X.2 - Interprétation fonctionnelle	87
X.3 - Propositions d'action	89
XI. Les Bergeries.....	91
XI.1 - Résultats-données.....	92
XI.2 - Interprétation fonctionnelle.....	103
XI.3 - Propositions d'action	104
XII. Synthèse fonctionnelle à l'échelle de la Puisaye.....	105
XII.1 - Rappels généraux sur les milieux tourbeux et les boulaies en particulier	106
XII.2 - Origine et état des complexes.....	113
XII.3 - Etats futurs potentiels	115
XIII. Synthèse des propositions d'action	116
XIV. Résumé-Conclusion	118
XV. Bibliographie.....	120



I. Introduction



Ce document correspond au compte rendu d'une étude commandée par la Communauté de communes de Puisaye-Forterre, gestionnaire du site Natura 2000 intitulé «Milieux humides et habitats à Chauves-souris de Puisaye-Forterre» (FR2601011) et qui résulte de la fusion des anciens sites FR2601011 et FR2600991.

L'objectif de l'étude, dont le contenu formel de la commande est présenté dans l'encart page suivante, est de procéder aux diagnostics fonctionnels:

- de la boulaie à sphaignes des Comailles (Saint-Sauveur-en-Puisaye, 89);

- des boulaies à sphaignes des étangs de Chassin et Guédelon (Treigny, 89) ;

- de la boulaie à sphaignes des marais des Bergeries (Saint-Sauveur-en-Puisaye, 89).

Ces boulaies sont considérées d'intérêt communautaire prioritaire sous l'intitulé générique Boulaies pubescentes tourbeuses de plaine, codé 91 DO*-1.1.

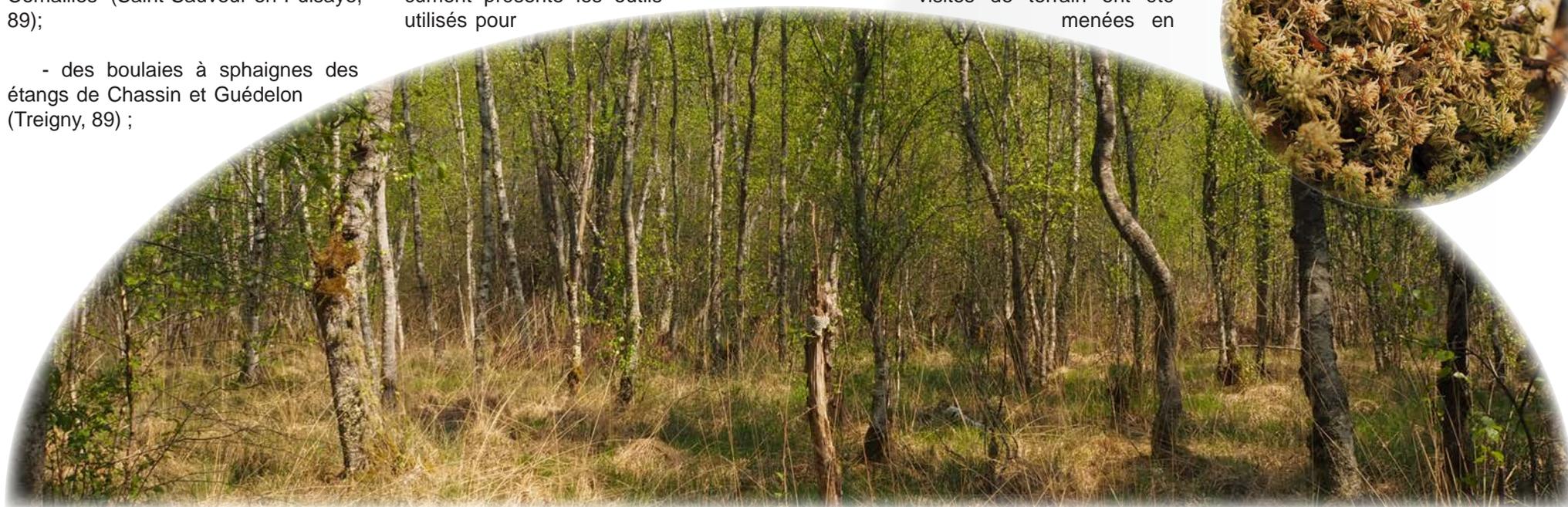
Bien-sûr, les autres Habitats tourbeux présents ont fait l'objet d'une description, à l'exception des aulnaies non connectées directement au système occupé par les boulaies.

Après cette introduction (I), ce document présente les outils utilisés pour

réaliser ces diagnostics (II), le contexte, le relief et la géologie de l'ensemble des sites sont ensuite présentés (III), ainsi que des généralités concernant l'analyse piézométrique à l'échelle des sept sites (IV). Les résultats par site font l'objet des parties suivantes (V à XI), permettant une discussion sous la forme d'une synthèse fonctionnelle à l'échelle de la Puisaye (XII) suivie de préconisations d'actions (XIII). Il se poursuit par un résumé-conclusion (XIV) et se termine par une liste bibliographique (XV).

Ce travail a été réalisé avec la collaboration de Christine Goubet. Les visites de terrain ont été menées en

compagnie de Cécile Lemoine (Communauté de Communes de Puisaye-Forterre), de Marina Melan et Tiffany Haenn, respectivement stagiaires à la Communauté de communes de Puisaye-Forterre et à la DDT de l'Yonne, Cédric Foutel (Conservatoire d'espaces naturels de Bourgogne), Messieurs Huré et Cendre du Château de Guédelon.



Contenu de la commande

Ce travail a pour but de comprendre le fonctionnement de boulaies à sphaignes des périmètres Natura 2000 du territoire de la Communauté de communes de Puisaye-Forterre pour en assurer la conservation.

La démarche proposée est celle du diagnostic fonctionnel des écosystèmes tourbeux développée par nous et mise en pratique dans de nombreux contextes en France.

Le Larousse propose la définition du terme diagnostic ainsi : « Ensemble de mesures, de contrôles faits pour déterminer ou vérifier les caractéristiques techniques d'un système à des fins de maintenance ou d'amélioration. (Exemple : diagnostic d'un véhicule, diagnostic thermique d'un bâtiment.) » (<http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/diagnostic/25154>). Le diagnostic fonctionnel des écosystèmes tourbeux s'appuie lui aussi sur un ensemble de mesures pour déterminer les modalités de fonctionnement des complexes tourbeux et permettre leur maintenance sous forme de gestion ou leur amélioration sous forme de restauration écologique.

Le diagnostic fonctionnel des écosystèmes tourbeux est un protocole qui se décline en 3 étapes successives qui peuvent être répétées si nécessaires: une description, une synthèse fonctionnelle et une série d'évaluations et de recommandations.

Le diagnostic fonctionnel des boulaies à sphaignes des périmètres Natura 2000 de la Communauté Puisaye-Forterre va se décliner en quatre volets. Le premier volet sera dédié à la description de la composition et de la structure des complexes du point de vue des communautés végétales, des sols et du relief de surface et de subsurface. Le second volet concernera la caractérisation des transferts à travers une description des variations des niveaux d'eau (piézométrie). Le troisième volet aura pour but de décrire au mieux les communautés végétales à l'origine de la tourbe des secteurs tourbeux rencontrés. Le quatrième et dernier point sera celui de la synthèse fonctionnelle, des évaluations et des recommandations.



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. 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 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

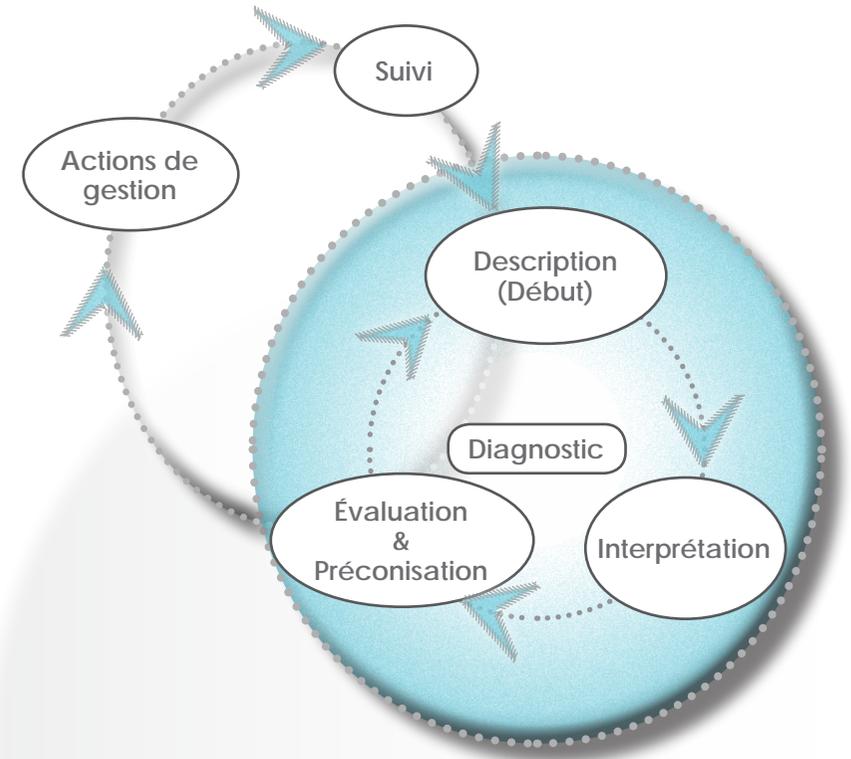


Figure II-1-1: structure du diagnostic. Le diagnostic constitue une suite logique d'actions qui débute par une description des systèmes tourbeux. A partir des données descriptives, une interprétation fonctionnelle est ensuite réalisée en comparant les résultats obtenus aux modèles de fonctionnement proposés 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.

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.).

Dans le cadre de cette étude des tourbières de Puisaye, les diagnostics fonctionnels ont été conçus pour traiter des volets structure, transferts et diachronie, de manière adaptée à chacune des zones d'étude et en fonction des autorisations faites par les propriétaires des parcelles concernées.

La structure a été généralement caractérisée à travers une estimation des épaisseurs de sédiments meubles à la perche, une description de terrain des sols, quelques cartographies d'unité écologiques.

La diachronie, par une analyse des macrorestes sur le site des Comailles, avec une datation au carbone 14, et l'étude des photographies anciennes. L'étude des transferts a concerné l'eau, à travers une analyse de suivi des niveaux d'eau du sol.

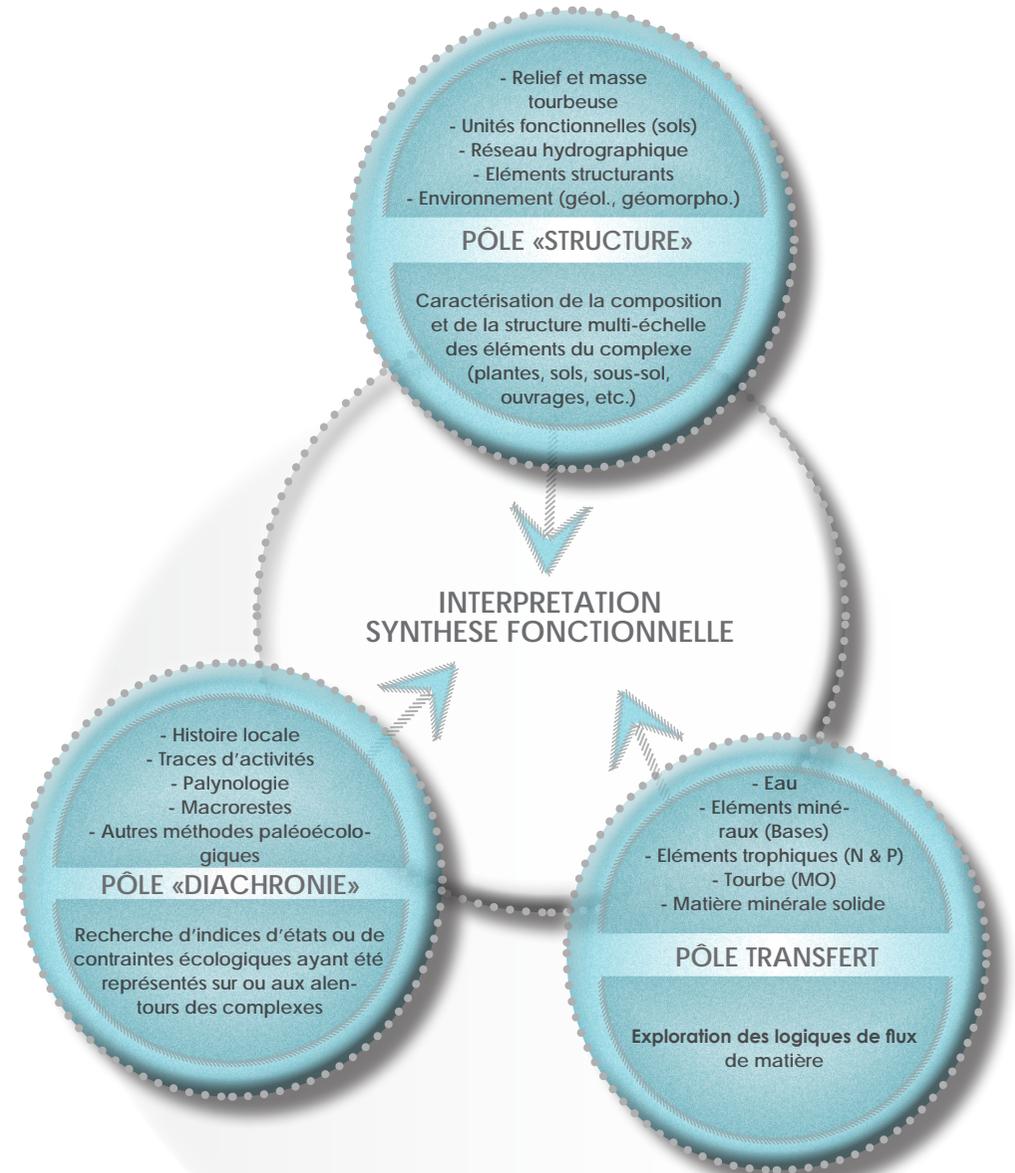


Figure II-1-2: les 3 pôles du diagnostic avec les corps de données relatifs à chacun. Chacun des éléments des pôles, fait l'objet de protocoles clairement définis. La synthèse fonctionnelle et les évaluations et préconisations sont sensées faire aussi l'objet de protocoles stricts, mais ceux-ci sont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

Dans le cadre de cette étude, le relief est décrit par le modèle numérique de terrain (MNT) à 5 m du RGEAlti de l'IGN.

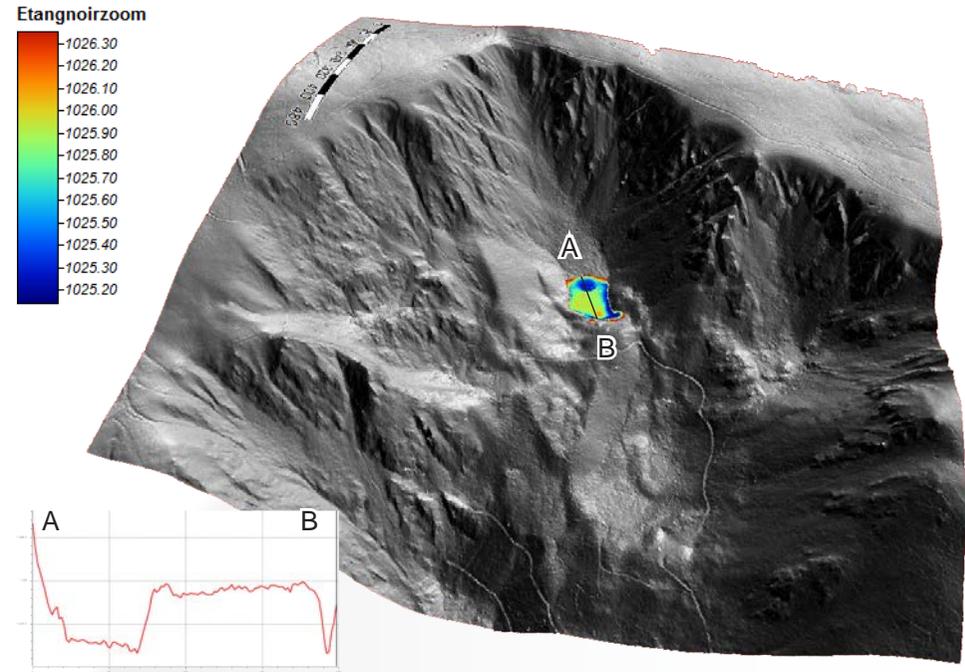


Figure II-2-1: représentation du relief sous forme ombrée (en gris) et sous forme colorée (zone humide seulement) à partir d'un MNT de maille 1 m (CIGAL-IGN). En bas à droite, profil topographique issu du même MNT et représentant le relief en coupe du point A au point B.

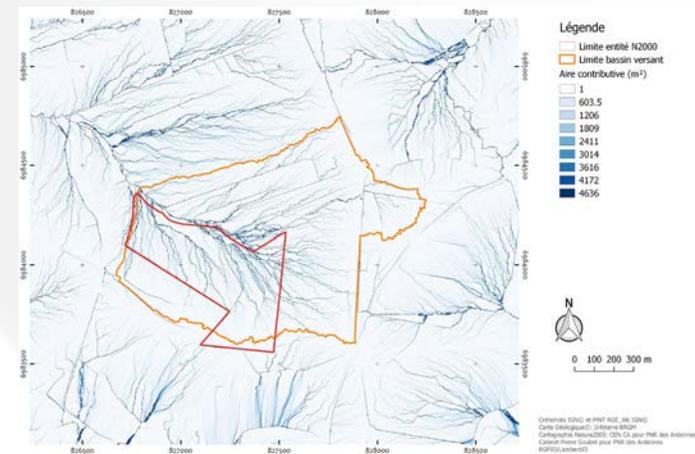


Figure II-2-2: modélisation des écoulements de surface à partir d'un MNT de maille 1 m (IGN).

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

Lors de ce travail, la prise en compte des données géologiques et géomorphologiques a été réalisée sur la base des cartes et dossiers consultables sur Infoterre-BRGM. La recherche d'autres sources bibliographiques n'a pas permis de trouver d'information complémentaire.

au sens large, intégrant 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.

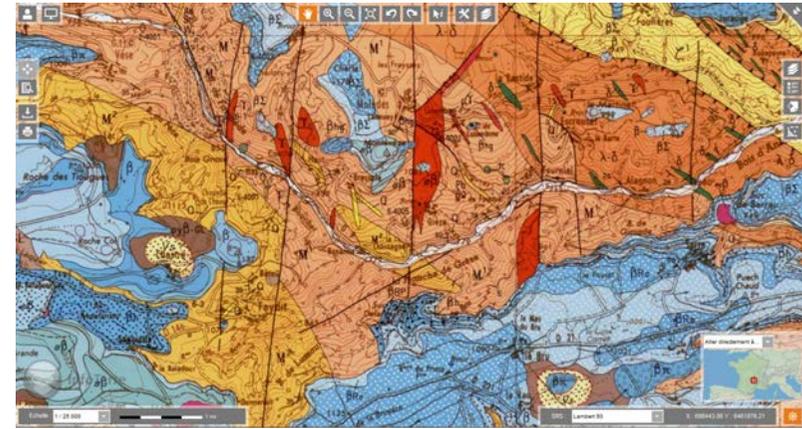


Figure II-3-1: page de consultation des informations géologiques sur le site spécialisé du BRGM (<http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do>).

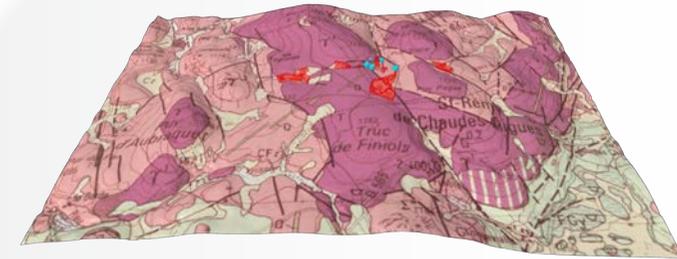


Figure II-3-2: usage des fonds de cartes géologiques à travers un flux WMS sur logiciel SIG. Ici, l'information géologique est croisée avec le relief et le contour des édifices tourbeux.

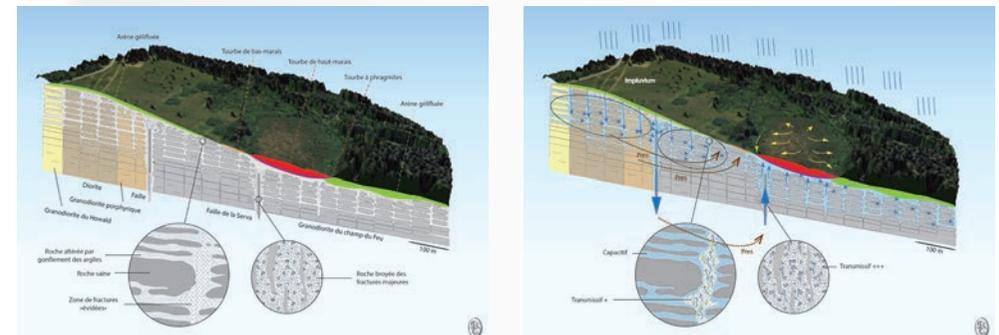


Figure II-3-3: exploitation à des fins de modèle hydrogéologique et fonctionnel des données géologiques. Le relief, la structure géologique et l'altération des roches conditionnent les écoulements qui eux-même conditionnent la présence des différentes tourbières.

II.4 - Caractérisation des épaisseurs de tourbe

La présence de tourbe, l'épaisseur du dépôt, nommé aussi «puissance» de la couche, 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.

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.

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.

La caractérisation des épaisseurs de tourbe a été réalisée à la perche métallique, lors des visites de terrain.

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

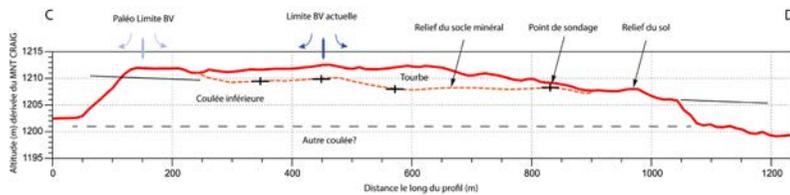


Figure II-4-4: utilisation des données d'épaisseurs de tourbe en coupe, croisées avec un MNT à 10 m (CRAIG).

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.

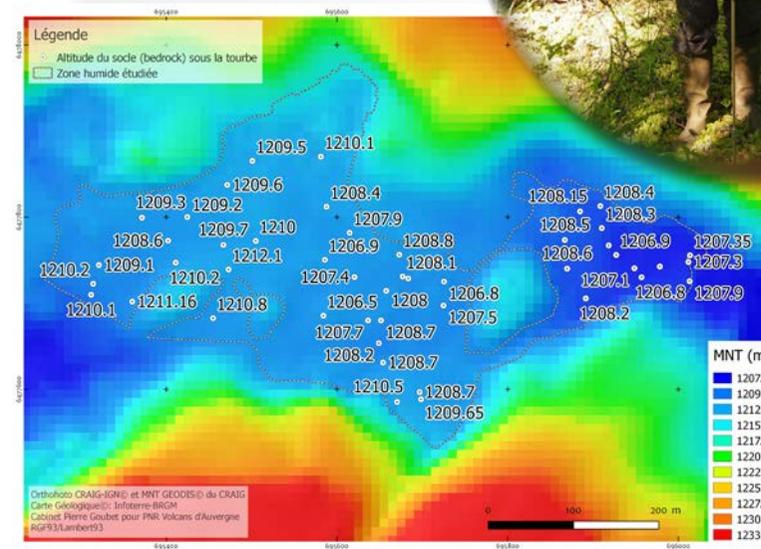


Figure II-4-3: altitude du socle minéral sous la tourbe calculé à partir d'un MNT à 10 m (CRAIG).

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 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.

L'analyse pédo-paléocologique de terrain a été réalisée lors du parcours à des fins de diagnostic des sites et lors de la pose des piézomètres.



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

Généralités sur les sols tourbeux

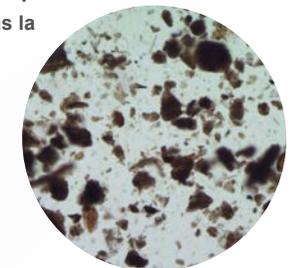
Le terme d'HISTOSOLS est proposé par les pédologues pour désigner les sols tourbeux, les sols constitués de tourbe, la tourbe étant définie comme un matériau contenant une forte part de matière organique d'origine végétale (part variable suivant les classifications).

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.



Microagrégats de matière organique.

II.6 - Analyse des macrorestes

L'analyse des macrorestes a vocation à décrire les différentes communautés végétales s'étant succédé en des points précis du complexe. Elle est un exercice difficile, axée sur un objectif précis; il ne s'agit pas de réaliser une description détaillée, en particulier du point de vue des quantités absolues des macrorestes. Cette analyse est réalisée en trois temps : une phase de terrain, une phase de laboratoire et une phase d'exploitation des résultats.

II.6.A - Phase de terrain

L'extraction des carottes est réalisée à l'aide du carottier russe.

Une fois extraites, les carottes sont photographiées et placées dans des demi-tubes en PVC, référencés. Elles sont ensuite emballées dans

un film plastique.

La localisation des sondages est enregistrée au GPS de précision métrique.

II.6.B - Phase de laboratoire

Au laboratoire, les échantillons de carottes prélevés sont déballés, puis un fragment est extrait à l'aide d'un tube cylindrique (seringue). Ce prélèvement représente un volume de 4,7 cm³ environ (figure II-6-1). Les échantillons sont analysés, en diluant la matière dans une boîte plastique mesurant 9,7 x 6,5 cm (figure II-6-1).

Les carottes sont conservées pendant toute l'étude afin d'y avoir recours en cas de besoin.

Dans le cadre de l'étude, deux techniques ont été mises en place: (1) celle de la collecte d'échantillons de certains horizons seulement lors de la réalisation des carottages de terrain; (2) celle de l'analyse détaillée en laboratoire d'un profil réalisé aux Co-mailles.



Figure II-6-1 : échantillons pour analyse des macrorestes brut (a) et prêt à être analysé (b).

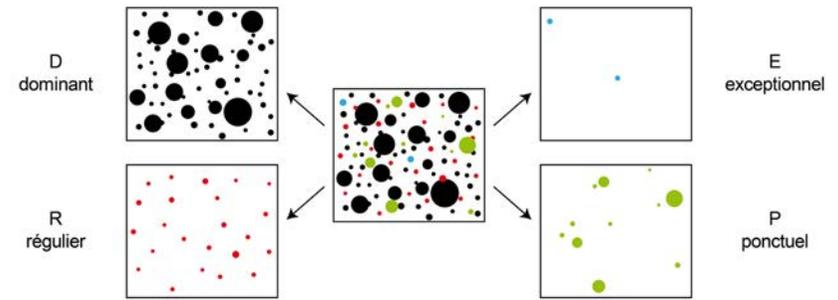


Figure II-6-2 : schéma présentant la signification des coefficients de recouvrement utilisés.

II.6.C - Analyse des échantillons

La phase d'analyse des échantillons consiste en une identification des macrorestes présents suivie d'une quantification approximative.

L'identification est réalisée à l'aide d'une loupe binoculaire et d'un microscope. Dans le cadre de l'analyse d'un sondage complet, la quantité des éléments présents est estimée sur la base de quatre niveaux allant de dominant (d) à exceptionnel (e), en passant par régulier (r) et ponctuel (p) (figure II-6-2).

Les données sont ensuite compilées dans des tableaux avec en ordonnées les profondeurs des échantillons en cm, espacés de 10 cm en commençant à -7 cm, pour ne pas échantillonner dans les parties hautes et basses de la carotte, proches des bords et potentiellement perturbées. En abscisses, sont présentés les contenus des échantillons avec une première série qui décrit les proportions, en pourcentages, des fibres, des

microagrégats et des particules minérales. La présence de charbon est indiquée dans une autre colonne. Ensuite, le contenu en macrorestes de type racines et radicules indéterminées est présenté. La détermination tente d'être la plus précise possible. Les racines et radicules des monocotylédones et dicotylédones autres que ligneuses sont présentées dans une colonne propre. Le plus souvent, les racines de ligneux sont reconnaissables et peuvent être présentées à part. Lorsque possible, une distinction entre ligneux hauts et ligneux bas est réalisée et des colonnes distinctes sont proposées. Le reste des macrorestes, en général de meilleure précision taxonomique, est présenté ensuite, vers la droite du tableau. Il est important d'avoir conscience que la détermination des macrorestes est parfois très difficile, que la marge d'erreur reste grande. Certaines des propositions de détermination s'appuient sur des choix induits par l'écologie perçue sur les autres macrorestes. Ces propositions de détermination sont justifiées lors de l'interprétation des tableaux.

II.7 - Datation au carbone 14 (^{14}C)

L'élément carbone présente une diversité de son contenu en certaines particules élémentaires; il se présente donc suivant différents isotopes, dont un, le carbone 14, qui peut être utilisé pour dater la matière organique jusqu'à des âges de 50 000 ans.

Le principe repose sur la capacité de cet isotope, qui est créé par un rayonnement cosmique et instable, de se transformer en «carbone classique». Il existe ainsi dans l'atmosphère, l'océan et la biosphère, une proportion connue, mais variable, de carbone 14 par rapport au carbone total. Une fois le carbone enfoui, hors de portée des rayons cosmiques, la proportion de carbone 14 va décroître de manière régulière et à vitesse connue, 50% tous les 5734 ans à 40 ans près. Il suffit donc de mesurer le rapport entre le carbone 14 et le carbone total pour définir le temps passé depuis l'enfouissement.

Pour effectuer cette quantification, les techniques sont de 2 types: la mesure directe d'un rayonnement lorsque le carbone 14 se transforme en azote 14 avec l'émission d'une particule bêta, comme on peut le faire pour mesurer différents types de rayonnement nucléaire (par exemple avec un compteur Geiger), puis des mesures sur la masse de carbone concernée; ou bien par dosage directe du carbone 14 et du carbone total par une machine spéciale qui

sépare les différents isotopes de l'élément. Cette dernière méthode est dite par AMS (analyse par spectrométrie de masse). C'est celle qui a été utilisée pour les échantillons de la tourbière du lac de Malaguet, en confiant les échantillons au centre de datation par le carbone de Poznan en Pologne.

Les résultats sont fournis suivant des modalités de taux carbone 14 et d'âge. Deux âges sont indiqués: un âge ^{14}C en BP (before present avec référence en 1950) et un âge calibré exprimé par rapport à l'année 0 du calendrier occidental, les deux représentants des fourchettes d'amplitudes différentes, induites par la nature des deux dates. La première peut être considérée comme un âge «brut» avec une marge d'erreur instrumentale, la seconde comme un âge probable en fonction de l'ensemble des paramètres d'erreur instrumentaux et induits par les variations du taux de carbone 14 lors de la fossilisation. Le calcul de l'âge calibré est présenté sous forme graphique avec en abscisse la marge d'erreur, en ordonnée la date brute et sa marge d'erreur statistique et sur le graphique la courbe de calibration (= la variation connue du taux de ^{14}C dans la période encadrant la date brute). Cette représentation permet de mieux figurer les véritables

Pour ce travail, nous avons fait mesurer les taux de carbone dans 1 échantillon de la base de la tourbe.

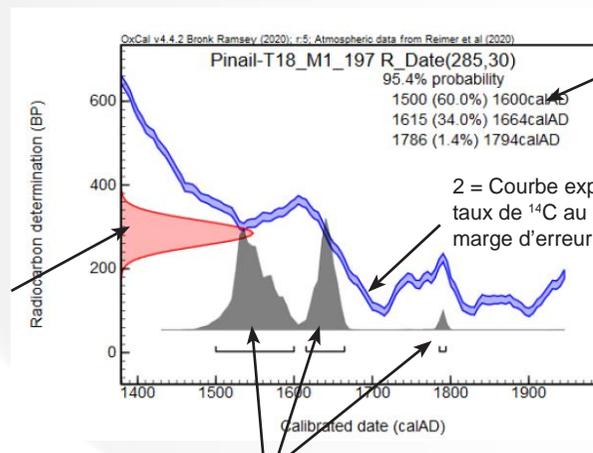
âges possibles qui ne sont pas toujours continus en probabilité. Par rapport aux fourchettes de dates calibrées, l'analyse des probabilités de répartition des dates est un outil qui permet des comparaisons plus précises.

La difficulté de dater au carbone 14 n'est pas tant dans l'analyse elle-même, qui offre aujourd'hui des techniques et des corrections satisfaisantes, que dans le choix de l'objet à dater et l'interprétation qui en est faite. Par exemple, certains végétaux peuvent biaiser les résultats d'une datation en absorbant du carbone «fossile», au taux de ^{14}C faible avec comme effet un vieillissement artificiel. Ce phénomène est bien connu de certaines plantes aquatiques. Pour les plantes de tourbières, peu de choses sont connues; il est assumé que

les mousses et les autres plantes de tourbières ne consomment pas de carbone ancien de manière à modifier les mesures. Ceci-dit, pour permettre un tri rigoureux et de bonnes comparaisons, nous privilégions des mesures sur des fragments végétaux plutôt que sur la tourbe en vrac.

La stratégie de datation sera présentée dans la partie résultats, une fois la délimitation des différentes couches réalisée.

Le protocole a consisté à prélever dans la carotte un échantillon de manière identique à celle du prélèvement pour les macrorestes, de trier les objets à dater sous la binoculaire, de les laver à l'eau non calcaire, puis de les sécher à l'air pendant plusieurs jours. Ils sont ensuite envoyés au laboratoire de datation ensachés de manière étanche.



Expression de l'âge de l'échantillon sous forme de probabilités à 95,4 %.

1 = Date «brute» avec sa marge d'erreur.

2 = Courbe exprimant la variation du taux de ^{14}C au cours du temps avec sa marge d'erreur dans l'épaisseur du trait.

Répartition statistique de l'âge de l'échantillon résultant du croisement de 1 et 2.

Figure II-7-1 : explications du graphique de calibration d'une date au ^{14}C .

11.8 - 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, et aussi (2) les logiques écologiques à l'échelle du complexe.

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 appliqué 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 déterminismes 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.

Dans le cadre d'un diagnostic fonctionnel, nous allons logiquement travailler à deux échelles spécifiques: celle de la communauté végétale et celle du complexe. La première est un arrangement spatial d'espèces, le second est un arrangement spatial d'unités fonctionnelles. Cela entraîne donc (1) une description de la composition et de la structure d'une unité fonctionnelle et (2) une cartographie d'unités fonctionnelles.

La difficulté majeure de l'exercice est de trouver l'adéquation entre la description à l'échelle de l'unité fonctionnelle et la description à l'échelle de la cartographie avec trois interrogations: que faut-il décrire, que faut-il cartographier et quel est le lien entre ce qui est décrit et ce qui est cartographié?

Ces questions sont essentielles et les traiter permet de prendre conscience des limites des méthodes mises en place.

Par exemple, les moliniaies sont des unités fonctionnelles très courantes dans les milieux tourbeux. Elles sont très faciles à identifier et à délimiter dans leur globalité. Cependant, dans le détail, le cortège qui accompagne la molinie varie dans l'espace, en fonction des conditions écologiques «complémentaires» à celles qui donnent l'avantage à cette espèce. On peut donc souvent différencier plusieurs «sous-moliniaies» en fonction des plantes compagnes. Sur le terrain, la description de la composition et de la structure floristique des différentes moliniaies est très difficile, leur cartographie souvent impossible. Il s'offre alors deux choix au descripteur, soit investir en temps dans une approche précise, par exemple sous forme de profil de structure et de suivi, soit se contenter d'une description succincte et d'une cartographie simple à réaliser. La première démarche permet d'exploiter au mieux la bioindication végétale et rendre compte d'une réelle diversité structurale de l'unité fonctionnelle. Le choix d'une telle méthode se justifiera dans certains cas; elle ne permet pas toujours de réaliser des cartographies réellement plus précises. L'autre méthode, celle d'une considération simplifiée de l'unité fonctionnelle, est rapide et constitue une bonne base de travail. On peut souvent indiquer la diversité suspectée sur la simple observation, en mentionnant les différents cortèges perceptibles, sans les décrire précisément.

Dans la pratique générale, une forme de standardisation des cartographies d'habitats impose la réalisation de relevés de type phytosociologique. L'expérience montre que ce type de description n'a ni l'avantage de la précision (le relevé ne rend pas compte de la diversité des cortèges associés), ni celui de la représentativité (le relevé n'a qu'une valeur locale, sur quelques centaines de m² au mieux)(figure II-7-1). Il n'est qu'une illustration de la communauté présente, équivalent à une description simple, mais il prend plus de temps, son coût est supérieur. Cependant, si la méthode phytosociologique présente peu d'intérêt en écologie des écosystèmes, elle est pertinente en biogéographie, science pour laquelle elle a été développée.

Malgré les désavantages qui lui sont associés, nous n'excluons pas complètement l'usage des relevés sur placette, car dans certains cas, ils restent l'outil le plus approprié, faute de mieux, en particulier dans des communautés diversifiées d'un certain intérêt patrimonial. A l'inverse, nous ne décrirons pas par cette méthode des unités peu patrimoniales comme les saulaies, ou celles qui présentent peu de variations à incidence fonctionnelle comme c'est le cas pour de nombreuses buttes à sphaignes. En effet, celles-ci présentent une certaine variabilité floristique induite par la présence d'espèces des milieux adjacents, alors que le «cœur» de la butte est constitué de quelques espèces qui déterminent l'existence même de la butte. La valeur du relevé devient faible et la simple

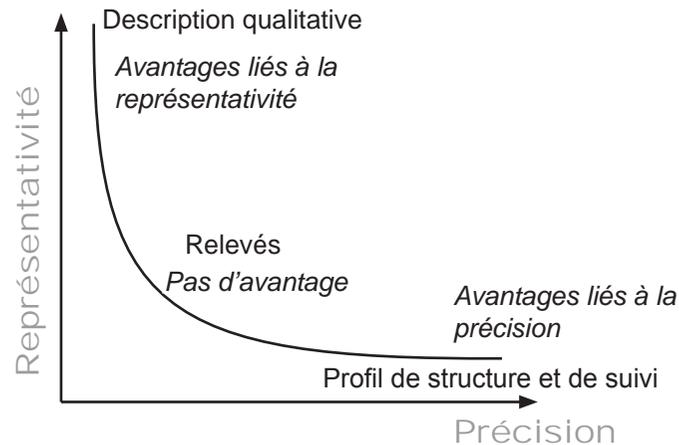


Figure II-7-1 : représentation schématique des avantages liés aux approches descriptives des communautés/unités fonctionnelles.

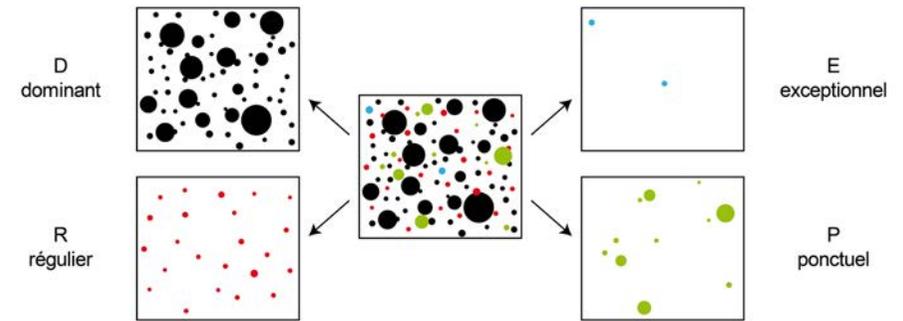


Figure II-7-2 : schéma présentant la signification des coefficients de recouvrement utilisés.

mention de la présence de buttes à *Sphagnum capillifolium* permet de signifier avec une précision satisfaisante l'unité fonctionnelle, sans avoir à réaliser une série de relevés permettant d'apprécier la variabilité spatiale de la composition des buttes qui n'a de toute façon pas d'utilité.

présentes sont traitées de manière «qualitative» ou font l'objet d'un relevé floristique sur surface homogène avec le recouvrement des taxons pondérés de manière simple suivant la codification présentée en figure II-7-2.

Lors de la phase de parcours des zones cibles, les cartographies précises des unités écologiques des complexes des Comailles, des Pâtures Pourries et de l'étang de Guédelon ont été réalisées. Quelques listes floristiques ont également été relevées.

Dans la pratique, à l'échelle de la communauté, nous allons donc adapter la description aux enjeux (moyens inclus), cherchant un équilibre entre la plus-value de la description et le temps nécessaire à cette description. Nous ne traiterons pas toutes les unités de la même façon; nous ne cherchons pas une sorte d'homogénéité descriptive, sauf sur certaines études particulières. Ceci-dit, toutes les unités

La répartition spatiale des unités décrites est caractérisée soit par une cartographie de terrain au GPS de précision métrique (Mobile Mapper 6), soit à partir de photographies aériennes ou satellites sous SIG (QGIS). L'usage des MNT peut aussi contribuer à délimiter certaines unités, tout comme la consultation des photographies aériennes anciennes.

II.9 - Caractérisation piézométrique

L'eau joue un rôle majeur en tourbière, à travers sa qualité de contrainte écologique pour les êtres vivants et parce qu'elle est le principal vecteur des nutriments. Comprendre les logiques d'écoulement est de ce fait un objectif majeur du diagnostic fonctionnel. La caractérisation des logiques de flux hydriques s'appuie d'abord sur des éléments structuraux (relief, géologie, géomorphologie, bio-indicateurs) et, en complément, sur des mesures d'indicateurs spécifiques comme les variations des niveaux d'eau ou les propriétés physico-chimiques des eaux.

L'analyse piézométrique s'attache à définir les variations des niveaux d'eau dans les roches et les sols. L'analyse limnimétrique est l'équivalent pour les eaux de surface. Pour certains lieux, l'analyse est à la fois piézométrique, lorsque la nappe est sous le niveau du sol, et limnimétrique lorsqu'elle est au dessus (zones inondées en hiver, par exemple). Nous n'appliquerons pas avec rigueur ces concepts et parlerons la plupart du temps de régimes piézométriques au sens large, sauf pour les cours et les pièces d'eau.

Le suivi des niveaux d'eau se réalise grâce à des piézomètres, des tubes complètement ou en partie crépinés (percés d'un réseau de fentes de structure définie), qui se fixent verticalement dans le sol et qui se remplissent de l'eau des milieux adjacents à niveau équivalent. Les niveaux étaient traditionnellement relevés quelques jours par an à partir de la tête du tube, à la surface, avec un ruban gradué et une diode sensible à l'eau. Aujourd'hui, le suivi est réalisé sur des durées horaires ou demi-horaires grâce à des sondes automatiques qui sont équipées de capteurs.

Nos suivis sont réalisés avec des sondes équipées de capteurs électroniques de pression et de température de type Diver de Schlumberger ou Levelogger de Solinst.

Chaque sonde piézométrique (figure II-8-1) est placée à une dizaine de centimètres du fond d'un piézomètre de diamètre intérieur 51 mm et extérieur 63 mm ou 25-33 mm, suivant les besoins, et soit en PVC, soit en PEHD (figure II-8-1). Les sondes sont posées dans une navette en PVC qui est déposée

Dans le cadre de l'ensemble des boulaies à sphaignes, 23 sondes piézométriques et 2 sondes barométriques ont été posées les 15 et 16 octobre 2019 et déposées les 6 et 7 octobre 2020, sur la base d'un protocole visant à valider diverses hypothèses spécifiques et dans la limite de l'autorisation de la pose par les propriétaires.

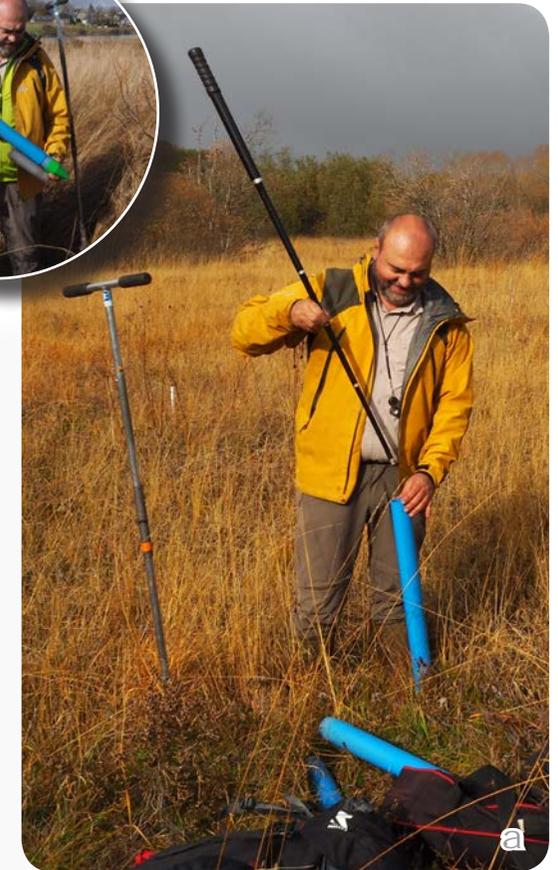


Figure II-8-1: pose de tubes piézométriques (a): sonde piézométrique, ici des Leveloggers de Solinst et navette de pose (b).

dans le fond du piézomètre avec une canne télescopique adaptée, ou posée directement au fond du tube, sur une cale positionnant le capteur au dessus du culot de sédimentation.

Tous les piézomètres sont posés un même jour ou en deux jours rapprochés grâce à un carottier russe de diamètre extérieur de 60 mm (figure II-5-1) ou

d'autres tarières pédologiques (Edelman, gouge de 30 mm).

Les profils pédologiques de chaque piézomètre sont généralement relevés ou connus sur la base de travaux antérieurs. Les schémas de restitution des sondages sont présentés dans la partie résultats soit dans le volet pédologique, soit dans le volet hydrologique.

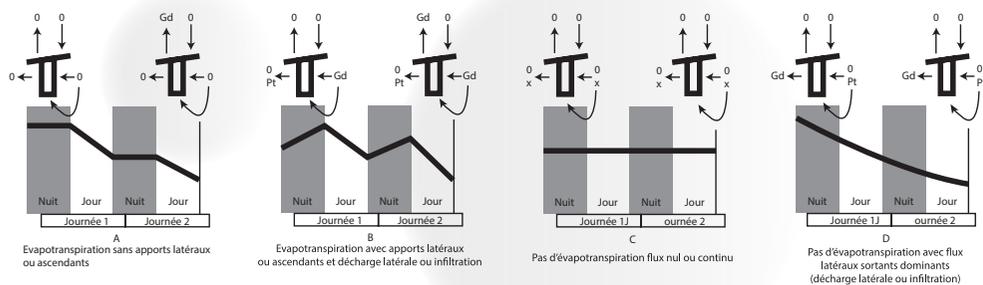


Figure II-8-3: modèle simplifié de décomposition théorique du signal piézométrique sur deux journées consécutives. L'allure des courbes est ici interprété en termes d'écoulement ou d'évapotranspiration. Par exemple, le signal de gauche montre une baisse du niveau diurne et une stagnation nocturne. Ceci s'interprète par l'absence de tout écoulement et un prélèvement des plantes par évapotranspiration. Les écoulements «neutres», autant d'eau entrant que d'eau sortant ne peuvent pas être mesurés et sont considérés comme peu probables.

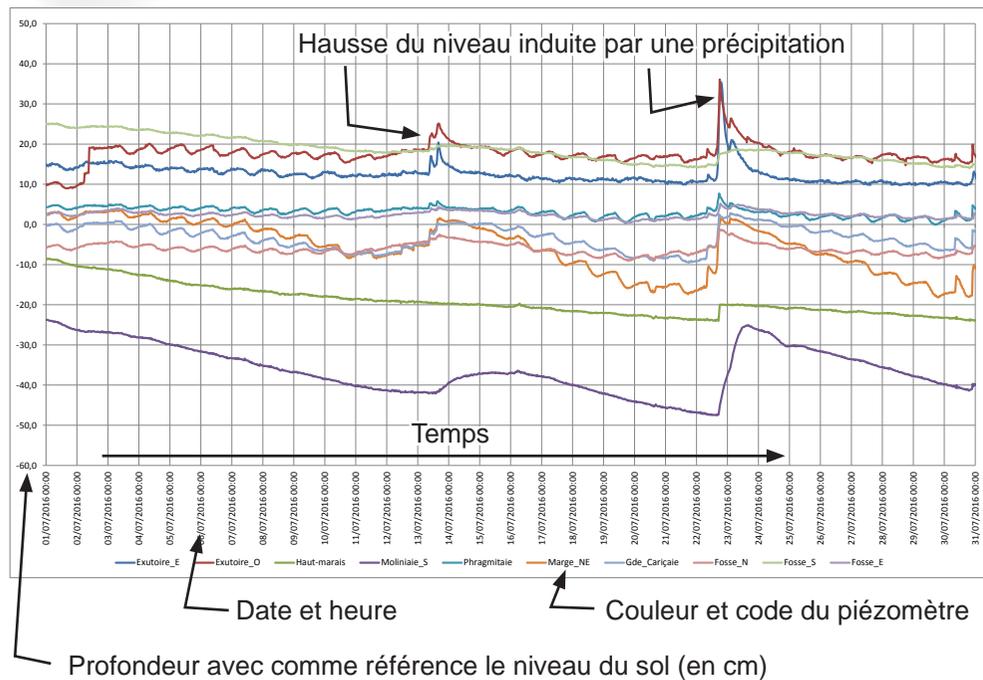


Figure II-8-2: chronique piézométrique mensuelle d'une dizaine de piézomètres.

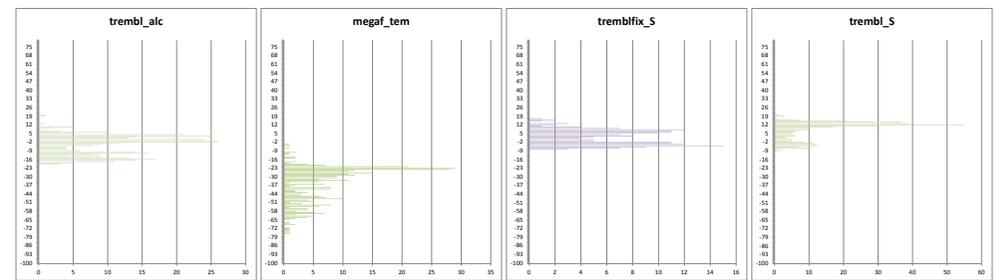


Figure II-8-4: histogrammes de fréquences annuels de 4 suivis piézométriques. Les classes de profondeurs (en ordonnées) sont centimétriques.

Les sondes sont programmées pour un démarrage simultané et restent en place pour la même durée, généralement entre 11 et 12 mois.

Les données brutes sont exprimées en divers formats suivant les types de capteur, mais nous convertissons l'ensemble en cm H₂O, disponibles en format CSV ou Excel. Les données sont fournies sous forme numérique sur DVD ou clé USB en format natif (.dat), .csv et .xls.

Le traitement des données est réalisé sous tableur Excel. La compensation sonde piézométrique-sonde barométrique est réalisée par simple soustraction de la valeur atmosphérique de la valeur sous eau. Des modifications sont éventuellement réalisées pour exprimer les résultats en cm par rapport au niveau du sol ou en altitude NGF. Dans ce cadre, une correction est souvent réalisée en prenant comme référence la mesure du niveau d'eau par rapport au sol le jour de la dépose

des sondes.

Le mode de représentation des variations piézométriques le plus courant est la chronique: un diagramme binaire avec une hauteur ou une altitude en ordonnées et le temps en abscisses (figure II-8-2). Le «0» des hauteurs est le plus souvent le niveau du sol, mais il peut aussi être une valeur arbitraire dans le cas des niveaux d'eau d'un lac ou d'un ruisseau.

La base de nos interprétations tient dans une décomposition théorique du signal piézométrique, à l'instar des hydrologues qui décomposent un pic de crue en phases et contributions distinctes. Pour cela, nous nous appuyons sur de petits modèles conceptuels (figure II-8-3) et de nombreux comparatifs entre différentes courbes.

D'autres formes de représentation sont possibles, comme celle des histogrammes de fréquence (figure II-8-4).

II.10 - 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 ortho-normées. 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.

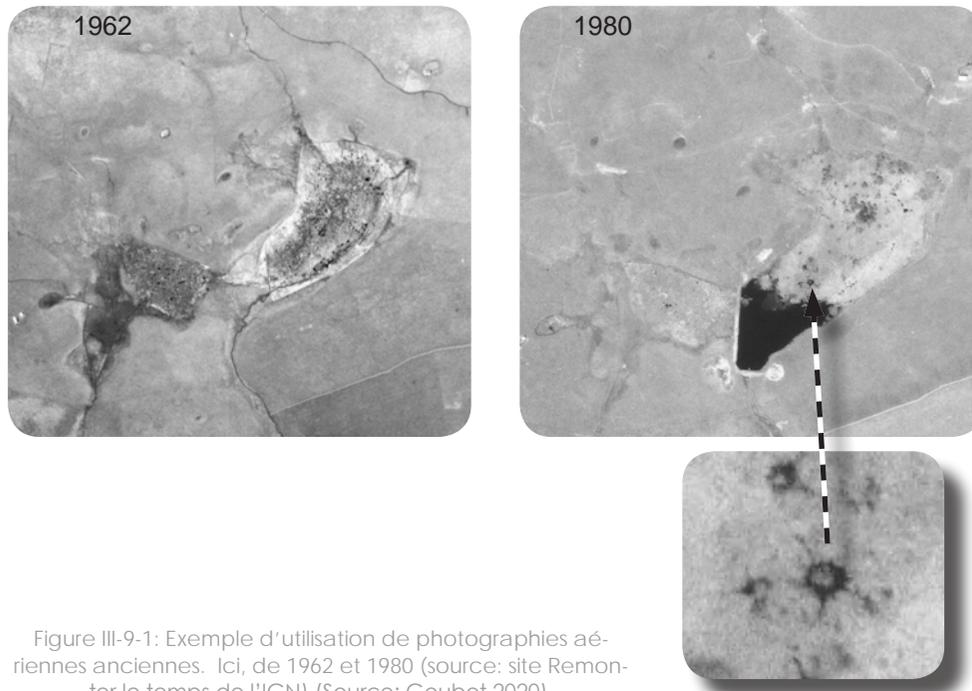


Figure III-9-1: Exemple d'utilisation de photographies aériennes anciennes. Ici, de 1962 et 1980 (source: site Remonter le temps de l'IGN). (Source: Goubet 2020).

II.11 - 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 comparons 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. Contexte, relief et géologie

.....



Ce travail concerne 7 entités tourbeuses ou à végétation de tourbière, dont 6, attachées autrefois à deux sites Natura 2000: «Tourbières, marais et forêt alluviales de la vallée du Branlin» (FR2600991) et «Étangs oligotrophes à littorales de Puisaye, à bordures paratourbeuses et landes» (FR2601011) et regroupées aujourd'hui au sein d'un site unique nommé «Milieux humides et habitats à Chauves-souris de Puisaye-Forterre» (FR2601011).

De nombreuses informations concernant ces sites sont présentées dans les documents d'objectifs et nous nous attacherons ici à ne présenter que les éléments directement en lien avec le fonctionnement des écosystèmes.

Les sites se regroupent (figure III-1-1 et III-1-2) en une unité de 2 complexes situés sur le cours du Branlin [1] et une autre de 5 à la tête du ruisseau du Bourdon (secteur des étangs de Chassin et de Guédelon)[2]. La vallée du Loing sépare les deux groupes.

La figure met parfaitement en évidence la situation particulière du site des Comailles, à l'amont d'un rétrécissement de la vallée [3].

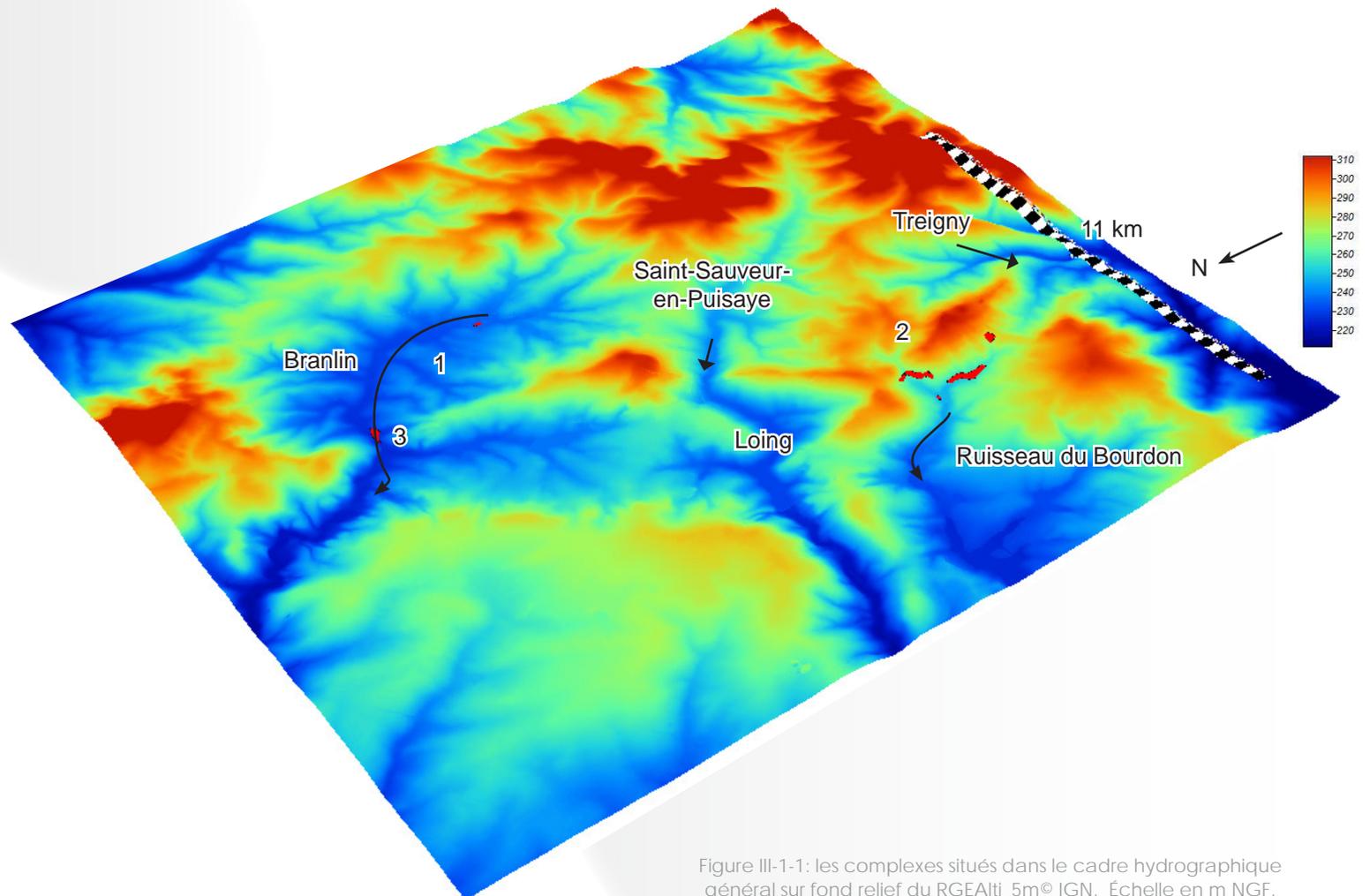


Figure III-1-1: les complexes situés dans le cadre hydrographique général sur fond relief du RGEAlti_5m© IGN. Échelle en m NGF.

La géologie locale se structure au sein du Crétacé inférieur, majoritairement argilo-sableux, entre Jurassique supérieure calcaire et Crétacé supérieur crayeux.

Les complexes se situent sur les roches albiennes ou des alluvions qui les surmontent, sauf celui des Bergeries, sis sur le Barrémien supérieur (Tableau III-1-1).

L'Albien de Puisaye est composé d'une partie inférieure, majoritairement argileuse et sableuse, avec

les Argiles de Myennes au sommet, épaisse d'une quarantaine de mètres; et d'une partie supérieure, sableuse et gréseuse, épaisse d'une cinquantaine de mètres. On peut considérer cette structure comme celle d'un compartiment perméable, capacitif du point de vue hydrogéologique, surmontant un compartiment imperméable. La logique d'écoulement y est celle du toit des argiles de Myennes qui oriente les flux en fonction de sa topographie (souterraine).

Unités stratigraphiques	Caractéristiques hydrogéologiques	Sites
c1-2: Cénomaniens. Craie marneuse, craie avec ou sans silex, spongolites. 100 m.	Perméable	
n7b : Albien, partie supérieure. Sables, sables argileux, grès ferrugineux, dragées de quartz. Sables de la Puisaye. 50 m.	Perméable	Carrières Guédelon étang Guédelon sud
n7a : Albien, partie inférieure. Alternance d'argiles et de sables. Argiles de Myennes au sommet. 40 m.	Imperméable	Chassin Pâtures Pourries Comailles
n4b : Barrémien supérieur. Sables et argiles panachés. 15 m.	Variable	Bergeries
n4a : Barrémien inférieur. Lumachelles et Marnes ostréennes. 15 m.	Variable	
n3 : Hauterivien. Calcaire à Spatangues. 1-10 m.	Perméable	

Tableau III-1-1: série géologique de Puisaye et caractéristique hydrogéologique avec la répartition des sites.

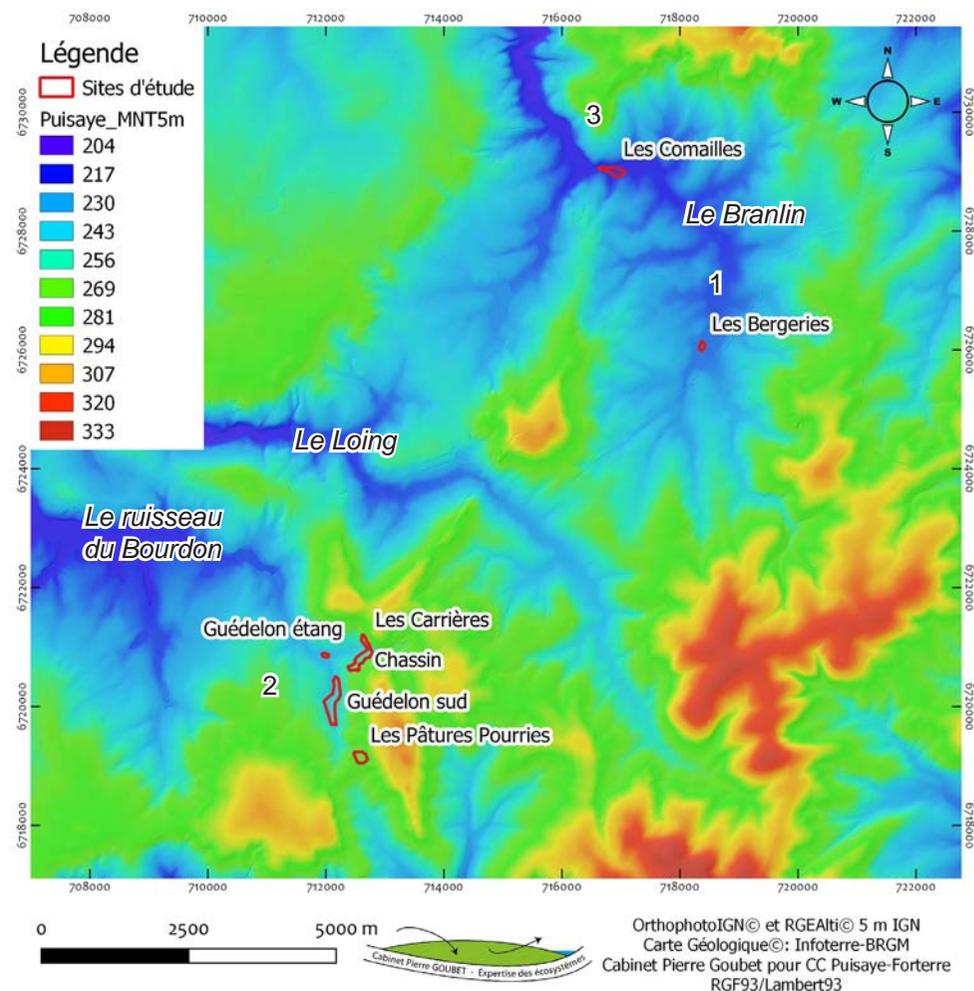


Figure III-1-2: les complexes situés dans leur contexte topographique, RGEAlti_5m© IGN.

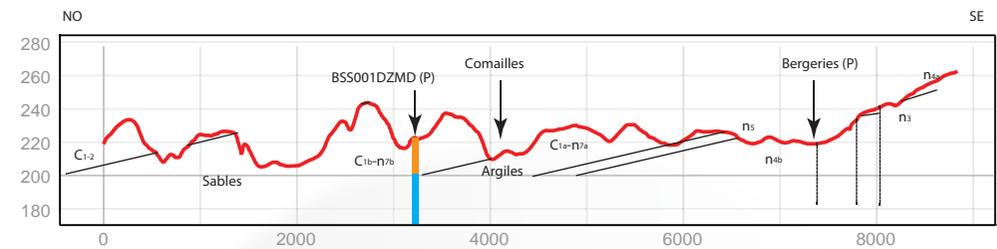
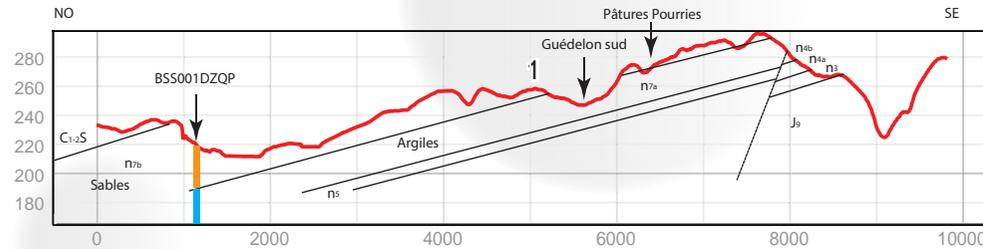
Le complexe des Bergeries se tient sur un complexe sablo-argileux, sur des formations superficielles alluvionnaires.

Les données de la Banque du sous-sol (3 sondages) et les coupes

géologiques réalisées à partir de la carte géologique (figure III-1-3) rendent compte de la pente des couches, orientée vers le nord-ouest, de 2,5 % (1,43°) en moyenne, et le problème de l'affleurement, dans les dépressions,

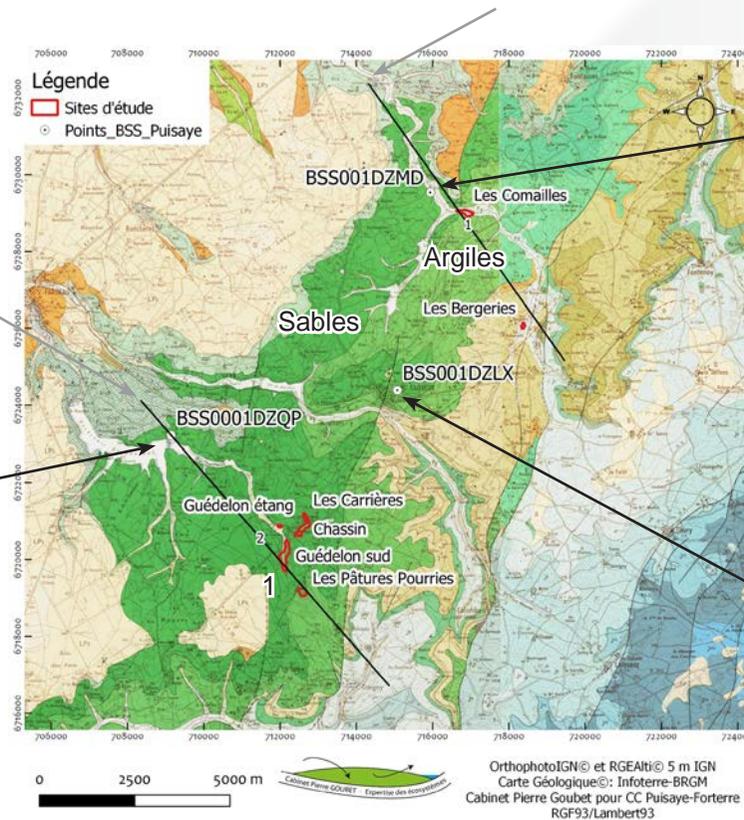
de roches non matérialisé sur la carte géologique comme c'est le cas pour le complexe de Guédelon sud [1]. Ce fait est déterminant car soit les complexes se situent tous dans la zone de contact entre Albien inférieur argileux et

Albien supérieur sableux, soit certains se tiennent aussi dans l'Albien sableux. Nous traiterons cet aspect pour chacun des complexes dans la partie qui les concerne.



BSS01DZQP

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
2.50	Sables de la Puisaye	[Lithologie]	Sable jaune.	Albien moyen	214.50
3.00			Grès dur.		214.00
5.50			Sable fin jaune.		211.50
14.70	Sables de la Puisaye	[Lithologie]	Sable grossier.	Albien moyen	202.30
19.70			Grès dur.		197.30
21.00					196.00
	Sables de la Puisaye	[Lithologie]	Argile noire compacte. Argiles tégulaires, Sables des Drillons et Argiles de Myennes.	Albien inférieur à Albien moyen	
71.00			Argile verte, sable fin et grossier.		146.00
78.00	Sables verts	[Lithologie]	Argile sableuse verte avec nodules d'argile noire.	Albien inférieur	139.00



Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
11.04	Grès et sables des Drillons	[Lithologie]	Sable.	Albien moyen	208.96
21.00					199.00
	Argiles de Myennes	[Lithologie]	Argile. Argiles de Myennes ?	Albien inférieur	
58.00					162.00
62.00					158.00
70.00					152.00
75.00	Sables verts	[Lithologie]	Alternance de sable et argile. Sables verts ?		150.00
					145.00
84.00			Argile. Barrémien ? (avec Aptien).	Barrémien à Aptien	136.00
114.00					106.00

BSS01DZMD

BSS01DZLX

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
	Grès et sables des Drillons	[Lithologie]	Sables des Drillons.	Albien moyen	
14.00					273.00
	Argiles de Myennes	[Lithologie]	Argiles de l'Armance (Myennes).	Albien inférieur	
47.00					240.00
	Sables verts	[Lithologie]	Sables verts (épaisseur réduite ?). Présence Aptien ou Barrémien ?		
71.50					215.50
	Calcaire à Spatangues	[Lithologie]	Calcaire.	Hauteriviens	
82.00					205.00

Figure III-1-3: cadre géologique des complexes sur fond de carte géologique (source BRGM), log des sondages de la Banque de données du sous-sol et codes correspondants (source BRGM) et coupes géologiques.

IV. **A**nalyse piézométrique: généralités à l'échelle des sept sites étudiés



Vingt trois dispositifs de suivi de la saturation hydrique des sols ont été posés sur les sites des Comailles (7 sondes), des Bergeries (3), des Carrières (2), de l'étang de Guédelon (2), de Guédelon sud (5) et de Chassin (4). Les sites ont été équipés en tenant compte des interdictions d'étude sur

certaines des parcelles incluses dans la zone d'étude préliminaire. Ainsi, les Pâtures-Pourries n'ont pu être étudiées.

La restitution des 23 chroniques sur une même figure n'est pas très lisible (figure IV-1).

Le tableau rendant compte de l'analyse de corrélation de Pearson réalisée sur les valeurs à minuit et sur la durée totale du suivi (tableau IV-1) montre la proximité des variations de niveau pour des chroniques des Comailles, des Bergeries, de Chassin, et de Guédelon sud, sites relativement éloignés et

surtout de nappes différenciées.

D'autres lieux de suivi montrent leur spécificité comme le Branlin au Comailles (Com_rulign), l'étang de Guédelon et son émergence (GuedEtan_Etang et GuedEtan_Emer), les aulnais de Guédelon sud (qui montrent

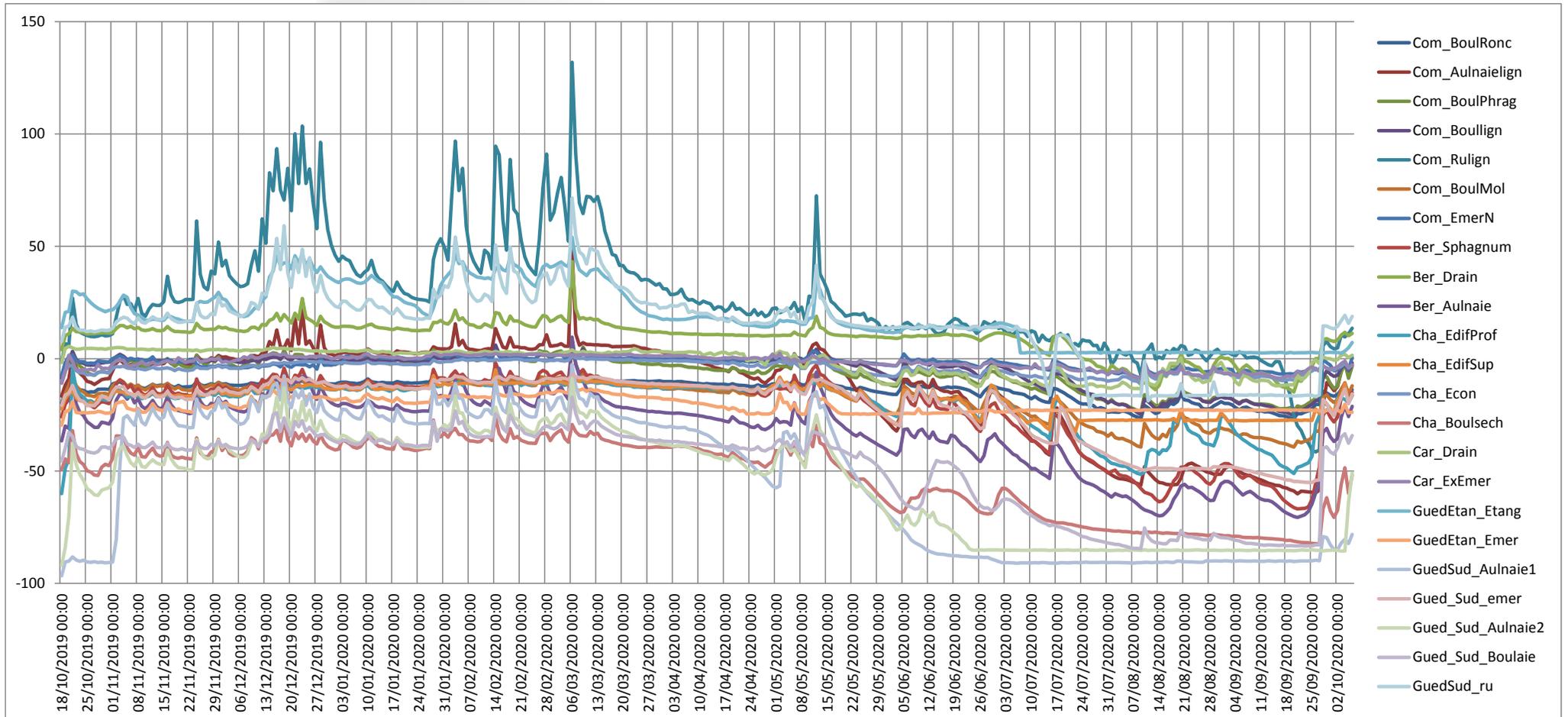


Figure IV-1: chroniques piézométriques quotidiennes annuelles des 23 points de suivi du 18 octobre 2019 au 6 octobre 2020, exprimées en cm/sol.

elles des chroniques proches), et dans une moindre mesure l'émergence nord des Comailles et de l'émergence concentrée de Chassin. Ces écarts s'expliquent pour certaines de ces chroniques par le fait que les niveaux descendent sous la sonde (suivis de l'étang de Guédelon et les aulnaies de Guédelon sud), il s'agit donc d'une forme d'artefact.

L'analyse empirique des chroniques met en évidence le regroupement des courbes en trois types (figure IV-2), des plus stables aux plus «réactives».

Logiquement, la stabilité montre peu de diversité et les chroniques stables se regroupent de manière quasi parfaites durant toute l'année (en bas, à droite dans la figure). Ces chroniques sont celles d'émergences si on s'en tient à leur intitulé choisi lors de la pose des appareillages. Il y a également le drain des Carrières. Comme le montre les courbes, d'un point de vue hydrologique, ces différents secteurs sont caractérisés par une décharge hydrogéologique relativement constante tout au long de l'année. La nappe n'est sensible ni aux pluies hivernales, ni aux

	Com_BoulRonc	Com_Aulnaie1	Com_BoulPhrag	Com_Boullign	Com_Rulign	Com_BoulMol	Com_EmerN	Ber_Sphagnum	Ber_Drain	Ber_Aulnaie	Cha_EdifProf	Cha_EdifSup	Cha_Econ	Cha_Boulsech	Car_Drain	Car_ExEmer	GuedEtan_Etang	GuedEtan_Emer	Gued_Sud_Aulnaie1	Gued_Sud_emer	Gued_Sud_Aulnaie2	Gued_Sud_Boulaie	Gued_Sud_ru
Com_BoulRonc	1,000																						
Com_Aulnaie1	0,959	1,000																					
Com_BoulPhrag	0,975	0,971	1,000																				
Com_Boullign	0,981	0,969	0,962	1,000																			
Com_Rulign	0,748	0,792	0,806	0,705	1,000																		
Com_BoulMol	0,984	0,978	0,988	0,985	0,755	1,000																	
Com_EmerN	0,880	0,813	0,849	0,854	0,577	0,851	1,000																
Ber_Sphagnum	0,976	0,981	0,967	0,988	0,753	0,982	0,836	1,000															
Ber_Drain	0,947	0,944	0,943	0,948	0,800	0,949	0,796	0,956	1,000														
Ber_Aulnaie	0,951	0,981	0,981	0,956	0,823	0,976	0,797	0,976	0,957	1,000													
Cha_EdifProf	0,950	0,905	0,907	0,934	0,684	0,927	0,831	0,929	0,901	0,899	1,000												
Cha_EdifSup	0,924	0,932	0,930	0,905	0,741	0,924	0,835	0,917	0,847	0,915	0,881	1,000											
Cha_Econ	0,876	0,861	0,874	0,814	0,751	0,854	0,806	0,831	0,793	0,848	0,837	0,928	1,000										
Cha_Boulsech	0,919	0,958	0,958	0,921	0,803	0,937	0,783	0,938	0,881	0,958	0,848	0,925	0,866	1,000									
Car_Drain	0,794	0,827	0,845	0,783	0,620	0,833	0,667	0,784	0,744	0,840	0,748	0,833	0,835	0,862	1,000								
Car_ExEmer	0,918	0,886	0,900	0,871	0,767	0,882	0,812	0,883	0,849	0,868	0,861	0,903	0,926	0,885	0,752	1,000							
GuedEtan_Etang	0,788	0,835	0,860	0,762	0,897	0,806	0,662	0,791	0,821	0,861	0,722	0,808	0,799	0,871	0,736	0,793	1,000						
GuedEtan_Emer	0,601	0,630	0,670	0,510	0,820	0,588	0,531	0,564	0,591	0,654	0,538	0,676	0,791	0,697	0,595	0,722	0,805	1,000					
Gued_Sud_Aulnaie1	0,792	0,838	0,842	0,758	0,809	0,794	0,644	0,798	0,749	0,846	0,741	0,833	0,837	0,899	0,777	0,853	0,813	0,766	1,000				
Gued_Sud_emer	0,960	0,975	0,951	0,981	0,735	0,970	0,819	0,986	0,930	0,955	0,907	0,919	0,826	0,934	0,769	0,883	0,786	0,555	0,783	1,000			
Gued_Sud_Aulnaie2	0,844	0,891	0,897	0,821	0,842	0,851	0,723	0,854	0,806	0,900	0,802	0,890	0,879	0,952	0,831	0,878	0,894	0,793	0,950	0,842	1,000		
Gued_Sud_Boulaie	0,919	0,963	0,939	0,934	0,759	0,944	0,782	0,948	0,899	0,957	0,863	0,905	0,846	0,962	0,852	0,860	0,824	0,612	0,836	0,945	0,898	1,000	
Gued_Sud_ru	0,915	0,936	0,929	0,905	0,876	0,920	0,769	0,922	0,938	0,939	0,851	0,873	0,841	0,904	0,722	0,877	0,877	0,716	0,809	0,919	0,865	0,913	1,000

Tableau IV-1: tableau des corrélations de Pearson réalisées sur les valeurs à minuit de l'ensemble des chroniques sur la durée totale du suivi. Les secteurs en gris clairs sont clairement décorrélés et ceux en gris foncés relativement moins décorrélés. Ces données statistiques doivent être considérées dans le détail de chaque chronique car l'origine de la décorrélation peut-être liée à un artefact, c'est à dire à la mesure et non au processus.

sécheresses estivales, encore que pour ces dernières, de petites variations sont perceptibles.

Parmi les courbes qui montrent de la réactivité, il est possible de distinguer des chroniques à fortes variations hivernales, en haut sur la figure, et d'autres à fortes variations estivales, au centre.

Les secteurs à fortes variations

hivernales sont principalement des rus (dont le Branlin), des drains et l'étang de Guédelon. Dans des proportions moindre, le trait est exprimé aussi pour les points qui ont été caractérisés comme aulnaie lors de la pose des sondes. Ce fait exprime probablement un déterminisme important des aulnaies: celui de dépendre du système alluvial ou, du moins, de suivre une logique piézométrique alluviale, en hiver.

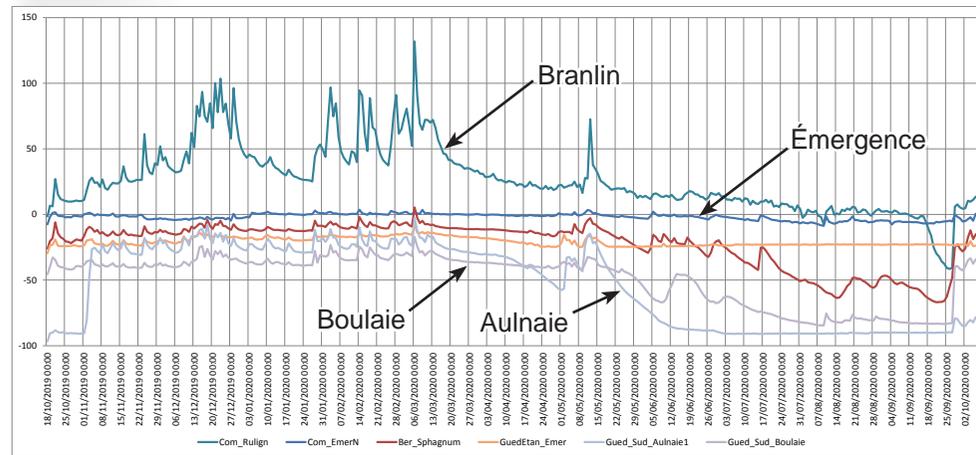
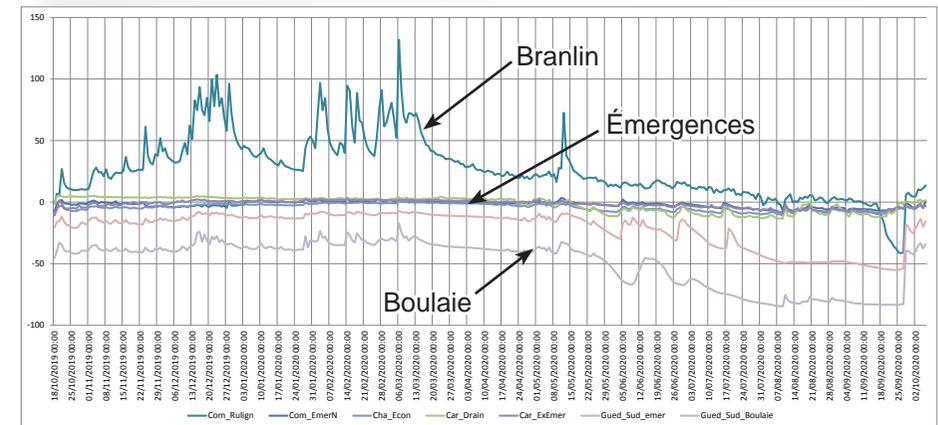
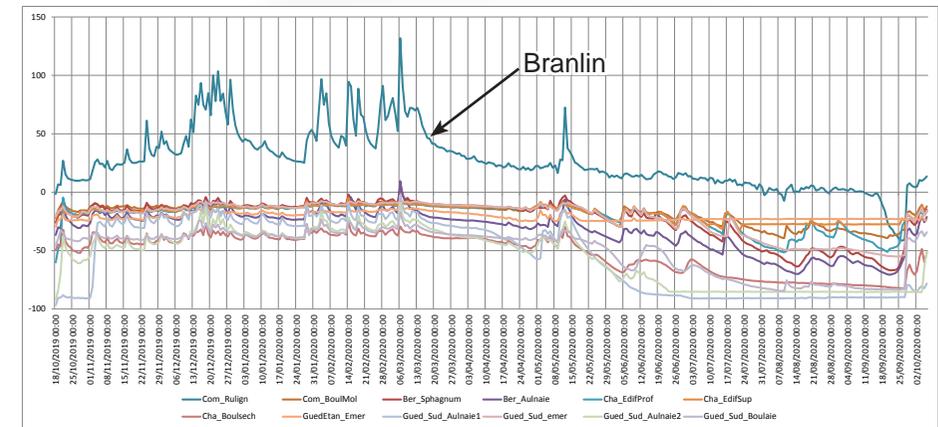
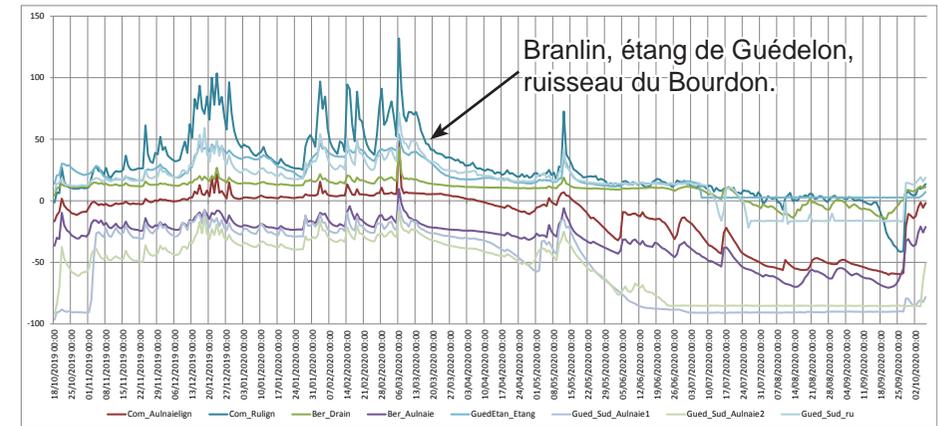


Figure IV-2: chroniques piézométriques quotidiennes annuelles, exprimées en cm/sol, ci-dessus. Ci-contre chroniques regroupées selon leurs types: des plus «stables» au plus «réactives». Explications dans le texte.

Le dernier groupe de chroniques est celui des courbes à variations peu marquées en hiver, mais fortes en été, exprimant une baisse de niveau estival,

mitigée temporairement par des apports pluviométriques. Les contextes sont variés.



V. L'étang de Guédelon



V.1 - Résultats-données

Sur sa rive nord, le lac de Guédelon héberge deux zones humides: celle d'une des queues du lac; et une autre, riche en bouleaux hébergeant sphaignes et osmonde. Cette dernière a fait l'objet d'un suivi des niveaux d'eau du sol et de l'étang pour comprendre son fonctionnement et surtout sa dépendance vis-à-vis de l'étang.

Le contexte géologique est celui des Sables de la Puisaye. La topographie est caractérisée par une pente moyenne de 6-8 %, orientée perpendiculaire à la rive.

Un sondage pédologique à été réalisé à la gouge, un autre dans le cadre de la pose du piézomètre et deux sondes piézométriques et limnimétriques ont été posées (figure V-1-1).

V.1.A - Sols et tourbes

Sur le profil pédologique (figure V-1-3) comme pour celui du piézomètre (figure V-1-2), la tourbe forme un placage de quelques décimètres, respectivement de 36 et 23 cm. Elle est aujourd'hui surmontée d'une litière forestière qui n'est probablement pas de la tourbe en devenir, mais un simple humus «classique».

Par contre, les horizons sous-jacents sont de véritables horizons tourbeux (histiques pour le pédologue). Ils sont en partie pauvres en fibres, horizons histiques sapriques codés Hs, en partie mésique (Hm), pour l'un d'entre eux, contenant ici 30 % de fibres.

Cet horizon un peu plus riche en fibres livre un contenu en macrorestes

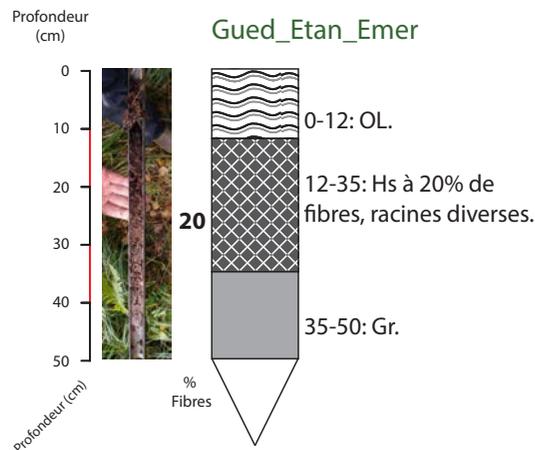


Figure V-1-2: représentation schématique du sondage piézométrique Gued_Etan_Emer.



Figure V-1-1: localisation des sondages et des sondes piézométriques sur fond orthophotographique IGN.



Et-Gued_S1 à 35 cm, le fond (a), graine d'*Eleocharis* sp. (b), graine de *Carex curta* (c), *Sphagnum palustre* (d), 3 graines de *Potentilla erecta* (e).

Figure V-1-3: représentation schématique du sondage pédologique et paléoécologique Et-Gued_S1 et illustrations photographiques correspondantes.

végétaux de plantes de rives inondées ou de mares avec *Carex paniculata*, *Eleocharis* sp., des éphippies de daphnies, des plantes de bas-marais comme *Carex canescens*, *Sphagnum palustre* ou de forêt comme *Rubus* sp. et des fougères.

V.1.B - Unités fonctionnelles

La queue d'étang n'a pas été étudiée dans le détail. Elle est occupée par une aulnaie à grands carex, fougères et iris jaune (figure V-1-4). Elle ne peut prétendre à un statut d'Habitat de boulaie tourbeuses.

La petite boulaie à sphaignes de la rive nord (figure V-1-5) est parfaitement caractérisée par la présence du bouleau, des sphaignes (*Sphagnum palustre*, *S. angustifolium*) (figure V-1-6), du polytric (*Polytrichum commune*, non vérifié au laboratoire), de la molinie (*Molinia caerulea*), et de *Carex canescens*, *C. rostrata*, *C. nigra*. Ces trois carex rejoignent *C. paniculata* au bord de l'étang. Les surfaces couvertes par les sphaignes sont restreintes à quelques centaines de mètres carrés tout au plus.



Figure V-1-5: la petite boulaie à sphaignes de la rive nord est caractérisée par la présence du bouleau, des sphaignes, du polytric, de la molinie et de carex.



Figure V-1-4: la queue de l'étang est occupée par une aulnaie à grands carex, fougères et iris jaune.



Figure V-1-6: des sphaignes (*Sphagnum palustre*, *S. angustifolium*) de la petite boulaie à sphaignes de la rive nord.

V.1.C - Régimes piézométriques

La chronique annuelle de l'étang (figure V-1-7) est faussée à partir du 7 juillet 2020 à cause de la manipulation de la sonde dont le tube se détache du fond et qui se met à flotter.

La sonde de l'émergence est posée à une profondeur de 23/24 cm, ce qui rend impossible la mesure des niveaux sous cette valeur. Le suivi n'est donc valide qu'à partir du moment où le niveau monte au dessus de 23 cm de profondeur, principalement du 1er novembre 2019 au 17 mai 2020.

L'amplitude des variations des deux chroniques est incompatible avec une dépendance des niveaux. Ce qui

apparaissait comme une émergence et qui a été nommé comme telle lors de la pose dépend donc bien d'une nappe et non de l'étang. La montée en charge de cette nappe se réalise de manière irrégulière jusqu'à son maximum pour 2020 vers le 11 mars. Cette montée en charge ne correspond pas à celle de l'étang, dont le maximum est en décembre, ce qui se conçoit parfaitement car la nappe de l'émergence ne représente pas la source principale de la pièce d'eau.

Les chroniques d'avril et de mai 2020 (figures V-1-8 et V-1-9) mettent en évidence elles-aussi le processus d'émergence, à travers la compensation des baisses diurnes induites par l'évapotranspiration et une hausse nocturne liée à un apport de nappe.

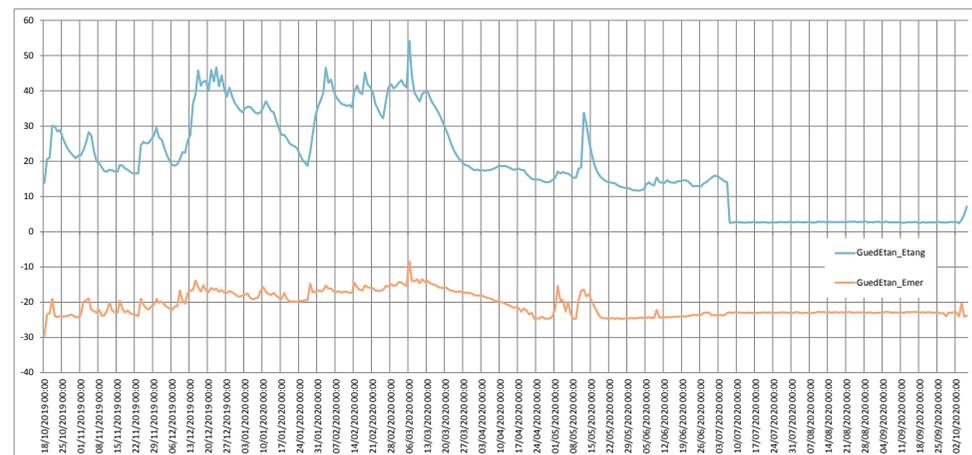


Figure V-1-7: chroniques piézométriques quotidiennes annuelles de l'étang de Guédelon du 18 octobre 2019 au 6 octobre 2020, exprimées en cm/sol.

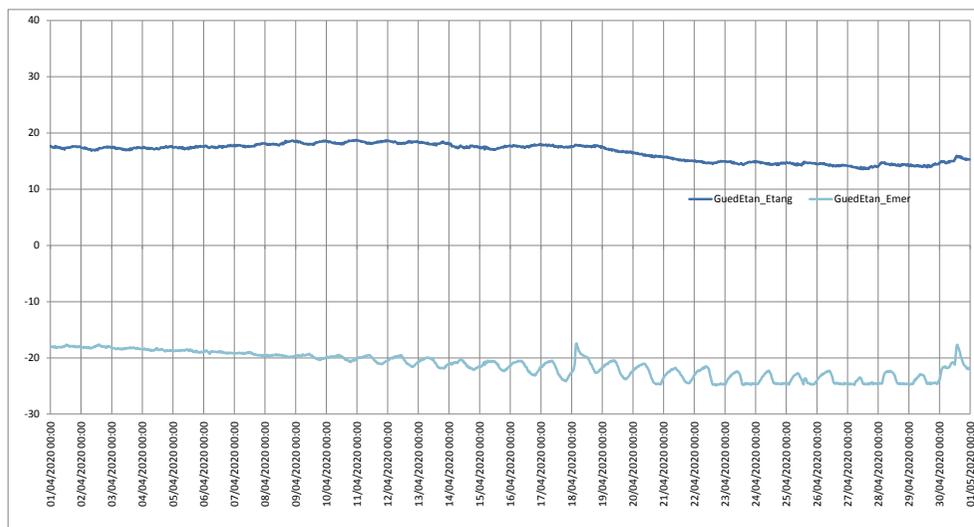


Figure V-1-8: chroniques piézométriques quotidiennes d'avril de l'étang de Guédelon, exprimées en cm/sol.

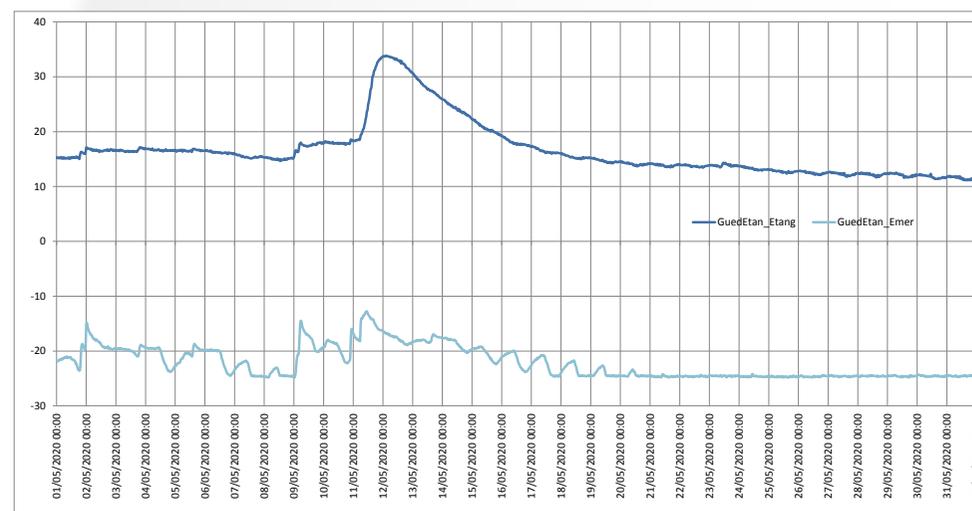


Figure V-1-9: chroniques piézométriques quotidiennes de mai de l'étang de Guédelon, exprimées en cm/sol.

V.1.D - Photographies aériennes anciennes

Les photographies aériennes anciennes ne montrent pas de faits majeurs en lien avec le fonctionnement des milieux humides. L'étang est plus ancien que les plus anciennes photos (ici 1949, figure V-1-10).

Le niveau n'est probablement pas constant depuis cette époque, des travaux d'entretien sur la digue provoquent vraisemblablement des remontées qui se traduisent par des cordons végétaux visibles en particulier dans le secteur de l'émergence à bouleaux et sphaignes [1] sur le cliché de 1998 (figure V-1-11). Il s'agit d'un phénomène classique.

V.2 - Interprétation fonctionnelle

Toutes les données analysées dans le cadre du diagnostic fonctionnel de la boulaie tourbeuse de l'étang de Guédelon répondent au modèle classique de ce type d'écosystème, déterminé par un engorgement du sol causé par une nappe souterraine, dans un contexte relativement pauvre en nutriments (oligotrophe).

Ici, l'émergence est localisée et se réalise à travers la concentration des écoulements souterrains dans de petites dépressions, vraisemblablement dans un talweg peu différencié (figure V-2-1). La boulaie se situe entre une chênaie où le chêne est accompagné de divers essences et le cordon de rehausse occupé par des aulnes. L'aulne forme un boisement étendu dans la queue d'étang et le vallon situés à l'est. La meilleure disponibilité des nutriments dans l'eau de l'étang et du fond

de vallon permet à l'aulne d'occuper cette situation.

La question du rôle de l'étang dans les logiques d'engorgement ou d'ambiance atmosphérique humide favorable aux sphaignes se pose. Mais les données qui permettraient de considérer ces phénomènes ne sont pas disponibles. Il faudrait en particulier une description fine du relief et des suivis piézométriques plus en profondeur, nécessitant d'autres moyens techniques que ceux, légers, utilisés dans cette étude. Cependant, la question n'est pas fondamentale dans la conservation de la boulaie.

Les conditions d'existence de la boulaie tourbeuse étant en lien avec l'émergence d'une nappe, le maintien du système écologique dépend du maintien des conditions hydrogéologiques,



Figure V-1-10: photographie aérienne de 1949 (source site Remonter le temps de l'IGN)

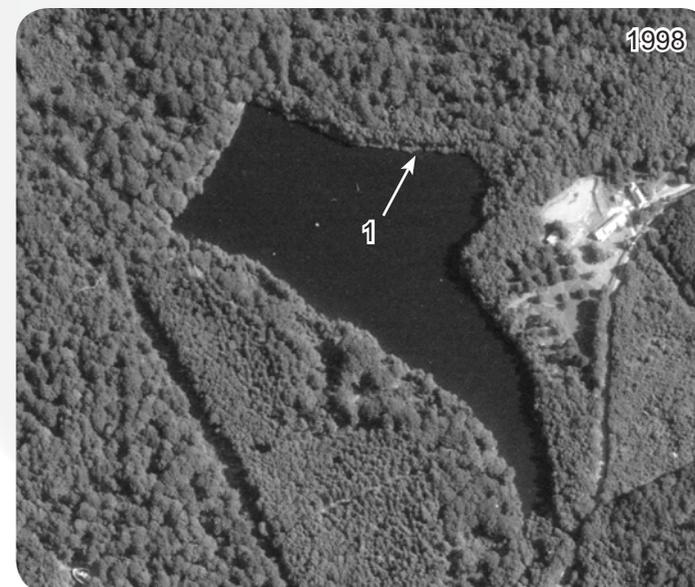


Figure V-1-11: photographie aérienne de 1998 (source site Remonter le temps de l'IGN)

à l'exclusion de toute atteinte directe, bien-entendu. La faible surface couverte par la tourbe laisse présumer d'une émergence peu étendue, issue d'une nappe de petit volume, ou d'une position à l'amont d'une grande émergence se situant aujourd'hui sous le niveau de l'étang. L'impluvium de la nappe qui alimente l'émergence est potentiellement étendu, avec un point haut situé à 1 km au nord, et une soixantaine de mètre plus en altitude. Ceci-dit, la partie la plus éloignée, occupée par des cultures et des prairies, a probablement une faible influence sur l'émergence. La partie la plus proche, dans les 500 m autour de la boulaie, est occupée par

une forêt. C'est à ce niveau que les usages peuvent avoir une influence, avec un effet de coupes à blanc ou de plantations. Une sylviculture en futaie jardinée est la plus à-même de ne pas avoir d'impact sur la nappe.

Toute rehausse de l'étang mènerait à la disparition de la boulaie tourbeuse.

La thématique du réchauffement climatique et les conditions du maintien des Habitats sera développée à l'échelle de la Puisaye dans un chapitre synthétique.

V.3 - Propositions d'action

Le déterminisme de la boulaie la cantonne à l'émergence. La stratégie de conservation se réalise donc dans une optique de maintien, pas de celle de l'extension ou de la restauration, son état de conservation étant jugé favorable.

V.3.A - Connaissance

La connaissance de cette unité de petit surface est satisfaisante, en rapport avec son état. Le point d'amélioration possible et celui de l'inventaire floristique et en particulier des bryophytes.

V.3.B - Gestion

L'état de l'unité ne requière pas d'action de gestion.

V.3.C - Suivi

La taille de l'entité rend le suivi relativement complexe, en dehors d'une simple estimation des recouvrements de sphaignes et de polytric commun, tous les 5 ans.

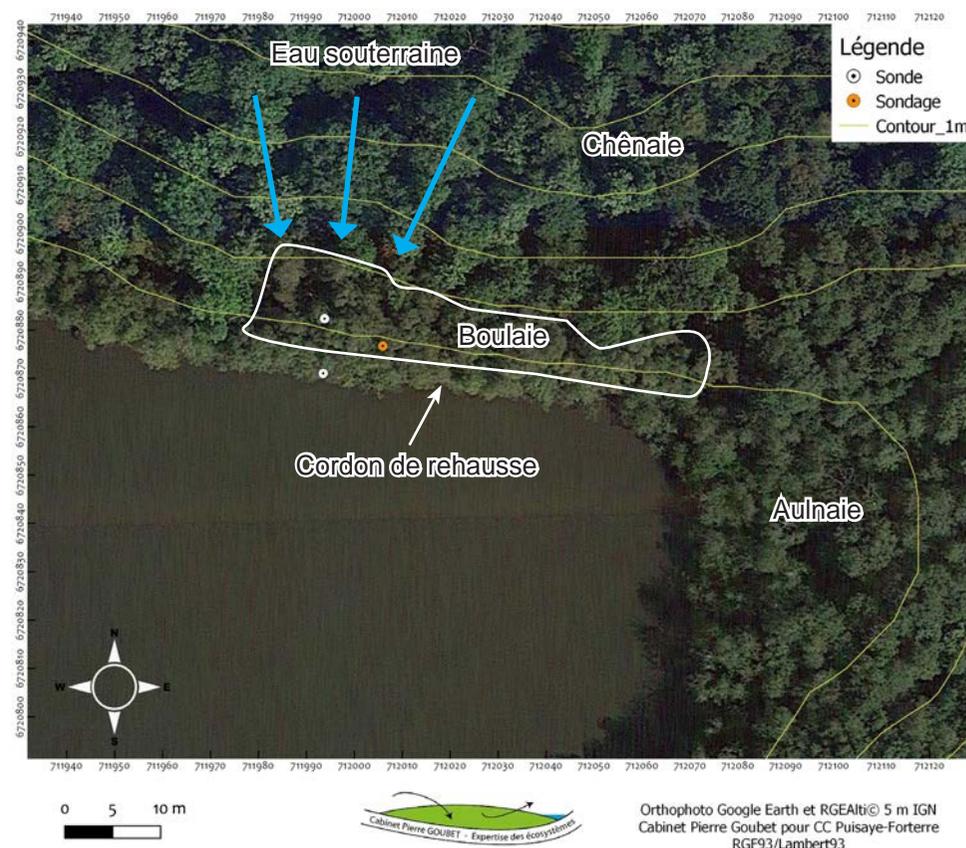


Figure V-2-1: situation des différentes unités écologiques, sondages et sondes sur fond orthophotographique Google Earth. Les logiques d'écoulement sont indiquées par des flèches bleues.

VI. Les Carrières



VI.1 - Résultats-données

Le hameau des Carrières, situé à l'ouest de l'étang de Chassin, au nord du ruisseau du Bourdon et de la route départementale 955, héberge une boulaie tourbeuse. Le site se tient sous un chemin d'exploitation forestière. La pente se situe entre 10 et 16 %. Il s'étend sur une surface d'un hectare.

Le complexe est « barré » d'une série de drains transversaux.

VI.1.A - Épaisseurs de tourbe

Les épaisseurs de tourbe ont été évaluées à la perche ou à la gouge

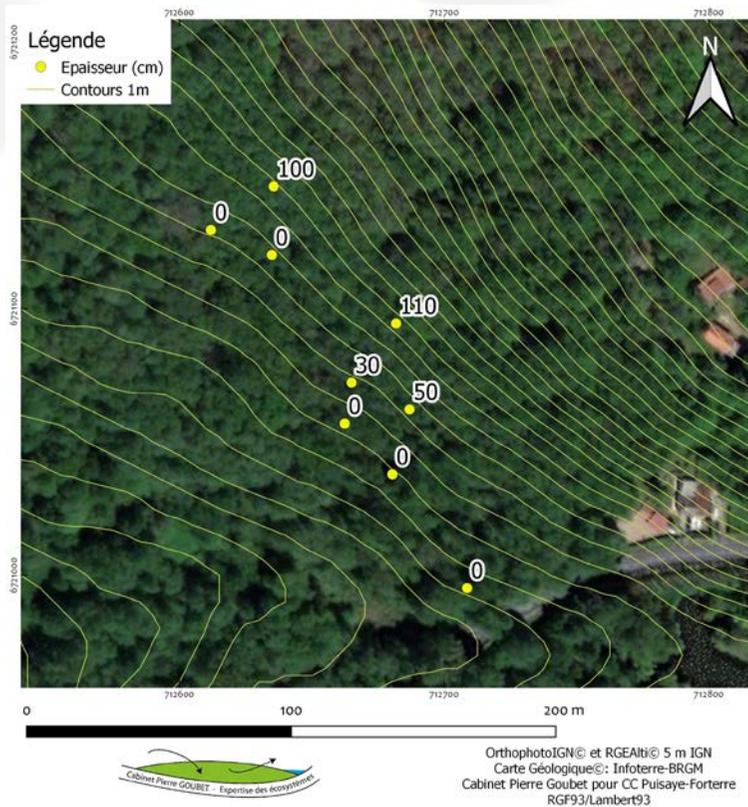


Figure VI-1-1: localisation des épaisseurs de tourbe mesurées à la perche ou la gouge sur le site des Carrières (fond orthophotographique IGN).

(figure VI-1-1). Elles ne dépassent pas 1,10 m. Les plus grandes épaisseurs ont été mesurées dans la partie amont de la zone humide.

VI.1.B - Sols et tourbes sous-jacentes

Quatre sondages pédologiques ont été réalisés à la gouge. Ils correspondent à deux transects amont-aval

espacés d'une cinquantaine de mètres (figure VI-1-2). En complément, deux sondages au carottier russe ont été réalisés pour la pose des tubes piézométriques, dans le secteur d'un des transects pédologiques (figure VI-1-2).

Les sols tourbeux (Histosols des pédologues), sont caractérisés par des tourbes pauvres en fibres, mais intègrent aussi localement des horizons

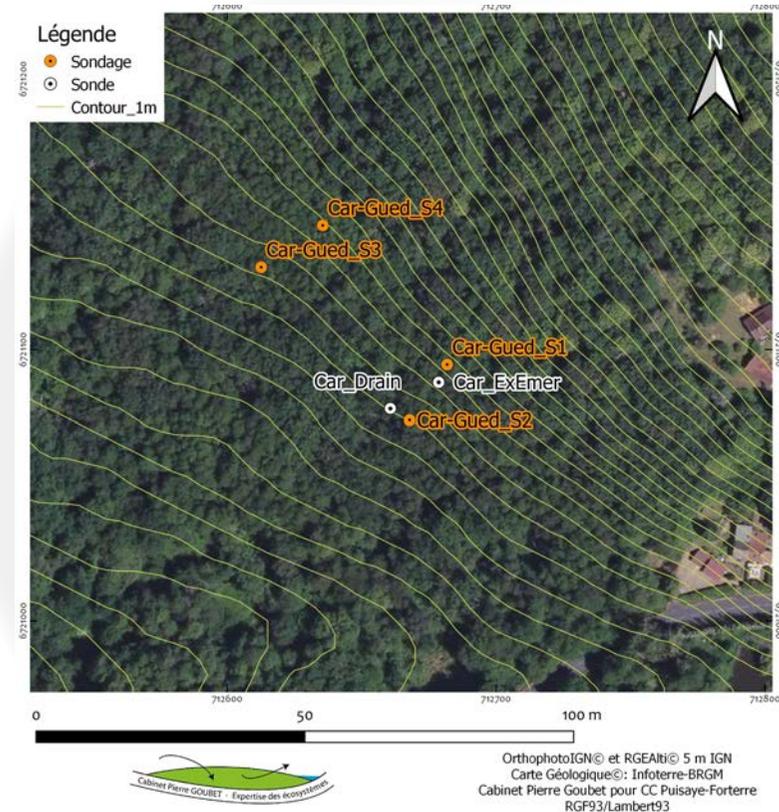
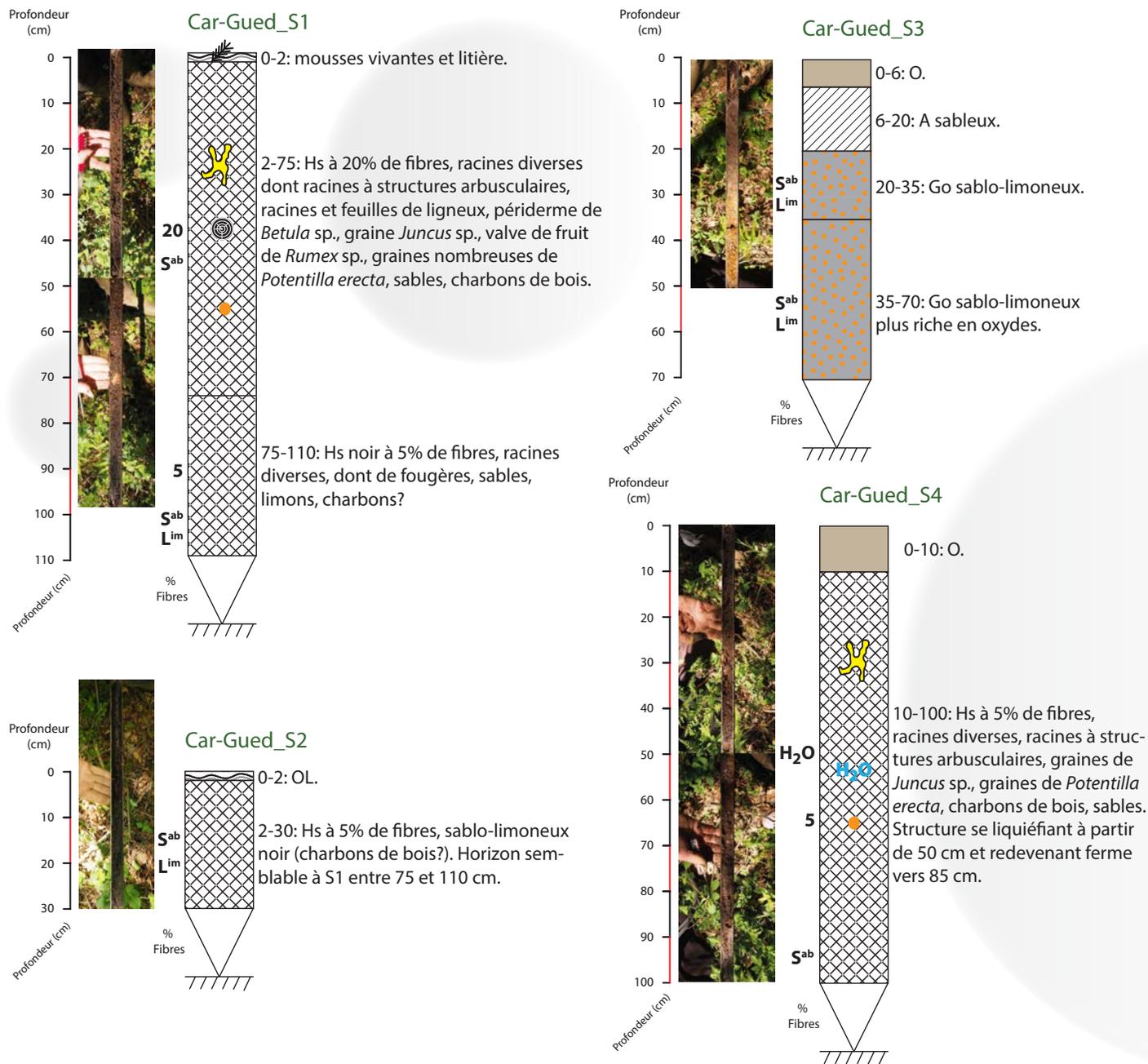


Figure VI-1-2: localisation des sondages et des sondes piézométriques sur fond orthophotographique IGN.



fibreux comme pour le sondage carotté de l'émergence (Car_ExEmer, figure VI-1-4). Les racines à structures arbusculaires sont fréquentes, ce qui indique des périodes de relative sécheresse. Les graines observées sont celles de la tormentille (*Potentilla erecta*), des joncs (*Juncus* sp.), d'oseilles (*Rumex* sp.). Sables et charbons de bois sont aussi fréquents, soit en lits distincts, soit diffus dans la tourbe.

Là où les tourbes sont absentes, les sols sont des gleys (Réductisols) à horizons réductiques typiques ou oxydés, riches en limons et sables.

Malgré les drains et la pente, les sols restent donc encore typiques de ceux de zones humides: tourbeux et réductiques.

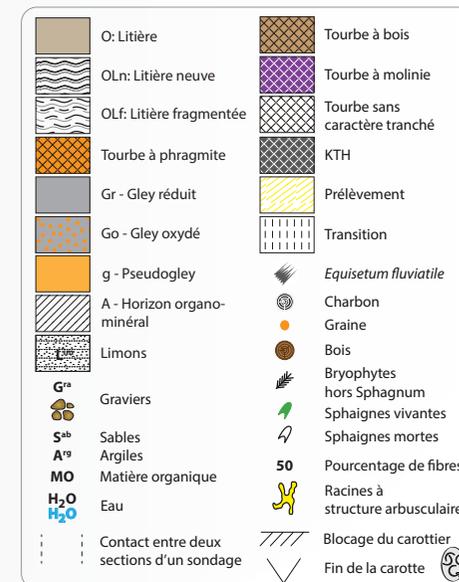
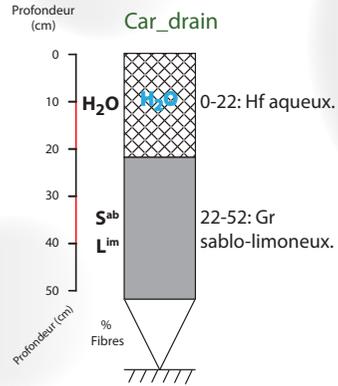
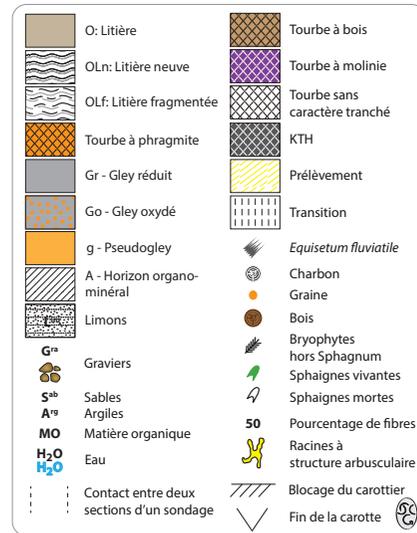
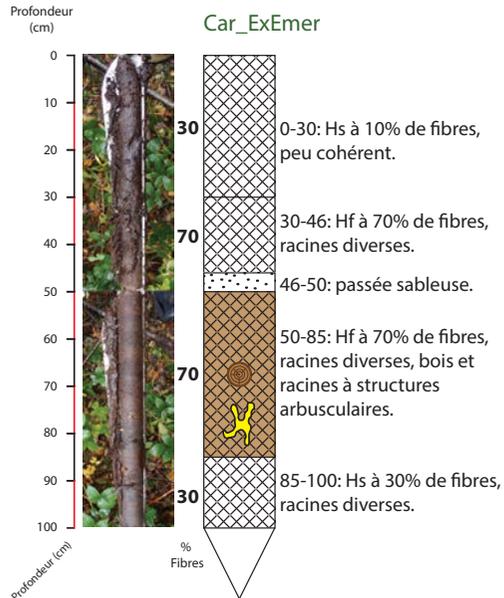


Figure VI-1-3: représentation schématique des sondages réalisés aux Carrières.

VI.1.C - Unités fonctionnelles



Le complexe tourbeux est occupé par une aulnaie-boulaie, riche en ronces avec quelques individus d'osmonde. Quelques pieds de *Carex laevigata* sont aussi présents et indiquent la nature minérale du substrat. Sur le terrain, la délimitation de la zone humide à partir des végétaux est quasi impossible, ce sont les sols qui restent caractéristiques.



VI.1.D - Régimes piézométriques

La stratégie de suivi piézométrique a été axée sur la validation d'un processus d'émergence et sa continuité dans le temps. Un piézomètre a été posé dans la tourbière et un autre dans le drain, où le substrat est un gley sablo-limoneux couvert par un dépôt organique récent typique de ce type de contexte.

Les chroniques annuelles (figure VI-1-5) montrent les régimes binaires des deux lieux avec: un hiver de hautes eaux montrant une certaine stabilité des courbes et un été hydrologique aux basses eaux caractérisé par des niveaux contrastés, en particulier pour le drain.



Figure VI-1-5: chroniques piézométriques quotidiennes annuelles des Carrières du 18 octobre 2019 au 6 octobre 2020, exprimées en cm/sol.

Figure VI-1-4: représentation schématique des profils pédologiques réalisés pour la pose des piézomètres.

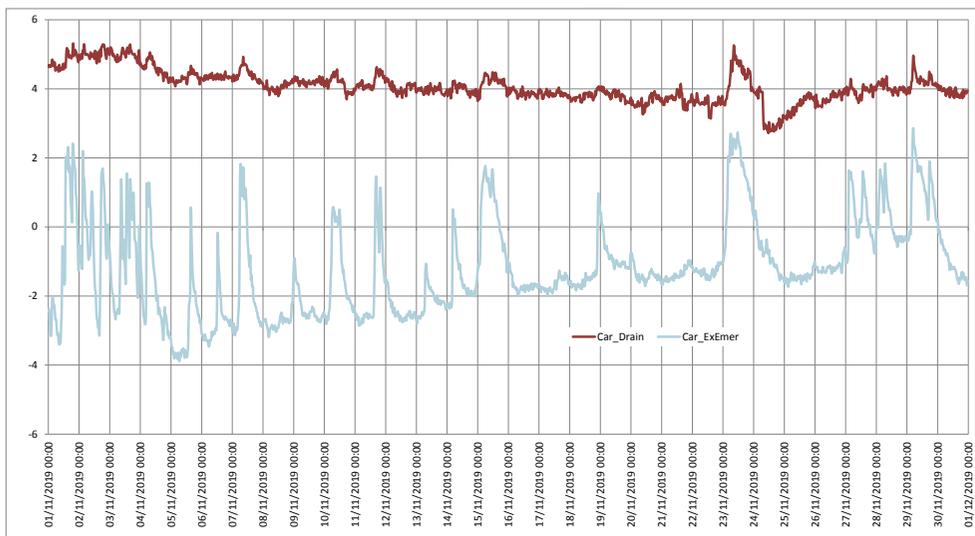


Figure VI-6: chroniques piézométriques bi-horaires de novembre 2019, exprimées en cm/sol.

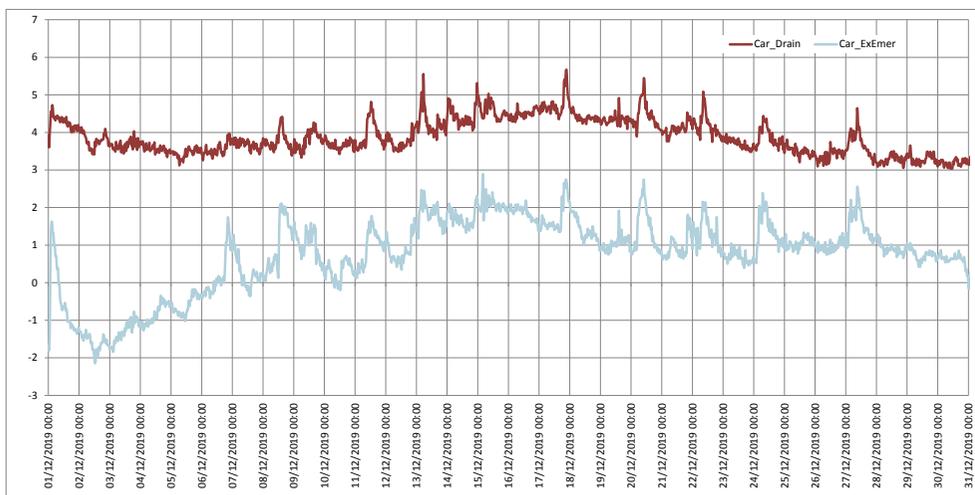


Figure VI-7: chroniques piézométriques bi-horaires de décembre 2019, exprimées en cm/sol.

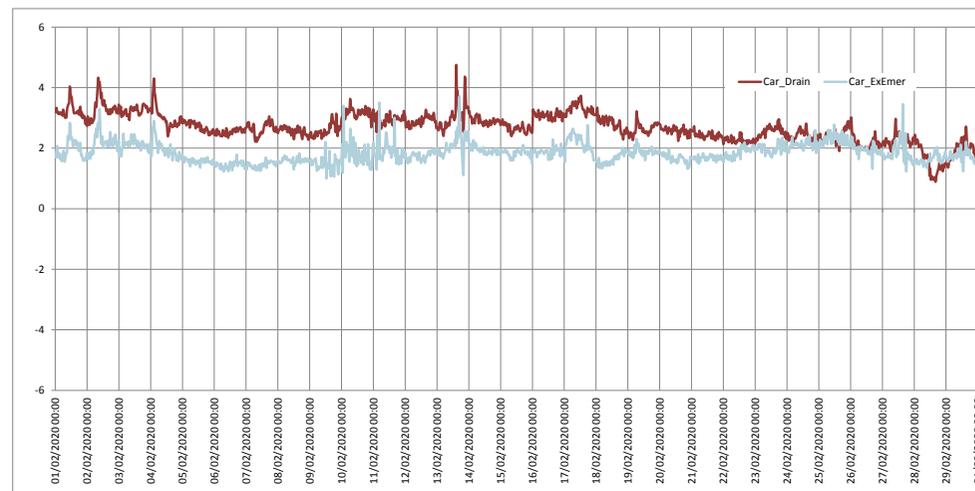


Figure VI-8: chroniques piézométriques bi-horaires de février 2020, exprimées en cm/sol.

Les chroniques hivernales de novembre 2019 (figure VI-1-6), décembre 2019 (figure VI-1-7) et de février 2020 (figure VI-1-8) montrent la constance du niveau du drain (codé Car_Drain) en hiver, et la montée en charge de l'émergence (codée Car_ExEmer) en décembre, puis sa stabilisation en février. La différence de régime des chroniques de l'émergence entre novembre et janvier ou février est probablement induite par un effet de seuil correspondant au passage d'un régime piézométrique à un régime limnimétrique, dès que le sol est saturé, en début décembre pour 2019. A partir de cette date, le sol s'humidifie de manière permanente, l'eau des précipitations «glisse» sur la lame d'eau suintante, en ayant un effet limité sur le niveau d'eau. Par contre, quand le sol n'est pas saturé, l'impact d'une pluie est marquée par une hausse de

4-5 cm. Cela s'explique simplement par le fait que la montée du niveau dans le sol est fonction de la porosité, du volume disponible pour l'eau qui ne correspond qu'à une fraction du volume du sol, alors qu'au dessus du sol, c'est tout le volume qui est disponible (équivalent à une porosité de 100 %). Le drain est constamment inondé et ne présente pas, en hiver, de conditions piézométriques.

La montée en charge du niveau de l'émergence n'est pas synchrone avec les précipitations. Il peut même en être totalement indépendant comme au début du mois de décembre. Ce fait en rapport avec l'origine de l'eau, correspondant à une nappe conséquente, potentiellement éloignée, dont la recharge implique un processus long de transfert à partir de la surface.

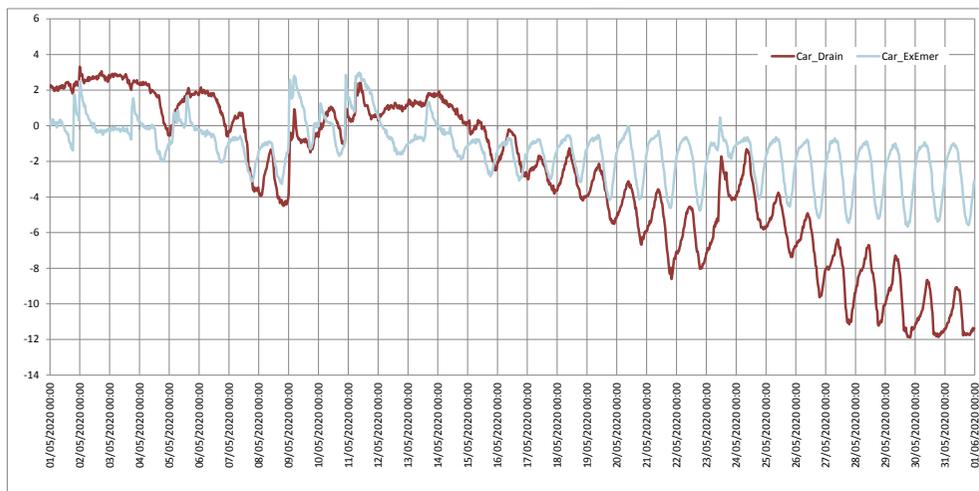


Figure VI-I-9: chroniques piézométriques bi-horaires de mai 2020, exprimées en cm/sol.

Les chroniques estivales, de mai à septembre 2020 (figures VI-1-9 à VI-1-13) montrent parfaitement l'effet de l'évapotranspiration et celui de la décharge hydrogéologique. Les courbes montrent ainsi des baisses diurnes jusqu'à 6 cm d'amplitude, compensées la nuit par des remontées du même ordre ou quelques fois un peu plus faibles, notamment en août ou septembre pour l'émergence.

De manière superposée aux variations nyctémérales, les courbes du drain subissent des baisses générales, en particulier en mai (figure VI-1-9), et en juillet (figure VI-1-11). Ces baisses n'affectent en rien le niveau de l'émergence, bien que les deux piézomètres soient distants d'une vingtaine de mètres. Sur ces éléments, il n'est pas possible de constater un effet du drain sur le niveau de l'eau dans la tourbière.

Les courbes montrent en fait la constance de l'émergence dans le temps, avec un niveau bas diurne au plus profond à 6-8 cm et quelques descentes vers 12 cm, à l'étiage du début du mois d'août. A cette date, il apparaît aussi que le drain ne montre plus les variations nyctémérales de grande amplitude, peut-être parce que le niveau de l'émergence qui l'alimente devient trop bas, ou parce que la capacité de prélèvement des plantes diminue à partir d'une certaine profondeur.

La remontée du niveau général de l'émergence, à partir du 23 juillet, à la suite des pluies du 15 au 17 juillet montre le temps de transfert relativement réduit d'une lame de précipitations vers le toit de la nappe mère de l'émergence (ou du moins d'une des nappes mères), à travers ce qui est nommé la zone insaturée. Cela ne signifie pas

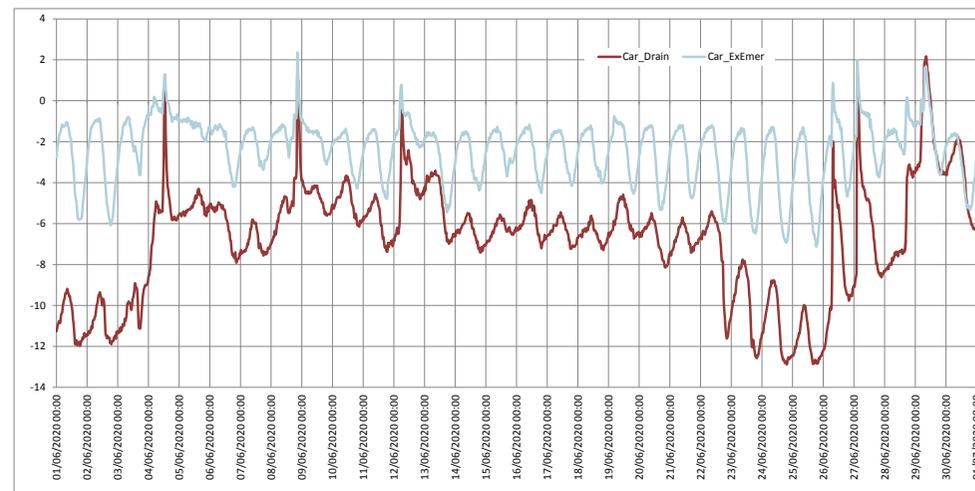


Figure VI-I-10: chroniques piézométriques bi-horaires de juin 2020, exprimées en cm/sol.

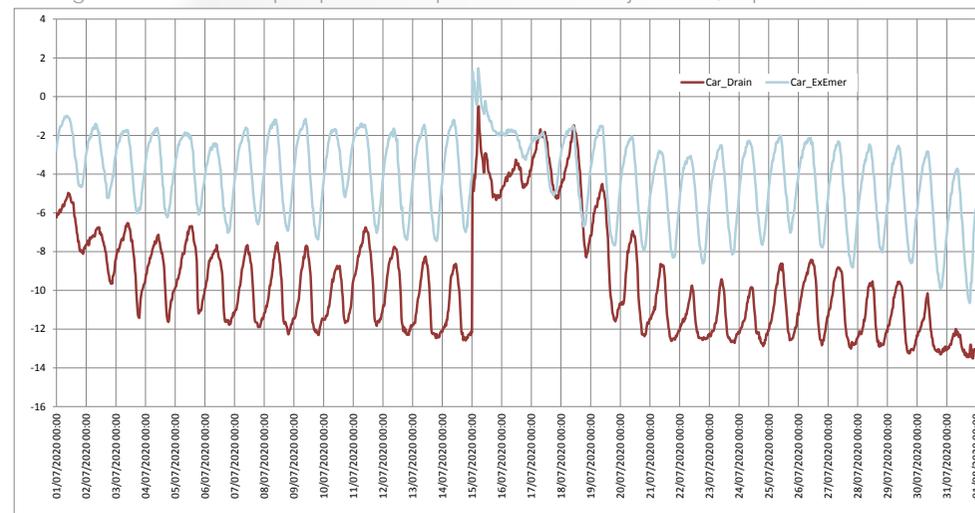


Figure VI-I-11: chroniques piézométriques bi-horaires de juillet 2020, exprimées en cm/sol.

que ce soit l'eau de pluie qui transite du sol à la source, car il s'agit d'un transfert de pression. Dans les faits, le transfert de l'eau peut prendre plusieurs semaines ou plusieurs mois, et souvent

les chemins de l'eau sont divers et le temps de transfert varie en fonction: l'eau d'une émergence est donc constituée de plusieurs types ayant cheminé de manière propre à chacun.

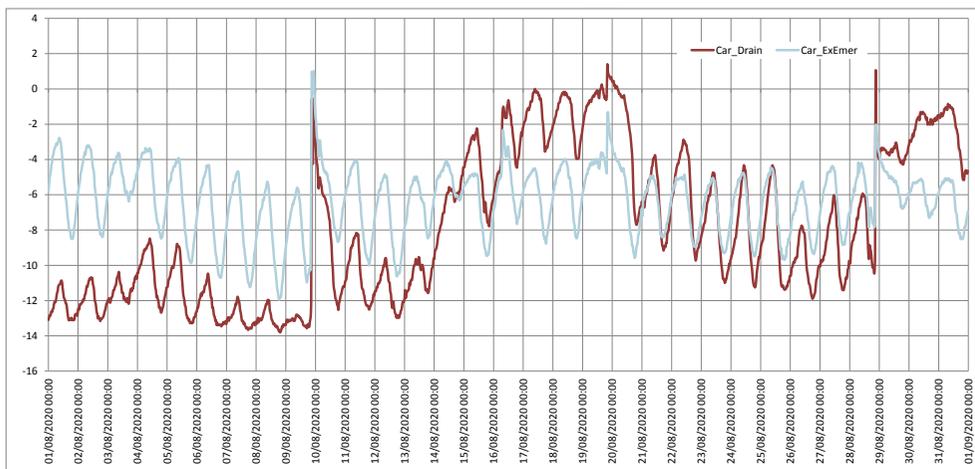


Figure VI-I-12: chroniques piézométriques bi-horaires d'août 2020, exprimées en cm/sol.

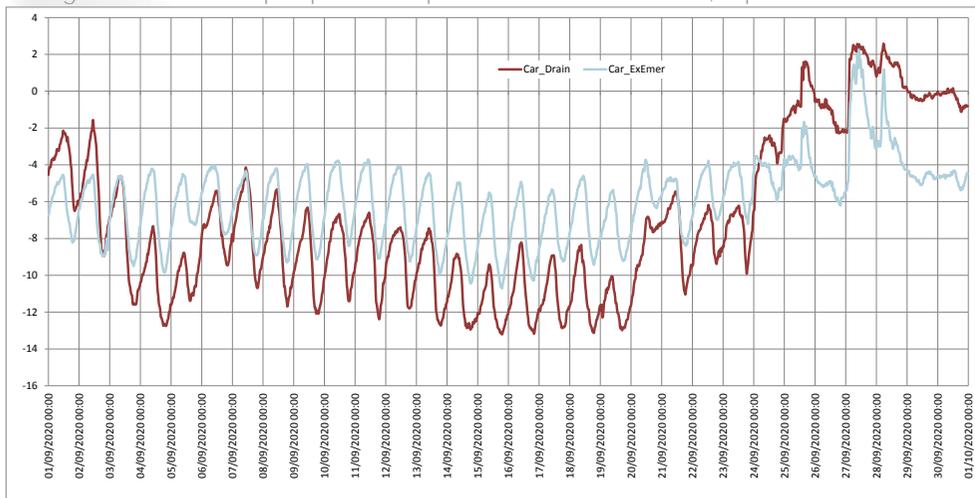


Figure VI-I-13: chroniques piézométriques bi-horaires, septembre 2020, exprimées en cm/sol.

Les variations du niveau du drain suite à une pluie sont plus importantes en valeur absolue que pour l'émergence, ce qui pourrait s'expliquer par le rôle de collecteur d'eau de ruissellement du drain, situé aussi en aval de l'émergence tourbeuse.

La constance des niveaux de l'émergence est remarquable, ce qui implique un phénomène de contrôle du transfert, d'une régulation de la décharge de la nappe propre à la configuration géologique. Ce phénomène de débit régulé est connu des contextes gréseux.

Le niveau d'eau dans le sol est ici déterminé par des paramètres qui rendent peu efficace le drainage, pourvu que la conductivité des tourbes soit faible, comme elle l'est dans la majorité des cas. Les drainages, même réalisés de manière assez rapprochée, comme ici, ne sont donc pas la cause de l'état de la tourbière, relativement peut typique de ce type de contexte.

VI.1.E - Photographies aériennes anciennes

Les photographies aériennes anciennes ne présentent par d'intérêt majeur au delà du fait de montrer que le site est boisé dès les années 1950, à l'exception d'une petite zone mal définie, au centre.

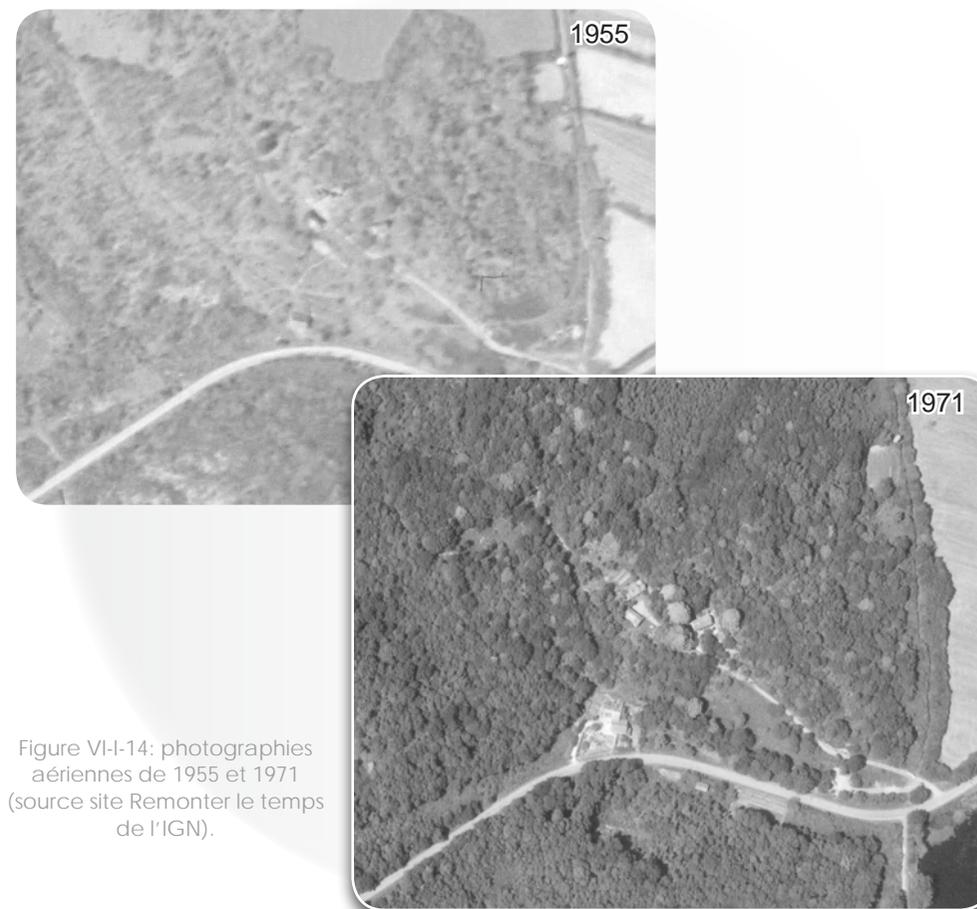


Figure VI-I-14: photographies aériennes de 1955 et 1971 (source site Remonter le temps de l'IGN).

VI.2 - Interprétation fonctionnelle

Le site des Carrières est caractérisé par la présence de tourbe et par une émergence diffuse, mais pas par une végétation typique des émergences tourbeuses de Puisaye, à bouleaux et sphaignes.

La mesure piézométrique indique que l'alimentation en eau de l'émergence est pérenne, dépendante de processus régulés de décharge d'une nappe. Sans en avoir la certitude par manque d'observation directe, il est raisonnable de penser que cette nappe est contenue dans les Sables de Puisaye dont le substrat basal imperméable est constitué des Argiles de Myennes (figure VI-2-1). Le modèle d'écoulement, d'émergence et de turfigenèse qui s'applique aux Carrières est commun en Puisaye et il sera présenté dans la partie dédiée à la synthèse.

Le complexe est drainé, mais cela ne semble pas être la raison qui explique ce manque de structure floristique typique, car les données de suivi des niveaux d'eau montrent que l'émergence est pérenne et permet l'affleurement de la nappe à quelques

centimètres du niveau du sol, même au cœur de l'été.

Les ronces (*Rubus aggr. fruticosus*) représentent une couverture herbacée dense, ce qui n'est pas habituel en tourbière.

A ce stade, nous n'avons pas de modèle pour expliquer la différence entre l'état attendu dans un tel système hydro-pédologique et la structure floristique.

La raison d'une couverture importante des ronces dans un tel contexte reste inconnue. Elle est certainement en lien avec des processus pédologiques, peut-être déterminée par des héritages pastoraux ou sylvicoles comme cela est souvent avancé, mais aussi par des processus autogènes ou climatiques. L'existence d'un lien entre la disponibilité de l'azote et du phosphore est fort probable.

La problématique de la dynamique des ronces sera abordée dans la partie synthèse de ce document.

VI.3 - Propositions d'action

Le site des carrières n'a pas été étudié dans le but principal de préserver un Habitat d'intérêt majeur: il s'agit surtout de connaître les modalités fonctionnelles du point de vue hydrologique et de déterminer ainsi la nature de l'émergence et l'influence des drains. De ce point de vue, les objectifs sont atteints.

VI.3.A - Connaissance

La connaissance du complexe est de notre point de vue satisfaisante. Ce qui peut être amélioré est la compréhension des processus qui déterminent la strate herbacée du complexe, dominée par les ronces, atypique pour une émergence fonctionnelle de ce type.

Comme il a été indiqué, les logiques nutritionnelles sont certainement déterminantes, mais la littérature scientifique n'est pas claire sur cette question et une recherche approfondie est encore nécessaire. Ce sujet est abordé dans la partie synthèse de ce document.

VI.3.B - Gestion

En l'absence de modèle de fonctionnement des aulnaies à ronce scientifiquement argumenté, toute action de

gestion correspond à de l'expérimentation à l'aveugle. De plus, le compartiment pédologique constitue le compartiment clé d'une restauration du site, ce qui impose des actions conséquentes de décapage, ce qui ne peut être engagé sans une bonne compréhension du fonctionnement des communautés d'émergence.

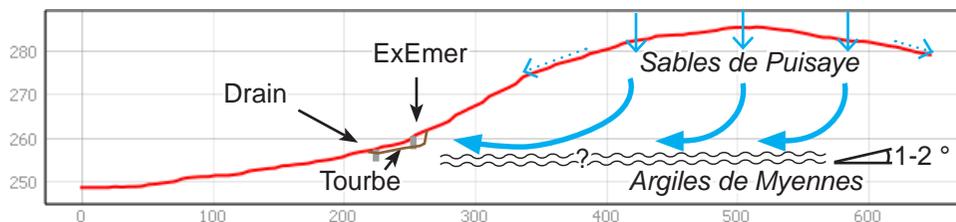
Il ne nous semble donc pas pertinent d'entreprendre une action de gestion spécifique, du moins pour le moment.

VI.3.C - Suivi

L'état floristique du site n'est pas connu avec suffisamment de précision pour constituer l'état zéro d'un suivi pertinent. Cependant, une meilleure caractérisation ne nous semble pas déterminante vu l'état et la taille du complexe.

La caractérisation hydrologique de 2019-2020 est un outil qui pourra servir d'état de référence pour de futurs suivis piézométriques, à réaliser par exemple si d'importants changements de végétation apparaissaient ou pour mesurer une éventuelle dérive climatique ressentie.

Figure VI-2-1: schématisation de l'alimentation probable en eau de site des Carrières.



VII. Chassin



VII.1 - Résultats-données

Le versant situé au sud de la route départementale 955, à l'ouest de l'étang de Chassin, héberge une boulaie sur tourbe. Cette boulaie ne déborde pas le ru qui se situe plus à l'ouest. Au-delà se tient une aulnaie non tourbeuse. Le ru délimite également le parcellaire avec à l'ouest des terrains dont les propriétaires n'ont pas autorisés l'étude hydrologique. L'ensemble du travail a donc été réalisé à l'est du ruisseau.

VII.1.A - Épaisseurs de sédiments meubles

Les épaisseurs de sédiments meubles dépassent 3 m (figure VII-1-1). La répartition est inégale, avec de probable «poches» de tourbe ou d'argile difficiles à circonscrire sans carottage.

VII.1.B - Sols et tourbes sous-jacentes

Un sondage a été réalisé dans la partie amont de la boulaie, dans un secteur d'apparente émergence (figure VII-1-2).

Toute la hauteur de sédiments meubles n'a pas pu être prélevée à la gouge à cause du manque de cohésion, mais la compacité de la partie supérieure est trop forte pour permettre l'utilisation du carottier russe. De ce fait, seuls les 2 premiers mètres ont été étudiés. Le profil est caractérisé par un

horizon de surface, sous les sphaignes vivantes, pauvre en fibres, à sphaignes et à racines de ligneux. La tourbe sous-jacente est majoritairement constituée de fibres: des racines, dont des racines de ligneux; et des restes de molinie. Un horizon encore plus riche en fibres, entre 45 et 60 cm de profondeur, a fait l'objet d'une analyse au microscope et contient des utricules de *Carex echinata*, des graines de joncs, des restes de molinie, de fougères, de sphaignes (*Sphagnum palustre*) et des charbons. Le reste du profil est caractérisé par une tourbe moins riche en fibre, mais proche de celle du dessus, à molinie.

Les sondages réalisés lors de la pose des piézomètres, au carottier ou à la gouge viennent compléter utilement ce premier profil (figure VII-1-3).

Le carottage réalisé dans la boulaie «sèche», sans sphaigne, présente une tourbe pauvre en fibres. La partie supérieure, grumeleuse et d'aspect sec est caractéristique d'une tourbe altérée de type kultureller Trockenhorizont. Elle surmonte un horizon sableux. La tourbe dessous est pauvre en fibre, riche en bois et à microagrégats noirs ou foncés laissant penser à un fort taux de charbons. La base du sondage est riche en bois et en racines à structure arbusculaire indiquant une certaine sécheresse, certainement passagère.

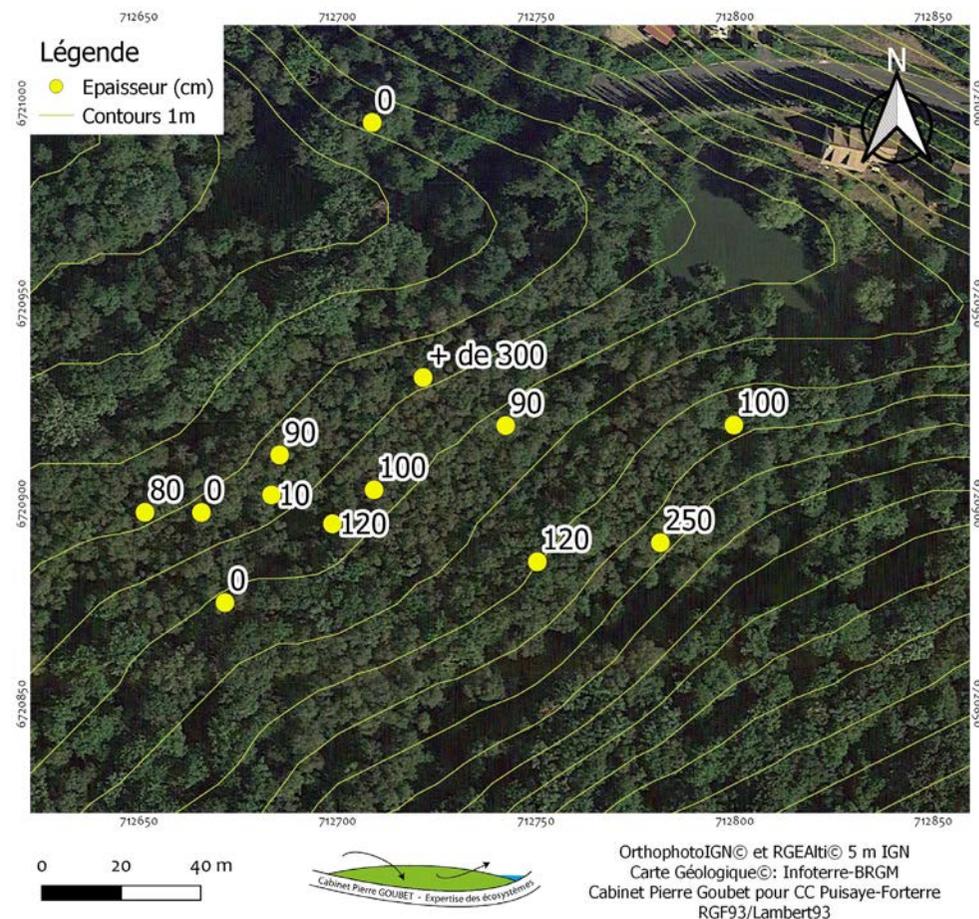
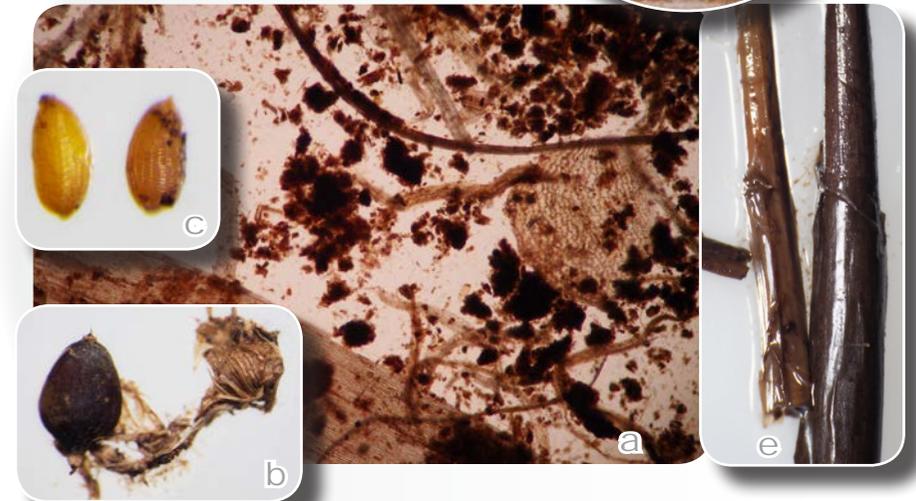
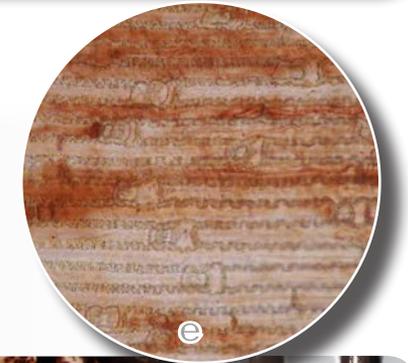
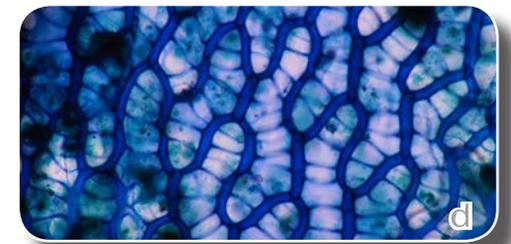
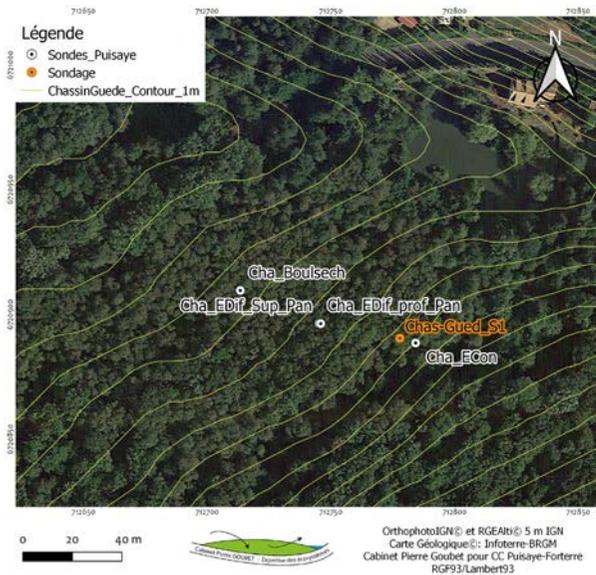
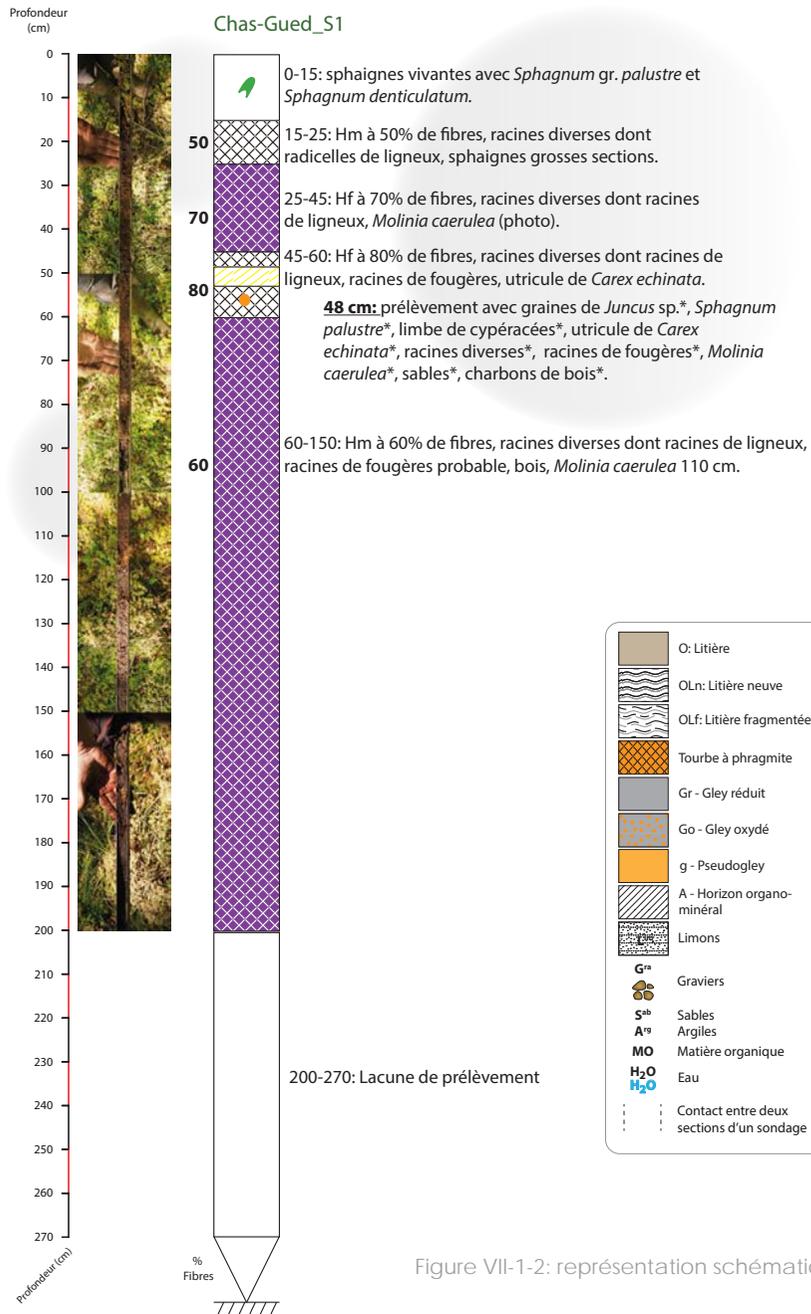


Figure VII-1-1: localisation des épaisseurs de tourbe de la boulaie de Chassin sur fond orthophotographique IGN.

Le sondage réalisé dans ce qui apparaissait comme une émergence diffuse se caractérise par une tourbe pauvre en fibres, en particulier dans la partie supérieure, aussi caractérisée par des microagrégats noirs typiques d'un kultureller Trockenhorizont. La tourbe du dessous, contient des graines

de joncs et du bois à sa base. Elle repose sur un horizon réductique typique limono-sableux, entre 75 et 117 cm de profondeur. En dessous, les traces d'oxydation sont plus importantes, ce qui pourrait indiquer une circulation de nappe relativement oxygénée.



Chas-Gued_S1 à 48 cm, le fond à *Sphagnum palustre* et limbe de cypéracée (a), graine et utricule de *Carex echinata* (b), graines de *Juncus sp.* (c), *Sphagnum palustre* (d), fragments de *Molinia caerulea* (e).

Figure VII-1-2: représentation schématique du sondage et illustrations photographiques du sondage pédologique et paléoécologique de Chassin. Localisation sur fond orthophotographique IGN.

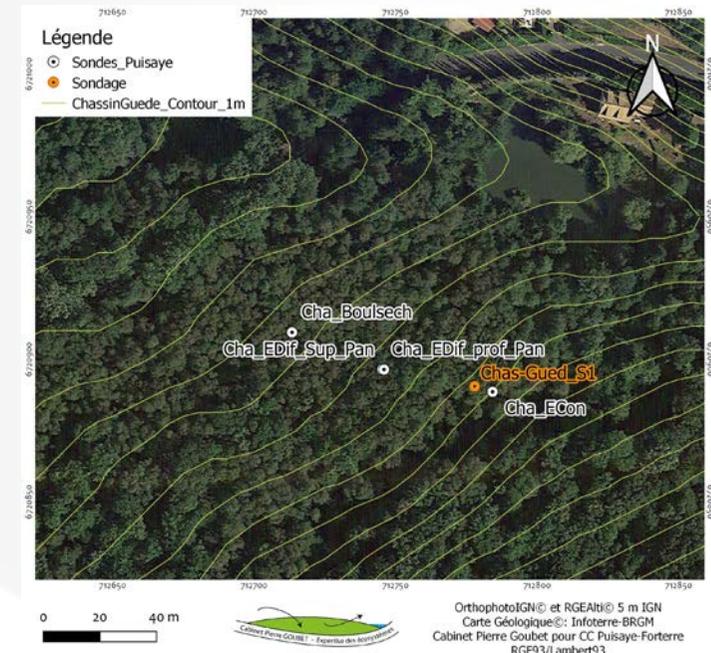
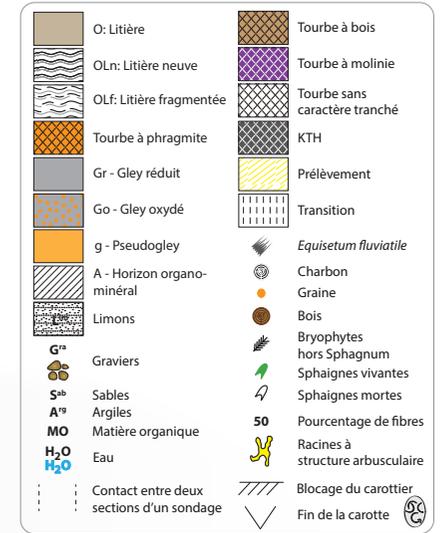
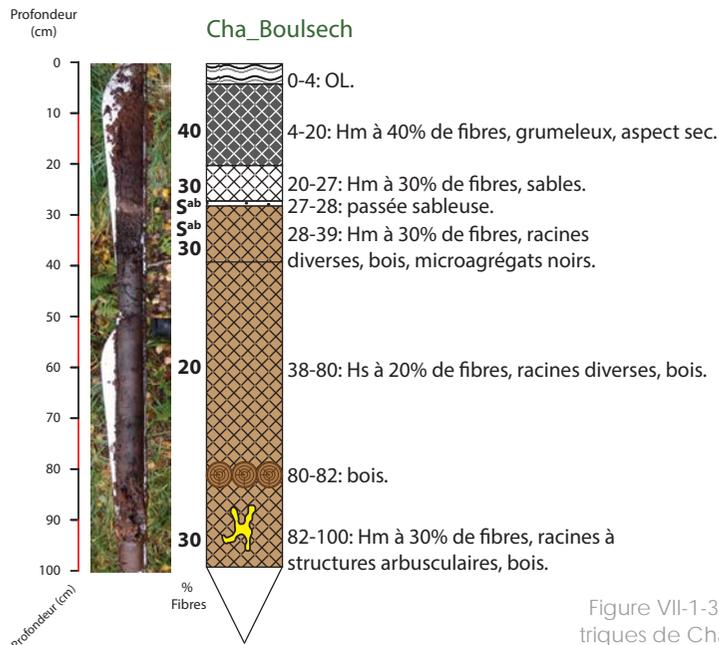
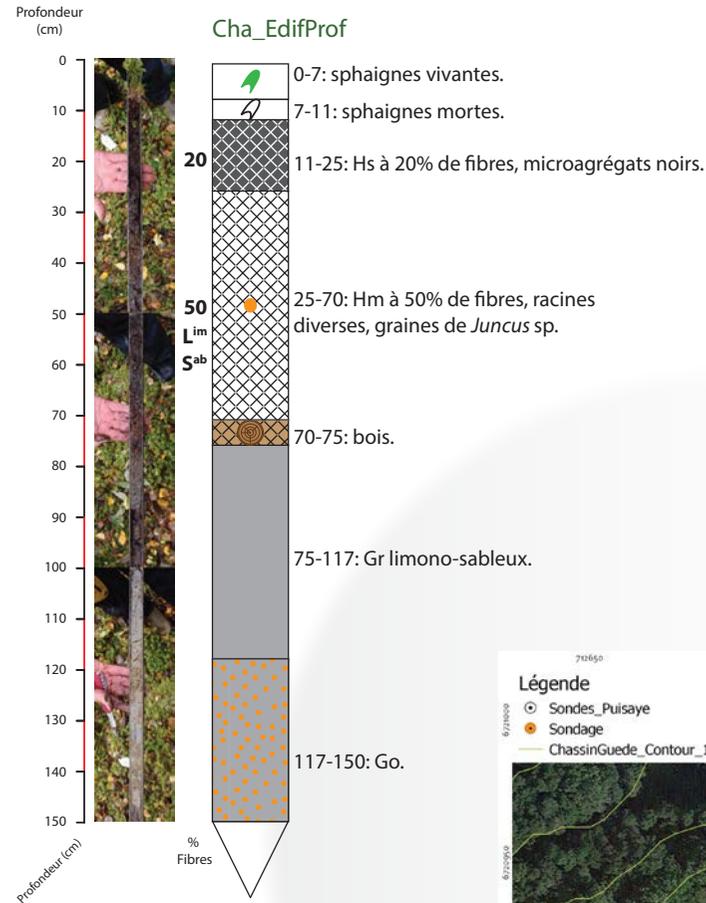
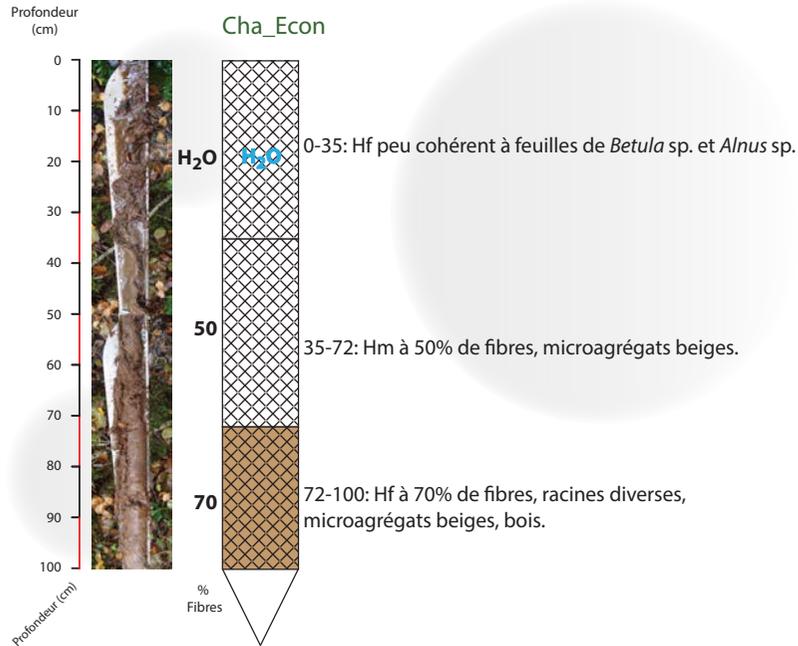


Figure VII-1-3: représentation schématique des sondages piézométriques de Chassin et localisation sur fond orthophotographique IGN.

VII.1.C - Unités fonctionnelles

La structure floristique de la zone tourbeuse varie à une échelle qui rend difficile la cartographie, sauf à mettre en place des protocoles spécifiques.

Trois types de boulaies sont présentes: une se tenant sur une émergence concentrée, à sol tremblant, et une autre sur une émergence diffuse, à sol stable (figure VII-1-4), toutes deux hébergeant *Sphagnum palustre*, *S. angustifolium*, *S. rubellum*. Une troisième est apparemment «sèche», dénuée de sphaigne (figure VII-1-5).

Les trois types ont fait l'objet d'une caractérisation piézométrique qui montre parfaitement les différences de saturation du sol.

VII.1.D - Régimes piézométriques

Le protocole de mesure s'est attaché à caractériser les trois types de boulaie et à mesurer les échanges entre les différents niveaux du sol dans la boulaie sur émergence diffuse à travers un appareillage en flûte de pan.

Pour ce dernier, il s'agit de poser deux tubes en contact avec la nappe

du sol à des profondeurs différentes. Un tube mesure le niveau d'eau en surface ou plus précisément en subsurface (Cha_EdifSup), jusqu'à 28 cm de profondeur, au niveau du capteur. Un autre tube mesure la charge hydraulique de la nappe entre 100 et 150 cm de profondeur (Cha_EdifProf). Il est composé d'une partie pleine de 1 m et d'une partie résillée de 50 cm. Cette partie inférieure est implantée dans le gley limono-sableux (horizon réductique) sous la tourbe.

Les résultats attendus pour ce type d'appareillage sont des estimations de flux entre la surface et la profondeur, en

fonction des niveaux relatifs dans les deux tubes: quand le niveau du tube de surface est plus élevé que celui de profondeur, le flux est descendant, et inversement, le flux est montant quand le niveau du tube de profondeur est plus élevé.

Ce type d'appareillage est particulièrement difficile à exploiter pour diverses raisons. Par exemple, ici, les mesures en été sont rendues impossibles à cause de la capacité de mesure limitée du tube de surface (28 cm).

Les chroniques annuelles (figure VII-1-6) montrent parfaitement la



Figure VII-1-4: à Chassin, boulaie à sphaignes sur émergence diffuse à sol stable.



Figure VII-1-5: à Chassin, boulaie sans sphaigne.

hiérarchisation des niveaux en fonction des trois types de boulaie. Le niveau de l'émergence concentrée (codé Cha_Econ) est à la fois le plus stable dans le temps et le moins en profondeur. Il ne descend pas en dessous de 11 cm de profondeur à l'étiage d'août 2020 et affleure en surface une bonne partie de l'hiver. Ces caractéristiques sont typiques d'une émergence concentrée et confirme donc l'impression de terrain.

L'appareillage en flûte de pan de ce qui apparaissait comme une probable émergence diffuse (codé Cha_EdifProf

pour le tube descendant en profondeur et Cha_EdifSup pour le tube en surface) montre des niveaux «intermédiaires» en profondeur, avec des variations fortes en été.

La courbe de la boulaie sèche (Cha_Boulsech) s'individualise par les profondeurs relativement importantes du toit de la nappe, autour de 40 cm l'hiver et 70-80 cm en été. A partir de la mi-juillet, le niveau baisse régulièrement sans aucune réaction vis-à-vis des apports pluviométriques, contrairement à l'émergence diffuse. La

«sécheresse» apparente de cette boulaie est donc corrélée ici à des niveaux d'eau bas, en hiver comme en été.

Les chroniques de novembre (figure VII-1-7) correspondent théoriquement à l'automne hydrologique, considéré comme la période de remontée des niveaux des profondeurs estivales vers la valeur de base hivernale, valeur qui est atteinte en 2019-2020 vers la mi-décembre. Dans les faits, les niveaux de novembre 2019 restent en moyenne stables, malgré un régime de précipitations régulières. Les niveaux

de la nappe de surface de l'émergence diffuse sont légèrement plus hauts que ceux de profondeur, ce qui exclue l'existence d'un flux ascendant, sans pour autant prouver un flux descendant, l'eau des précipitations pouvant «couler» sur le toit de la nappe qui émerge à cet endroit, sans l'alimenter, ce qui est l'hypothèse la plus probable.

Les chroniques de décembre (figure VII-1-8) montrent à la fois des apports pluviométriques réguliers et une remontée des niveaux aux trois lieux. La courbe de l'émergence concentrée

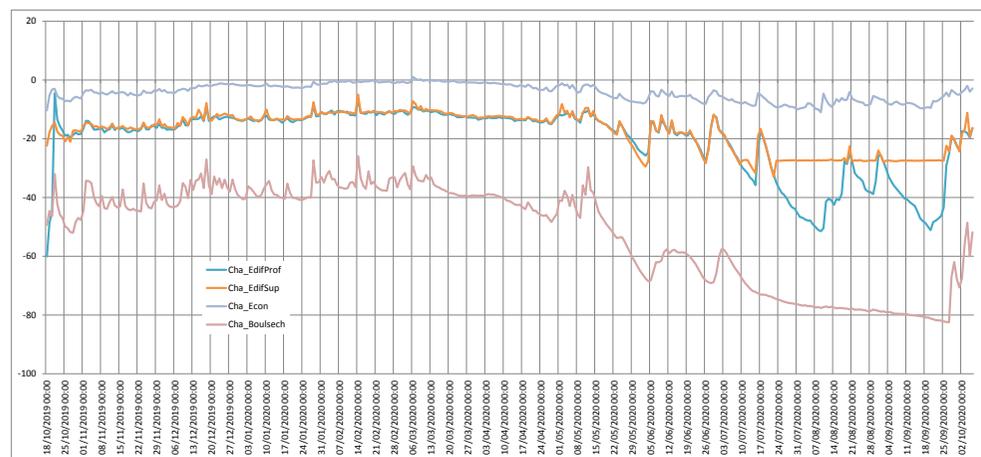


Figure VII-I-6: chroniques piézométriques quotidiennes annuelles de Chassin du 18 octobre 2019 au 6 octobre 2020, exprimées en cm/sol.

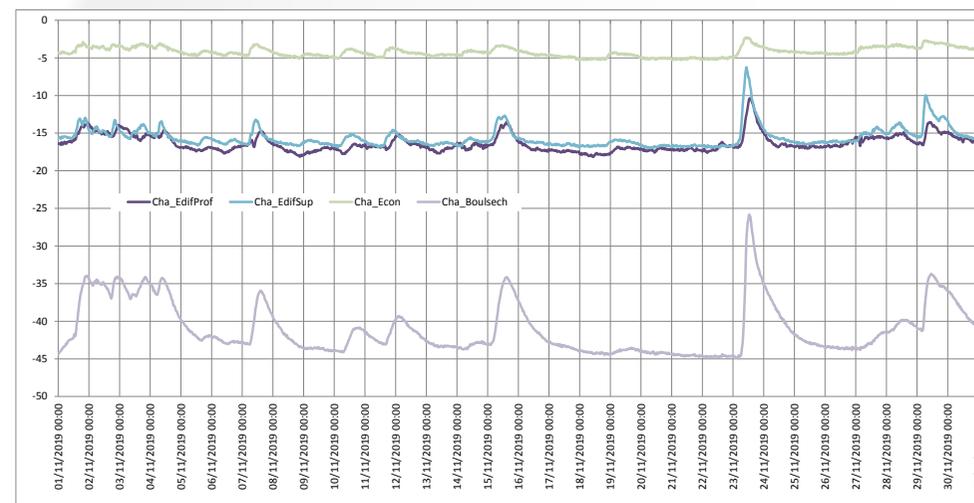


Figure VII-I-7: chroniques piézométriques bi-horaires de novembre 2019 de Chassin, exprimées en cm/sol.

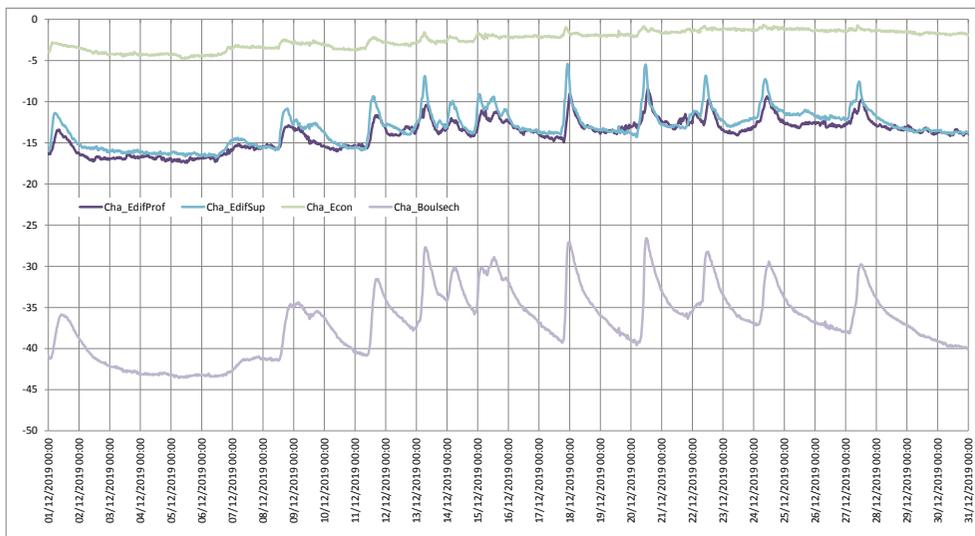


Figure VII-I-8: chroniques piézométriques bi-horaires de décembre 2019 de Chassin, exprimées en cm/sol.

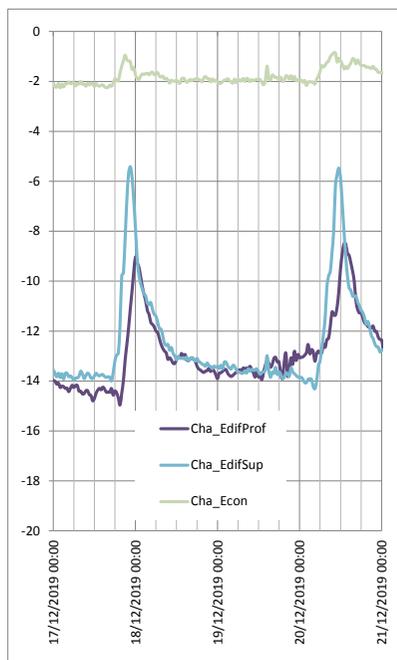


Figure VII-I-9: chroniques piézométriques bi-horaires du 17 au 19 décembre 2019 de Chassin, exprimées en cm/sol.

montre une remontée par à-coups successifs corrélés aux précipitations, sans que les pluies provoquent de fortes remontées. Au contraire, la chronique de la boulaie sèche se caractérise par des remontées fortes du niveaux, et des baisses consécutives presque aussi fortes. Fait notable, les courbes des piézomètres de l'émergence diffuse s'inversent quelques 48 heures après une pluie, montrant l'existence d'une décharge hydrogéologique induite par la pluie précédente, par exemple des 17 au 20 décembre (figure VII-1-9). Il est fort probable que ce délai de 48 heures corresponde au temps de parcours, dans la zone insaturée du sol, de la lame d'eau de pluie dans la zone d'alimentation de la nappe mère de l'émergence. Cette pression ne fait pas

remonter l'eau de la surface, sauf le 23 décembre.

Un autre élément marquant des courbes de décembre est le délai de quelques heures entre l'effet d'une pluie sur la nappe haute et son effet sur la nappe basse. De la même façon, la baisse du pic se réalise quelques heures plus tard. L'interprétation de ces faits est difficile car la pression est sensée se transmettre à la vitesse du son, hors, la poids de l'eau de surface ne semble pas s'imposer à l'eau de profondeur.

Les chroniques de janvier, février et mars 2020 (figures VII-1-10 à VII-1-12) ne présentent pas de fait nouveau.

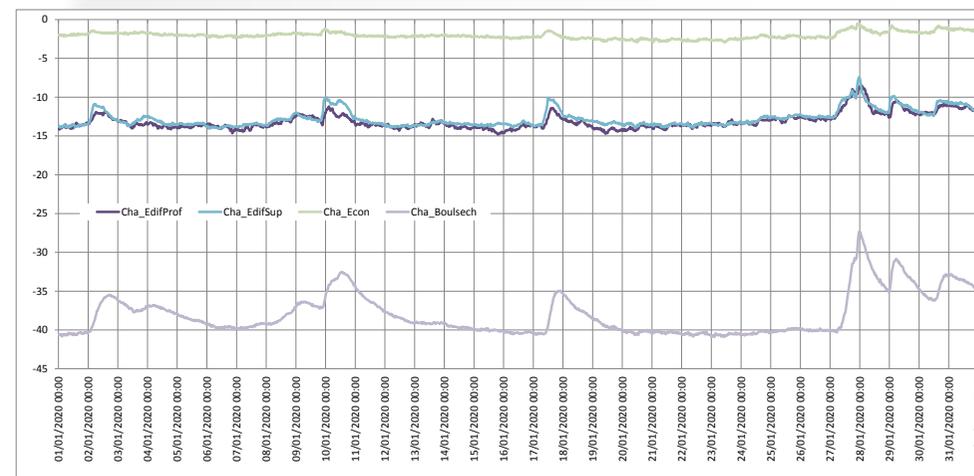


Figure VII-I-10: chroniques piézométriques bi-horaires de janvier 2020 de Chassin, exprimées en cm/sol.

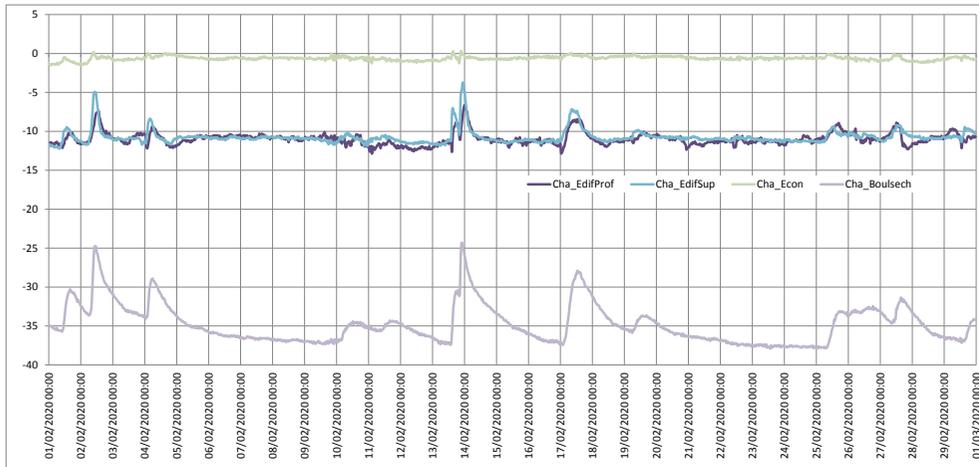


Figure VII-I-11: chroniques piézométriques bi-horaires de février 2020 de Chassin, exprimées en cm/sol.

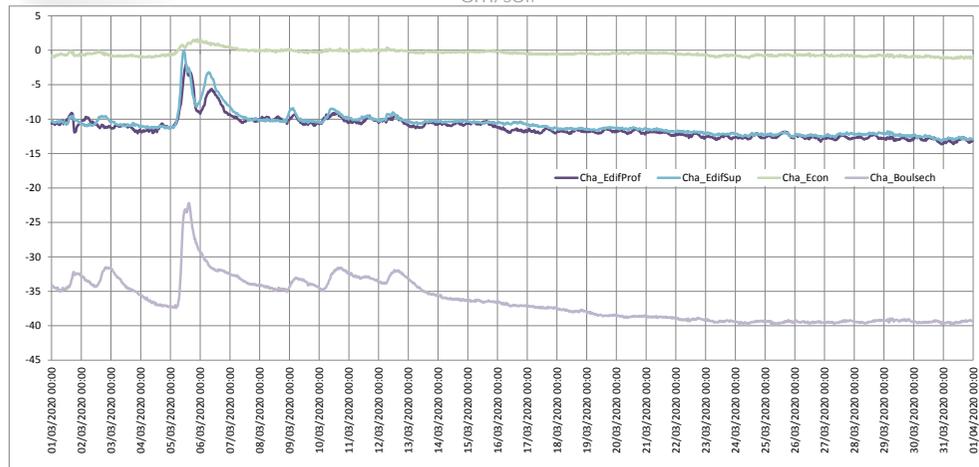


Figure VII-I-12: chroniques piézométriques bi-horaires de mars 2020 de Chassin, exprimées en cm/sol.

Par contre, celles d'avril (figure VII-1-13) montrent l'incidence de l'évapotranspiration qui se met progressivement en place à partir du 10. Les valeurs engagées sont les plus fortes pour la boulaie sèche.

Les chroniques de mai (figure VII-1-14) présentent de manière plus marquée encore le phénomène d'évapotranspiration pour les chroniques des émergences tout du moins. Il est intrigant de constater que le processus se réalise sur la nappe profonde

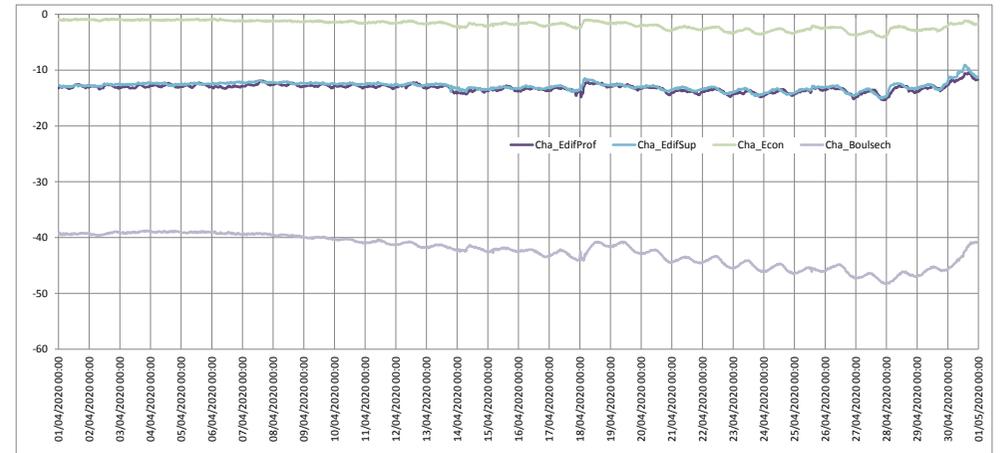


Figure VII-I-13: chroniques piézométriques bi-horaires d'avril 2020 de Chassin, exprimées en cm/sol.

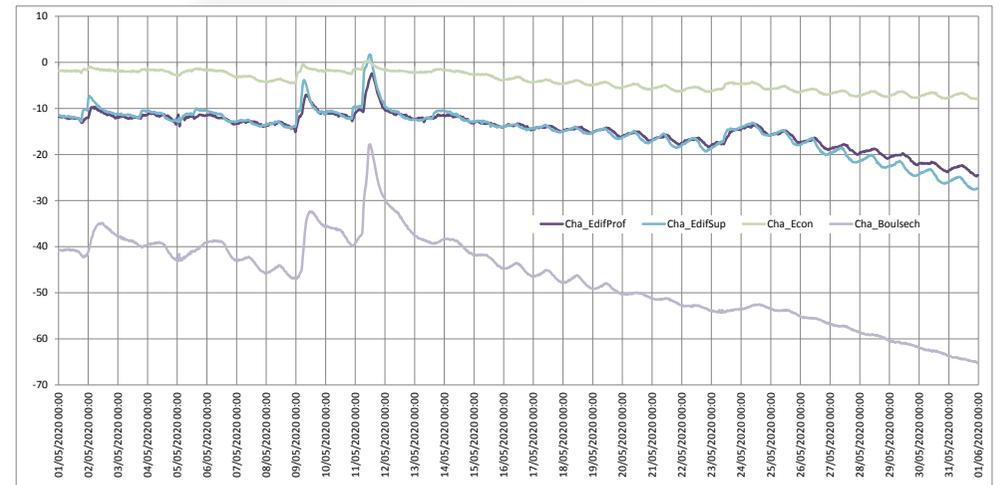


Figure VII-I-14: chroniques piézométriques bi-horaires de mai 2020 de Chassin, exprimées en cm/sol.

de l'émergence diffuse avec quelques heures de décalage comparé à la surface, tout en observant que le phénomène est décalé d'un délai intermédiaire pour l'émergence concentrée. On observe même à certaine période des variations synchrones entre la

nappe profonde de l'émergence diffuse et le niveau de l'émergence concentrée (figure VII-1-15). Les courbes montrent aussi le gradient ascendant de l'eau à travers le niveau supérieur de la valeur de la nappe profonde comparée à la nappe de surface. Ce fait

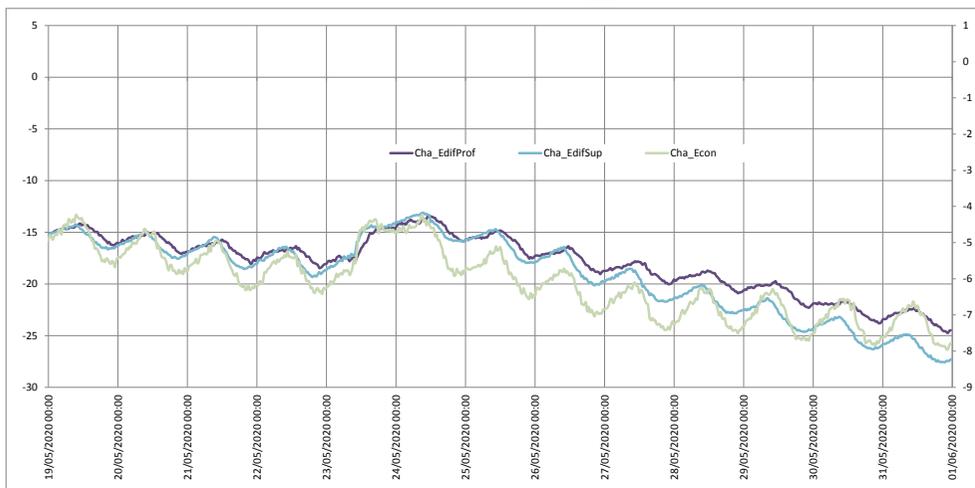


Figure VII-15: chroniques piézométriques bi-horaires de mai 2020 de Chassin, exprimées en cm/sol.

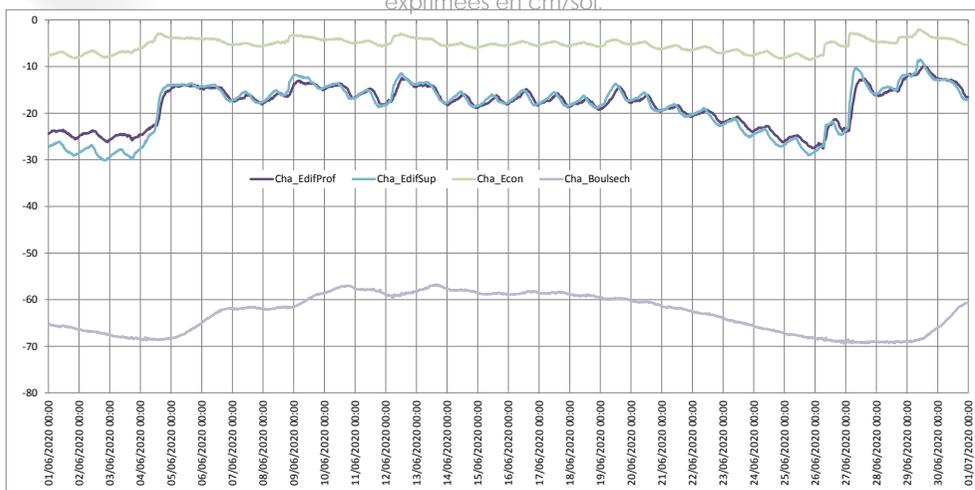


Figure VII-16: chroniques piézométriques bi-horaires de juin 2020 de Chassin, exprimées en cm/sol.

est particulièrement marqué à la fin du mois.

Le mois de mai est aussi celui de la déconnexion de la nappe de la boulaie sèche avec les plantes, vers le 28.

La courbe montre tout autant le tarissement de la nappe à cet endroit, vers le 20 (arrêt des remontées nocturnes).

Les chroniques de juin à septembre (figures VII-16 à VII-19) ne

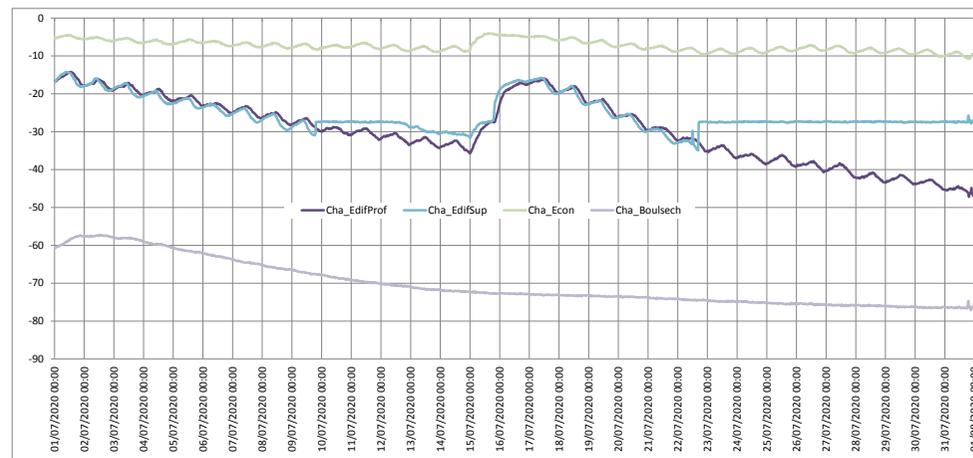


Figure VII-17: chroniques piézométriques bi-horaires de juillet 2020 de Chassin, exprimées en cm/sol.

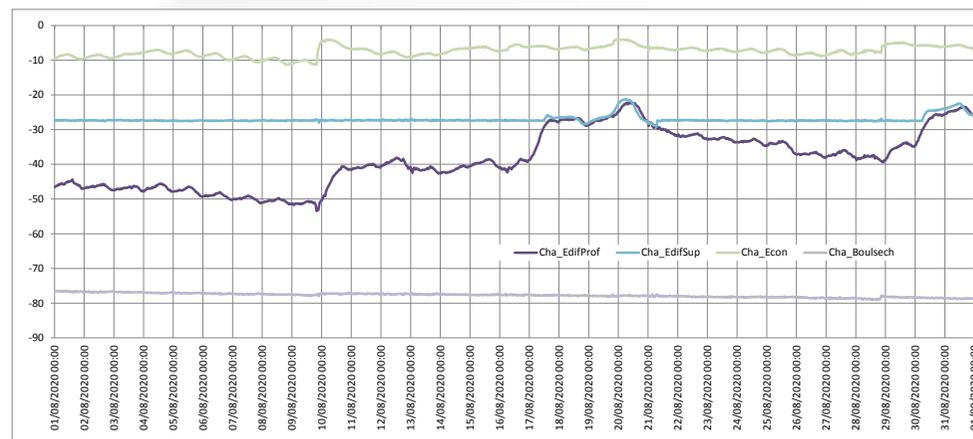


Figure VII-18: chroniques piézométriques bi-horaires d'août 2020 de Chassin, exprimées en cm/sol.

montrent pas de fait nouveau si ce n'est le passage sous le capteur du niveau de l'eau dans l'émergence diffuse, en juillet, et surtout la tenue d'un apport nocturne sur toute la durée du suivi, indiquant la disponibilité d'une eau de

source permanente, sauf pour la boulaie sèche et relativement en profondeur pour l'émergence diffuse.

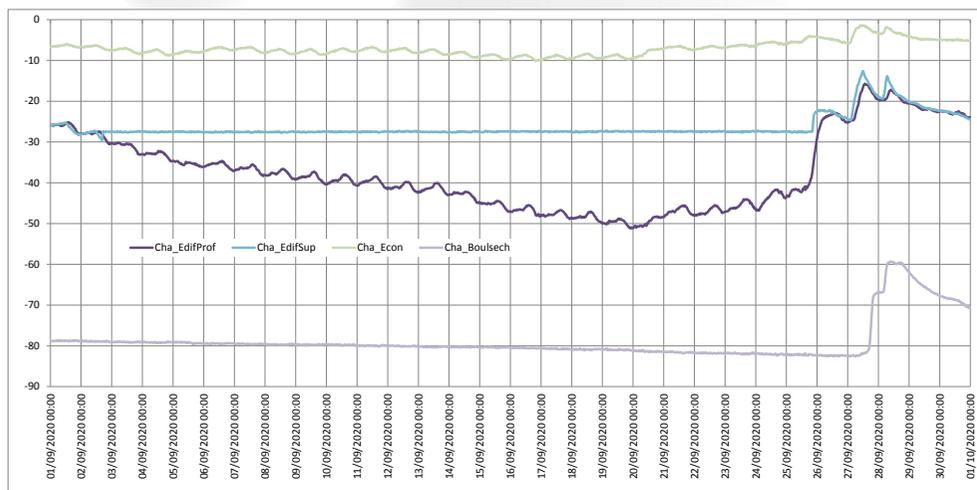


Figure VII-I-19: chroniques piézométriques bi-horaires de septembre 2020 de Chassin, exprimées en cm/sol.

VII.1.E - Photographies aériennes anciennes

Quatre clichés aériens parmi ceux disponibles sur le site dédié de l'IGN sont présentés dans la figure VII-1-20: 1949, 1955, 1971 et 1983.

La série permet de constater que

le secteur des émergences était relativement peu boisé en 1949 et que la fermeture atteint l'exhaustivité dès le début des années 1980. Cette dynamique n'est d'ailleurs pas propre aux zones humides, elle se réalise aussi sur les versants secs au sud-est des émergences.

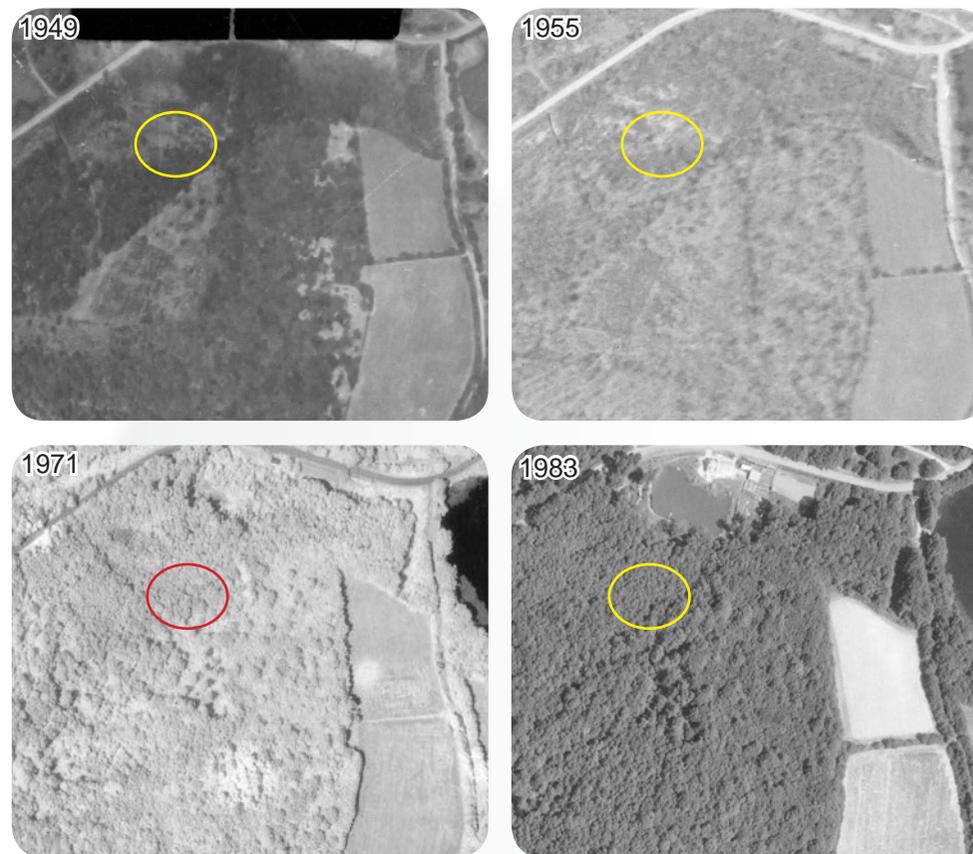


Figure VII-I-20: photographies aériennes de 1949, 1955, 1971 et 1983 (source site Remonter le temps de l'IGN).

VII.2 - Interprétation fonctionnelle

Le complexe étudié est entendu ici comme un secteur tourbeux où les boulaux sont présents tout autant ou plus que l'aulne. Le caractère oligotrophe, est marqué par la strate herbacée et arborescente. Il existe a priori une bonne corrélation entre la tourbe en tant que sol et le couvert végétal, mais aucune mesure prouvant ce fait n'est disponible. C'est un sujet récurrent qui sera abordé dans une partie synthétique de ce travail.

Le contexte géologique et géomorphologique des boulaies de Chassin est celui, classique, des Sables de la Puisaye reposant sur les Argiles de Myennes. L'altitude du contact entre ces deux formations n'est pas connue avec précision, mais elle est certainement proche de celle du complexe, même si la carte ne le précise pas.

Les boulaies de Chassin étudiées, se présentent suivant trois modalités floristiques, toutes sur tourbe, indiquant des processus de turfigenèse plus ou moins anciens.

Le premier type se tient sur une émergence semi-concentrée, d'une surface d'à peine 100 m². L'arrivée de l'eau en surface est indiquée par la présence de l'eau elle-même et surtout par l'existence de dépressions «vaseuses» et de tourbes peu cohérentes, typiques de ces zones de contact direct avec la

nappe. Les sphaignes sont très courantes. La tourbe y est épaisse comparée aux autres types.

Le second type ne montre pas les dépressions vaseuses ou les tourbes liquéfiées, mais la couverture de sphaignes reste très importante. Cela nous laisse présumer d'une émergence également, mais qui est ici diffusée au sein du sol, le contact avec la nappe est modulé par une couche (semi)-perméable.

La dernière boulaie est dénuée de sphaignes; son sol est peu couvert, majoritairement par la molinie. La tourbe est présente, prouvant des processus d'émergence passés.

Les données piézométriques indiquent des différences dans les profondeurs moyennes de la nappe par rapport au sol, avec un niveau sub-affleurant pour l'émergence concentrée, un niveau profond pour la boulaie «sèche» et un niveau intermédiaire pour l'émergence concentrée.

Les logiques hydrologiques actuelles sont cohérentes avec l'idée de l'existence d'une zone d'émergence de la nappe des sables de la Puisaye à proximité de leur contact avec les Argiles de Myennes sous-jacentes (figure VII-2-1). De plus, comme l'indique la présence de tourbe là où l'eau n'émerge

plus, la géométrie de la décharge de la nappe a varié au cours du temps; elle est moins étendue qu'elle ne l'a été, ou bien elle s'est déplacée vers l'amont.

La coupe topographique réalisée dans un axe perpendiculaire à la pente du versant (figure VII-2-1) rend compte de la proximité de l'étang de Chassin et de l'emplacement du complexe au sein d'une concavité à mi-pente sur le versant. Est-ce que cette inversion de courbure dans le relief est induite par la

différence de lithologie entre les Sables de Puisaye et les Argiles de Myennes? Est-ce que la masse d'eau de l'étang joue un rôle dans la pression exercée sur l'eau qui émerge? La boulaie «sèche» est-elle le témoin d'une émergence plus étendue ou d'une baisse de pression? Ces questions méritent d'être posées dans le but de préciser les conditions de conservation de ce système tourbeux, mais les aborder nécessitent des mesures complémentaires dont le coût est important.

VII.3 - Propositions d'action

L'entité patrimoniale, attribuable à l'Habitat 91DO*, peut être délimitée par la conjonction de la tourbe et du boulaie. Son bon fonctionnement est déterminé par: (1) l'engorgement quasi permanent; (2) une eau relativement pauvre en nutriments; (3) l'absence de pâturage ou tout autre perturbation du sol. Quelles sont les actions de connaissance, de gestion ou de suivi possibles dans un tel contexte?

VII.3.A - Connaissance

La connaissance du complexe acquise sur la base d'un relatif faible investissement est suffisante pour orienter la gestion de l'Habitat dans ces limites actuelles.

L'amélioration de la connaissance a rapport avec des thématiques d'approfondissement du fonctionnement ancien du système en vue d'une

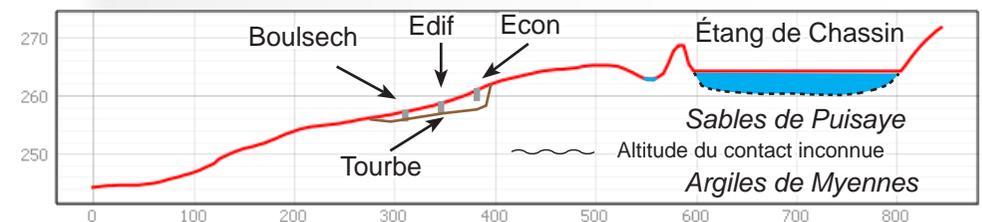


Figure VII-2-1: coupe topographique du site et de son environnement dans un axe perpendiculaire à la pente du versant. Situation des différentes unités citées dans le texte.

restauration de la surface totale occupée par la tourbe, aujourd'hui seulement en partie occupée par l'Habitat d'intérêt communautaire.

Il serait pour cela nécessaire de déterminer pourquoi l'émergence est-elle aujourd'hui réduite, ce qui requière une description précise du relief et une caractérisation précise des épaisseurs de tourbe sur la base d'un levé conjoint épaisseur-altitude. Une analyse complémentaire des variations de niveau d'eau, elle aussi sur la base d'une précision altimétrique des niveaux, est tout autant nécessaire.

L'effet de l'étang de Chassin est un autre sujet pouvant se révéler utile pour comprendre le fonctionnement de la tourbière, principalement pour déterminer si les vidanges de l'étang portent préjudice à l'Habitat. Pour cela, il paraît utile de programmer un suivi conjoint

tourbière-étang lors d'une future vidange, en réalisant le suivi plusieurs mois avant et après l'assec.

VII.3.B - Gestion

Aucun gestion directe n'est requise. La conservation s'appuie sur l'absence de perturbations d'origine humaine, de la coupe de bois au drainage, en passant par du piétinement ou des passages d'engins.

Tout projet de pompage dans un rayon de 300 m autour du complexe doit être évité.

VII.3.C - Suivi

Le suivi le plus significatif et réaliste consiste à cartographier la zone à sphaignes.



VIII. Guédelon sud



VIII.1 - Résultats-données

Le vallon d'orientation sud-nord situé en amont de la branche sud de l'étang de Guédelon montre quelques secteurs à bouleaux et sphaignes.

Une bonne part de la zone d'étude occupe des parcelles dont les propriétaires ont manifesté leur opposition à l'installation d'appareillage de mesure. Bien qu'ayant visité l'ensemble de la zone définie à la commande, nous avons concentré les analyses sur la partie aval, avec l'accord des propriétaires concernés et sur une entité tourbeuse, à bouleaux et sphaignes la plus caractéristique de l'Habitat 91DO* du vallon. Ailleurs, l'Habitat n'est représenté qu'en un autre point, sur une centaine de mètres carrés, de manière peu caractéristique. Ce secteur à l'aval a aussi été choisi pour travailler sur le lien entre les boulaies à sphaignes et les aulnaies à ronces, fougères et plus rarement carex, l'autre unité de zone humide qui occupe le fond de vallon et qui est donc au minimum en lien spatial avec la boulaie.

VIII.1.A - Épaisseurs de tourbe

La tourbe est peu présente sur l'ensemble du vallon et même nulle dans la partie amont, au sud (figure VIII-1-1).

L'épaisseur de sédiments meubles atteint 2 m dans le secteur de la petite

boulaie du sud [1]. Dans la partie nord, à l'aval, les sondages carottés réalisés pour la pose de piézomètres permettent une meilleure caractérisation des sols.

VIII.1.B - Sols et tourbes sous-jacentes

Les boulaies tourbeuses et la tourbe étant peu présentes, la description des sols a été réalisée conjointement à la pose des appareillages de suivi du niveau de saturation des sols, improprement nommés piézomètres.

Les quatre profils réalisés à la gouge ou au carottier montrent une correspondance entre tourbe et boulaie, ou entre sol minéraux et aulnaie (figure VIII-1-2).

La tourbe est peu épaisse, 30-35 cm, de contenu en fibre variable, et reposant sur des horizons réductiques ou rédoxiques. Les deux profils réalisés dans l'aulnaie montrent l'existence d'un horizon organo-minéral (A), surmonté d'un humus non caractérisé lors du terrain.

D'un point de vue pédologique, les sols de la boulaie correspondent à des Réductisols typiques épihistiques, celui de l'aulnaie en rive gauche (Aulnaie 1) à un Réductisol typique et celle de l'aulnaie de la rive droite à ronces (Aulnaie 2) à un Rédoxisol.

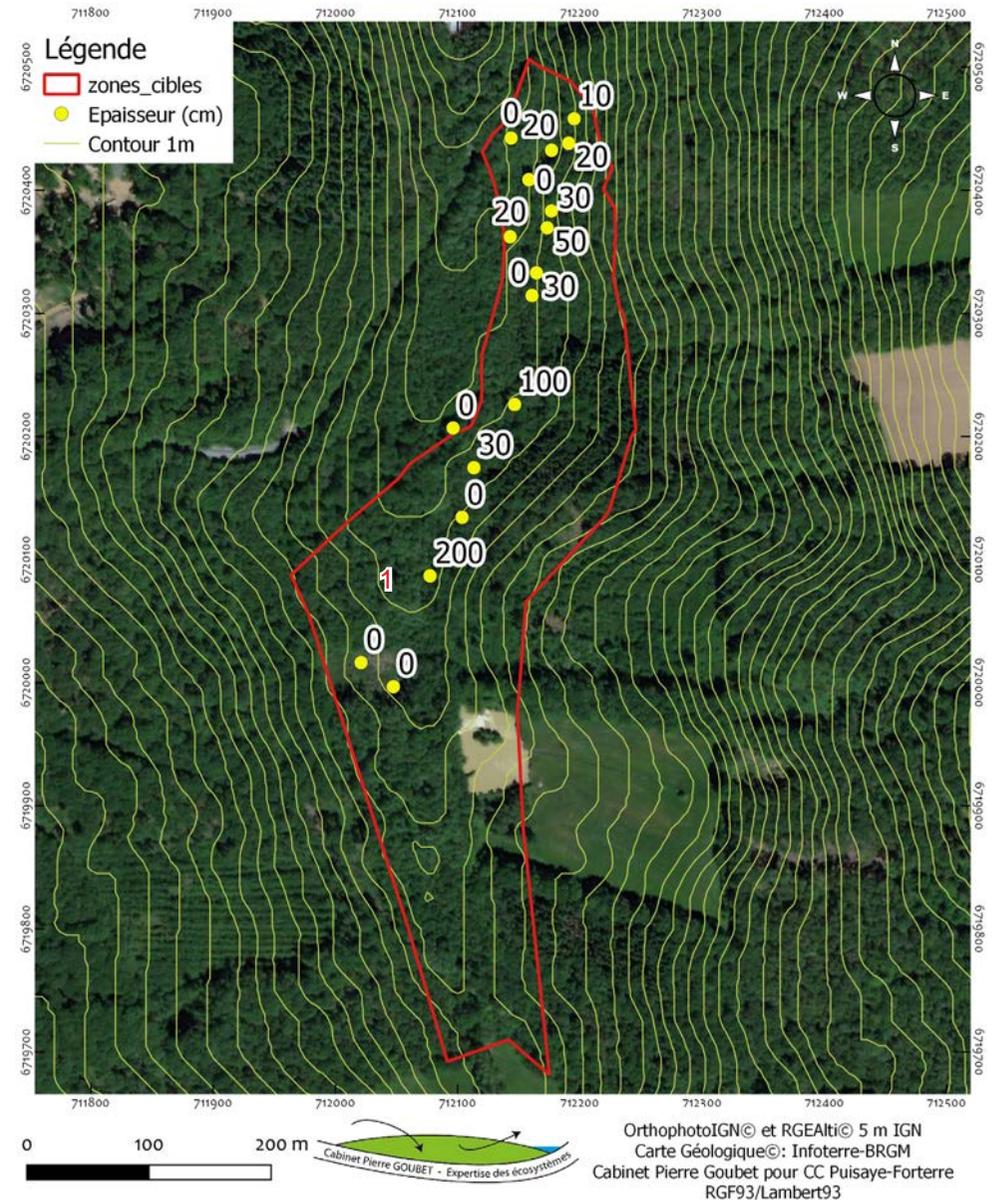


Figure VIII-1-1: localisation des épaisseurs de tourbe du site de Guédelon sud sur fond orthophotographique IGN.

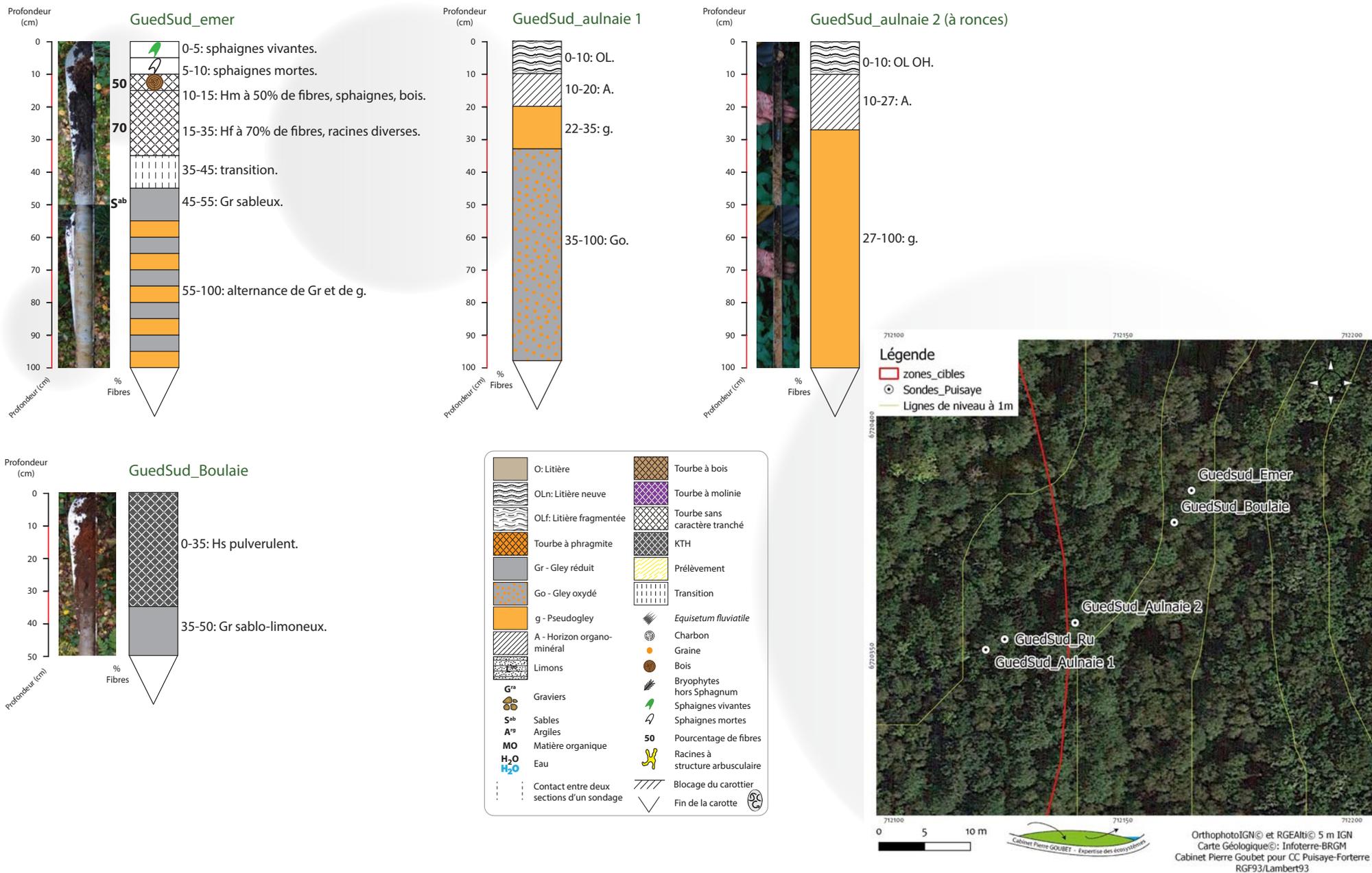


Figure VIII-1-2: localisation des sondages piézométriques du site de Guédelon sud sur fond orthophotographique IGN et représentation schématique des sondages.

VIII.1.C - Unités fonctionnelles

La structure floristique est à la fois simple, et difficile à décrire à une échelle pertinente. Le simple relevé n'apporte pas beaucoup d'élément de connaissance, à moins de l'intégrer dans une analyse régionale, et encore, ne pas prendre en compte les facteurs écologiques locaux et la composition floristique des communautés environnantes limite cette application.

Sur le terrain, trois entités se distinguant clairement, la chênaie sur sol sec, minéral, l'aulnaie et la boulaie à sphaignes sur tourbe. Cette dernière intègre l'aulne et l'appellation «boulaie» est conventionnelle. Du point de vue descriptif, il faudrait utiliser le terme d'aulnaie-boulaie.

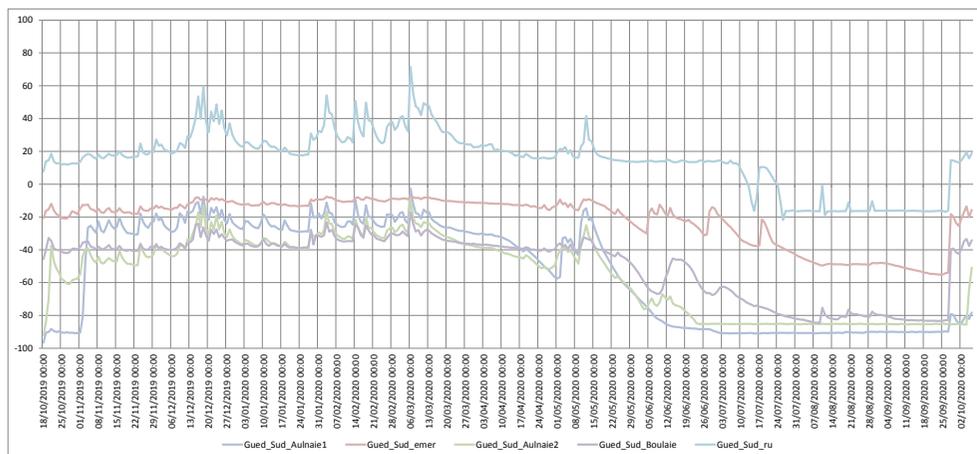


Figure VIII-1-3: chroniques piézométriques bi-horaires annuelles de Guédelon sud du 18 octobre 2019 au 6 octobre 2020, exprimées en cm/sol.

VIII.1.D - Régimes piézométriques

Le protocole piézométrique a consisté à comparer les régimes de ce qui apparaissait comme une émergence (Gued_Sud_emer), dans la boulaie en dehors de l'émergence (Gued_Sud_Boulaie), du ruisseau rectifié, qui pourrait aussi être un drain (Gued_Sud_ru), et de l'aulnaie en rive gauche et en rive droite du ru (Gued_Sud_Aulnaie1 et Gued_Sud_Aulnaie2), prenant en compte que l'émergence se situe en rive droite.

Les chroniques piézométriques annuelles (figure VIII-1-3) montrent la particularité hivernale de l'émergence, avec l'absence de hausse significative, induite par le fait que le niveau d'eau est au dessus du sol et forme une convexité sur laquelle les précipitations

«glissent». Les autres chroniques se caractérisent par leur similarité l'hiver et leur aspect différent en été.

La similarité hivernale se caractérise par une réponse importante des niveaux aux précipitations, de manière simultanée. En été, les chroniques montrent un tarissement précoce, en particulier pour les deux aulnaies, avec le niveau de l'eau qui passe sous celui de la sonde dès le mois de juin; c'est deux mois plus tôt que la boulaie. A l'emplacement du piézomètre, le ru montre aussi un tarissement, avec la

baisse du niveau sous le sol, à partir de juillet. Cela n'indique pas forcément l'arrêt de l'écoulement dans le ru, car la sonde n'est pas posée au plus bas du profil transversal, mais sur le bord de l'ouvrage. Il est cependant probable que l'écoulement résiduel ne soit qu'un filet d'eau.

Les chroniques de novembre 2019 ne montrent pas de fait particulier, en dehors d'une série de précipitations dont nous analyserons celle, marquée, du 23 (figure VIII-1-4). La pluie débutant vers 5h00 [1] impose à tous les

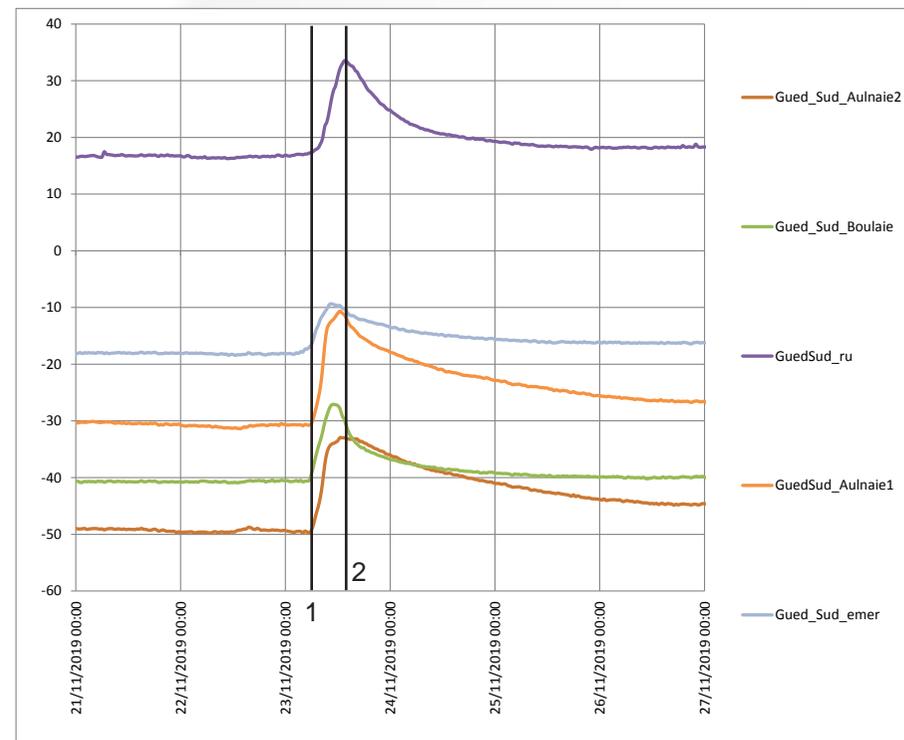


Figure VIII-1-4: chroniques piézométriques bi-horaires choisies de novembre 2019 de Guédelon sud, exprimées en cm/sol.

secteurs une montée du niveau rapide, mais dont le pic n'apparaît pas synchrone. Il est atteint vers 10h30 pour l'émergence concentrée, vers 11h00 pour la boulaie, et seulement 13h30 pour les aulnaies et le ru.

La chronique du ru montre un pic de crue classique pour un écoulement de surface concentré, avec un temps de latence correspondant au temps de réponse des différents compartiments à l'événement de précipitation. Fait intéressant, la forme des chroniques des aulnaies montre une réponse en deux temps: le premier est une montée classique; le second est une montée atténuée, éventuellement en deux temps elle aussi si l'analyse est poussée à l'extrême. Cette seconde réponse complexe peut être interprétée comme la conséquence d'une concentration des écoulements dans le fond de vallon, soit en lien avec un ruissellement, une circulation de subsurface (hypodermique) ou un transfert à partir du ru. Le fait que la hausse cesse au moment où le niveau du ru commence à baisser [2] nous amène à privilégier la dernière hypothèse.

Ce fait piézométrique indiquant un processus de concentration des eaux de surface est fondamental dans la compréhension du déterminisme des aulnaies. En effet, la richesse en nutriments du sol dans ces végétations est indiquée par diverses données floristiques et par le processus bien connu

de capture de l'azote atmosphérique par des bactéries associées à l'aulne (*Frankia* sp.). Cette indépendance vis-à-vis de l'azote renforce une dépendance par rapport au phosphore, élément qui peut être apporté par des transferts d'eau et de matière, pourvu que la station soit soumise à des transferts de concentration des écoulements. Ce fait majeur sera présenté dans le détail dans la synthèse.

Les chroniques de décembre 2019 montrent une nouvelle série de hausses induites par les précipitations et à nouveau le décalage entre les pics de « crue » (figure VIII-1-5). Elles montrent aussi l'incidence de la lame d'eau issue des précipitations sur le niveau de charge à l'émergence par une hausse lente et modérée avec un maximum d'une vingtaine d'heures de décalage par rapport à la pluie [1]. Ce processus est encore plus marqué sur le niveau de la boulaie [2]. Il apparaît même que pour la pluie du 20 décembre, l'augmentation de la décharge hydrogéologique à l'émergence, boulaie comprise, induit une hausse des niveaux de l'aulnaie 2 [3] et du ru [4]. Le fait que l'aulnaie 1, en rive opposée à l'émergence, ne montre pas de hausse, laisse supposer que c'est le système d'émergence du versant qui alimente la partie basse du vallon, et non le ru qui alimente les aulnaies.

Il faut interpréter le délai d'une vingtaine d'heures entre la précipitation et

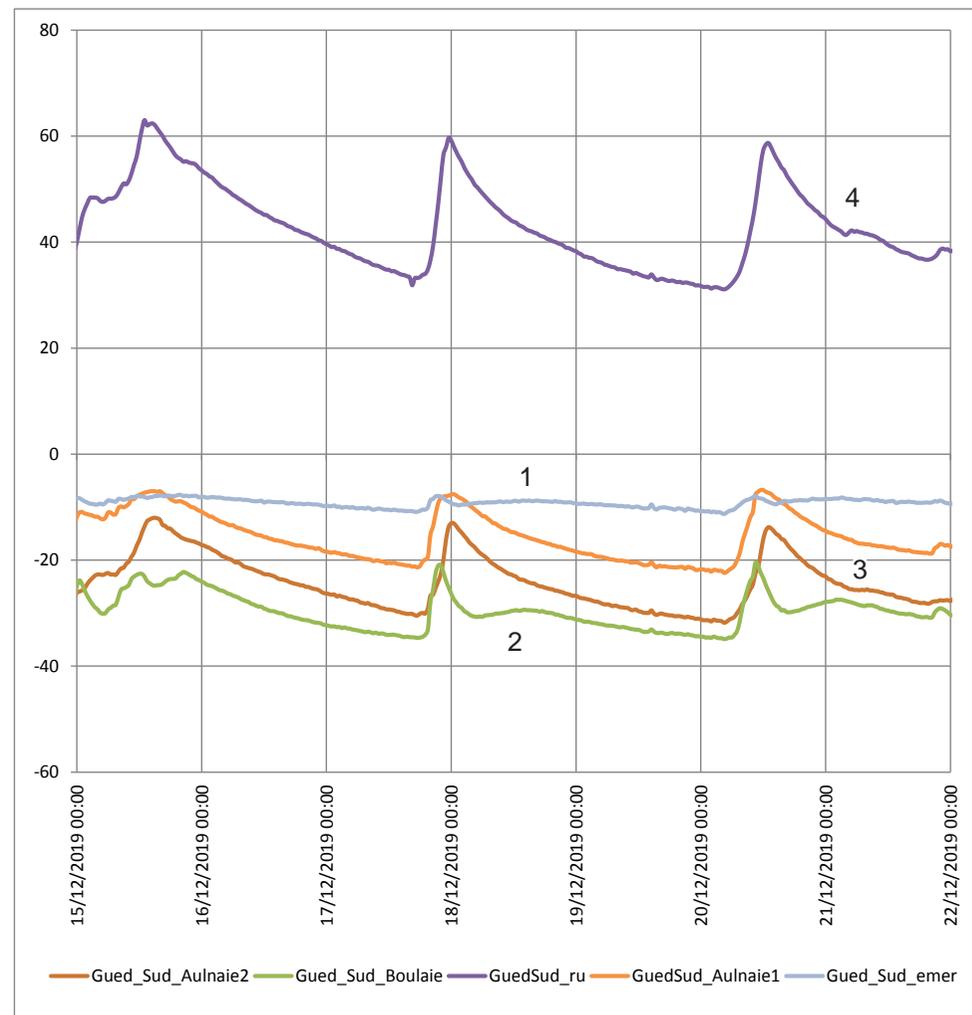


Figure VIII-1-5: chroniques piézométriques bi-horaires choisies de décembre 2019 de Guédelon sud exprimées en cm/sol.

la réponse à l'émergence comme le temps pour une lame d'eau de parcourir le chemin entre la surface et le toit de la nappe, sous forme d'infiltration,

puis de percolation, à travers ce qui est nommé la zone non saturée (ou zone vadose dans les ouvrages anciens).

Les chroniques d'avril montrent les premiers effets de l'évapotranspiration (figure VIII-1-6) sur les courbes de l'émergence, de la boulaie et un peu de l'aulnaie 2.

Le phénomène se perçoit encore mieux sur les courbes de mai pour l'aulnaie (figure VIII-1-7). A l'inverse, la courbe de la boulaie montre l'arrêt de l'effet des prélèvements des plantes sur la nappe à partir d'une quarantaine de centimètres de profondeur.

VIII.1.E - Photographies aériennes anciennes

Les photographies aériennes anciennes n'apportent pas d'élément majeur dans la compréhension du fonctionnement des tourbières du sud de l'étang de Guédelon. Le contexte largement boisé masque les structures comme le ruisseau et les variations de tons sont difficiles à interpréter.

Le clichés présentés en figure VIII-1-8 représentent les campagnes de 1949, 1955 et 1971.

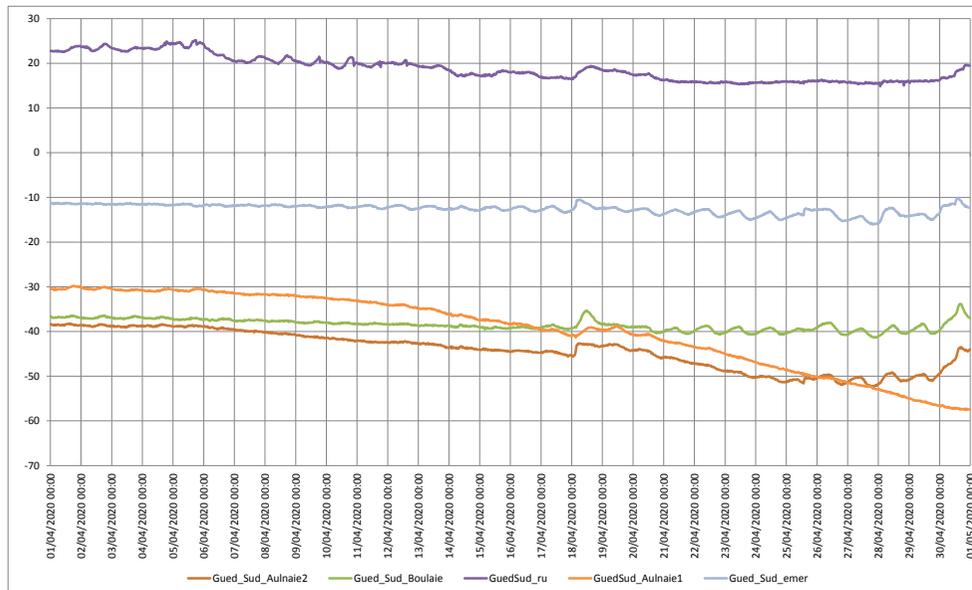


Figure VIII-I-6: chroniques piézométriques bi-horaires d'avril 2020 de Guédelon sud exprimées en cm/sol.

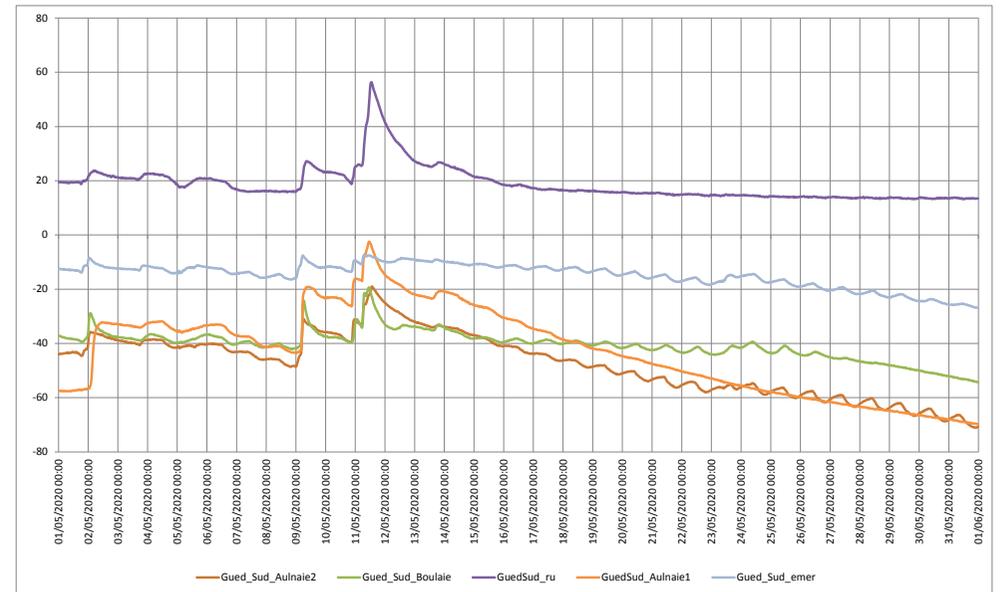


Figure VIII-I-7: chroniques piézométriques bi-horaires de mai 2020 de Guédelon sud exprimées en cm/sol.

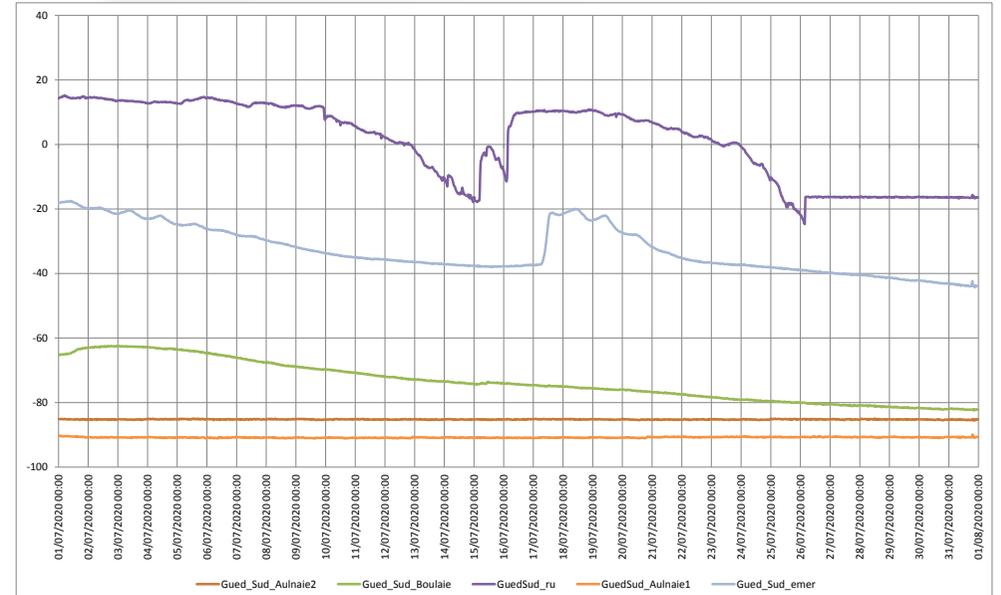


Figure VIII-I-8: chroniques piézométriques bi-horaires de juillet 2020 de Guédelon sud exprimées en cm/sol.

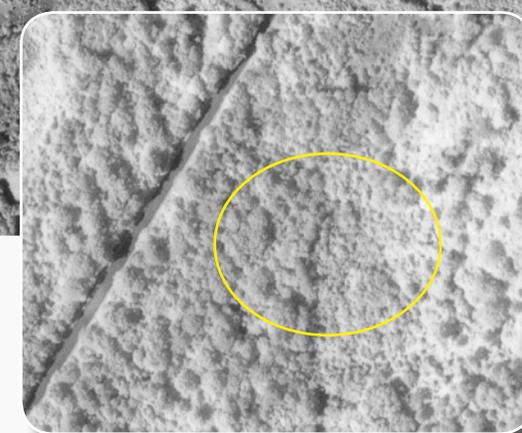


Figure VIII-I-8: photographies aériennes de 1949,1955 et 1971 (source site Remonter le temps de l'IGN).

VIII.2 - Interprétation fonctionnelle

La zone d'étude du secteur sud de l'étang de Guédelon correspond en grande partie au fond de vallon, avec une remontée franche sur le versant est, en rive droite. Deux secteurs de boulaies ont été observés, l'un se situant au sud, couvrant une petite surface d'une centaine de mètres carrés, en partie modifié par une structure qui est peut-être un ancien drain ou une limite de parcelle. L'autre, en aval, au sud de la départementale, occupe une surface plus importante et a été choisi comme zone d'analyse, les propriétaires ayant donné leur accord ou n'ayant pas déclaré leur opposition à la pose d'appareillage.

Le secteur s'est prêté à l'analyse comparative d'une émergence concentrée, d'une boulaie à sphaignes et de deux aulnaies.

Le schéma de fonctionnement général est semblable à ceux des Carrières et de Chassin. La nappe des sables de la Puisaye émerge sur le versant du ru, dans un secteur favorable, induit par une lithologie particulière ou une structure des sédiments qui permet la concentration de l'écoulement souterrain sous la forme d'une paléovallée, par exemple.

Le niveau de l'eau à cet endroit

est contrôlé par le niveau de la nappe des sables à travers un processus de transfert de la pression hydraulique. Le phénomène a été parfaitement mis en évidence sur les chroniques piézométriques, avec un décalage entre les pluies et la réponse à la source d'une vingtaine d'heures en hiver, correspondant probablement au temps d'infiltration puis de percolation de l'eau du sol jusqu'au toit de la nappe. Dans des contextes sableux tels que celui de la Puisaye, cette vitesse est parfaitement envisageable, sachant qu'une lame d'eau dans des sables circule à une vitesse de 1000 m à 1 cm par jour, suivant la taille des grains et la présence de limons. Dans notre cas, l'altitude de la crête qui domine l'émergence est de 302 m, celle de l'émergence de 245 m, soit une différence de 57 m. Cette distance correspond à la profondeur théorique maximale de la nappe, mais il faut concevoir qu'elle est en réalité plus courte, parfaitement compatible avec un transfert réalisé en une vingtaine d'heure.

Du sol à la nappe, dans la zone insaturée, le transfert est un écoulement, mais au contact avec le toit de la nappe, il se convertit en transfert de pression à la vitesse théorique du son, entre le toit de la nappe et l'émergence. Le transfert de l'eau est lui beaucoup plus long.

Émergence concentrée et boulaie fonctionnent de manière comparable à la différence d'une charge hydraulique de niveau plus faible dans la seconde, particulièrement en été. Le niveau de la charge semble d'ailleurs ne pas permettre une production de tourbe aussi importante qu'à Chassin. Il faut imaginer une émergence qui forme un dôme piézométrique, allongé dans la pente, avec la boulaie qui correspond à une auréole imparfaite, à potentiel d'écoulement et de turfigenèse moindre.

Le domaine hors émergence est celui des aulnaies, comme le montre les données piézométriques. Cependant, l'aulnaie de la rive droite du ru, côté du versant de l'émergence, est soumise une partie de l'année à la décharge hydrologique, de manière directe ou indirecte (par un transfert de l'eau de l'émergence vers le bas de versant), sans que l'on puisse dissocier l'une ou l'autre des modalités. Les chroniques piézométriques démontrent l'existence d'un processus de concentration des eaux de surfaces dans le fond de vallon, issues des versants ou de l'amont. Cette mesure est en accord avec l'exigence nutritionnelle que supposent les aulnaies, à travers un transfert nécessaire de phosphore dissous dans l'eau de surface ou fixé aux particules minérales transportées par l'eau de surface. Si le premier, sous forme de phosphates dissous ou de phosphore organique est directement

disponible pour les plantes, le second sera libéré dans le milieu de sédimentation lors de la réduction des produits ferriques une fois qu'ils séjournent dans le sol réducteur des aulnaies. Ces processus de transfert ne se réalisent pas aux émergences car le phosphore ne voyage pas à travers les nappes, en général. Quand bien même de petites quantités seraient disponibles, la turfigenèse contribuerait à séquestrer dans la tourbe ces apports, conférant au milieu un caractère oligotrophe.

Il existe donc une forme d'équilibre entre les boulaies d'émergence et l'aulnaie, chacune occupant une « niche » relative à son exigence nutritionnelle, avec comme logique que l'aulne ne peut être compétitif à l'émergence, laissant ainsi la place au bouleau et aux sphaignes.

Dans le long terme, ce schéma grossier se heurte à une nécessité de turfigenèse permanente, contre-disant les apports de proximité induits, par exemple, par la chute des feuilles riches en phosphore des aulnes et des bouleaux. Il faut ainsi aussi compter sur des processus d'exportation de matière de l'émergence vers le milieu aquatique à l'aval, entraînant avec eux le phosphore. Ce modèle général sera développé dans la partie synthèse, enrichi des données de sites comme les Comailles et les Bergeries.

VIII.3 - Propositions d'action

La boulaie à sphaignes du vallon sud de l'étang de Guédelon fonctionne suivant une modalité relativement naturelle d'émergence oligotrophe de versant.

VIII.3.A - Connaissance

La principale question qui reste posée est celle de la stabilité du système vis-à-vis de l'enrichissement trophique, avec la capacité, ou non, de séquestrer ou d'exporter l'élément limitant qu'est le phosphore.

Il ne nous apparaît pas pertinent de traiter cette question autrement que par un suivi moyen-long terme.

VIII.3.B - Gestion

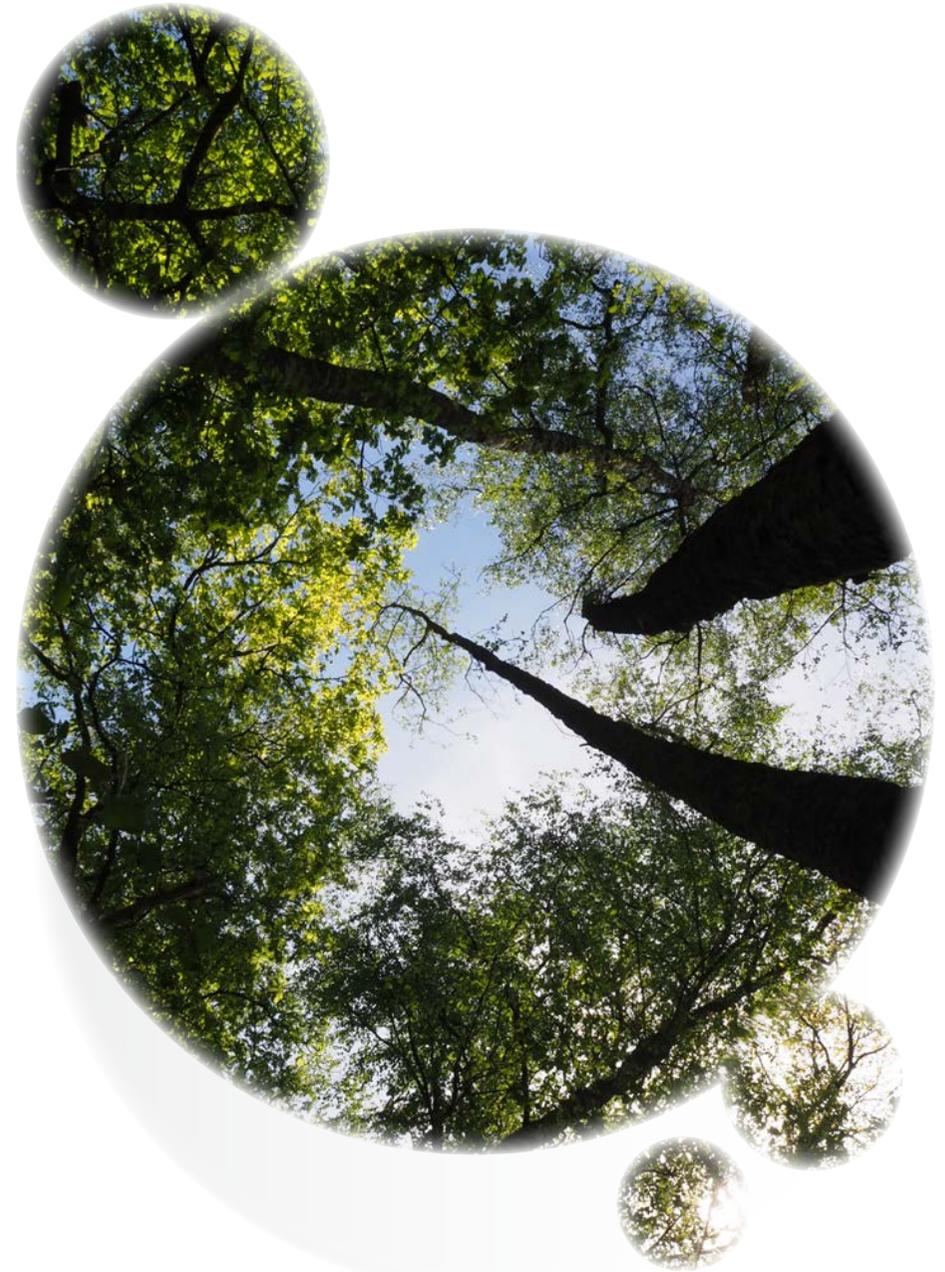
La boulaie tourbeuse à sphaignes fonctionne suivant une modalité indépendante des actions humaines. La

gestion courante n'est donc pas requise, en dehors d'une veille sur l'intégralité du milieu (pas de perturbation de quel qu'ordre que ce soit) et de sa zone de dépendance fonctionnelle, pour éviter tout pompage qui provoquerait probablement un abaissement du niveau de l'émergence.

VIII.3.C - Suivi

Les suivis de saturation des sols réalisés pour cette étude constituent des données d'état initial qui pourront servir à un suivi ultérieur, dans le cas d'une impression de changement de la boulaie.

Au-delà, une cartographie régulière des sphaignes nous apparaît être un suivi à la fois simple est significatif. Une description tous les 5 à 10 ans nous semble suffisante.



IX. Les Pâtures Pourries



IX.1 - Résultats-données

Le secteur des Pâtures Pourries, situé à environ 2 km au sud de l'étang de Guédelon, héberge une zone à sphaignes d'un demi hectare, en bonne partie boisée. Nous avons pu la visiter mais, malgré l'intérêt de la tourbière, les propriétaires se sont opposés à la pose d'un appareillage de suivi d'eau dans le sol. De ce fait, l'analyse fonctionnelle reste cantonnée à la caractérisation de

la structure et de la diachronie.

La tourbière est située dans une sorte de « niche » formée par le versant d'une crête d'orientation nord-sud, à l'est [1], et l'extrémité ouverte en « y » d'une autre crête d'orientation sud-ouest/nord-est, au sud [2] (figure IX-1-1).

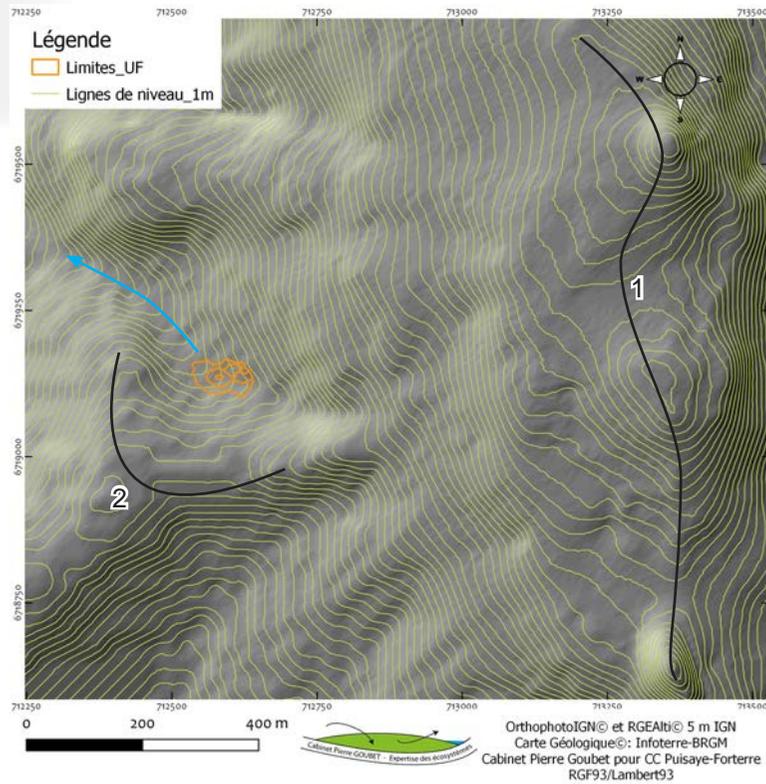


Figure IX-1-1: localisation du site des Pâtures Pourries dans son environnement morphologique.

Le complexe peut être considéré comme la source est du ru qui alimente le bras sud de l'étang de Guédelon, rectifié dans sa partie aval et suivi dans le précédent site (Guédelon sud).

IX.1.A - Épaisseurs de tourbe

Les épaisseurs de tourbe atteignent 1 m (figure IX-1-2). Les plus grandes valeurs sont corrélées à la nature peu boisée de la végétation.

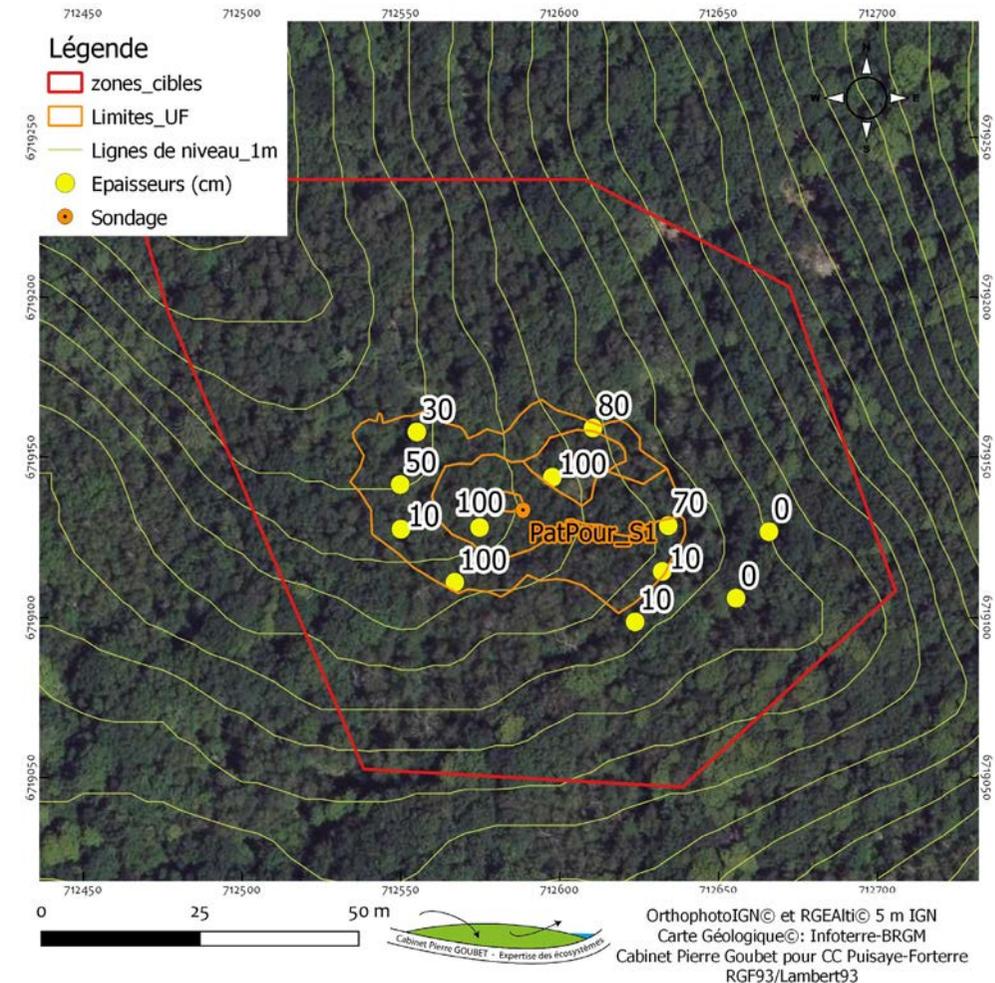
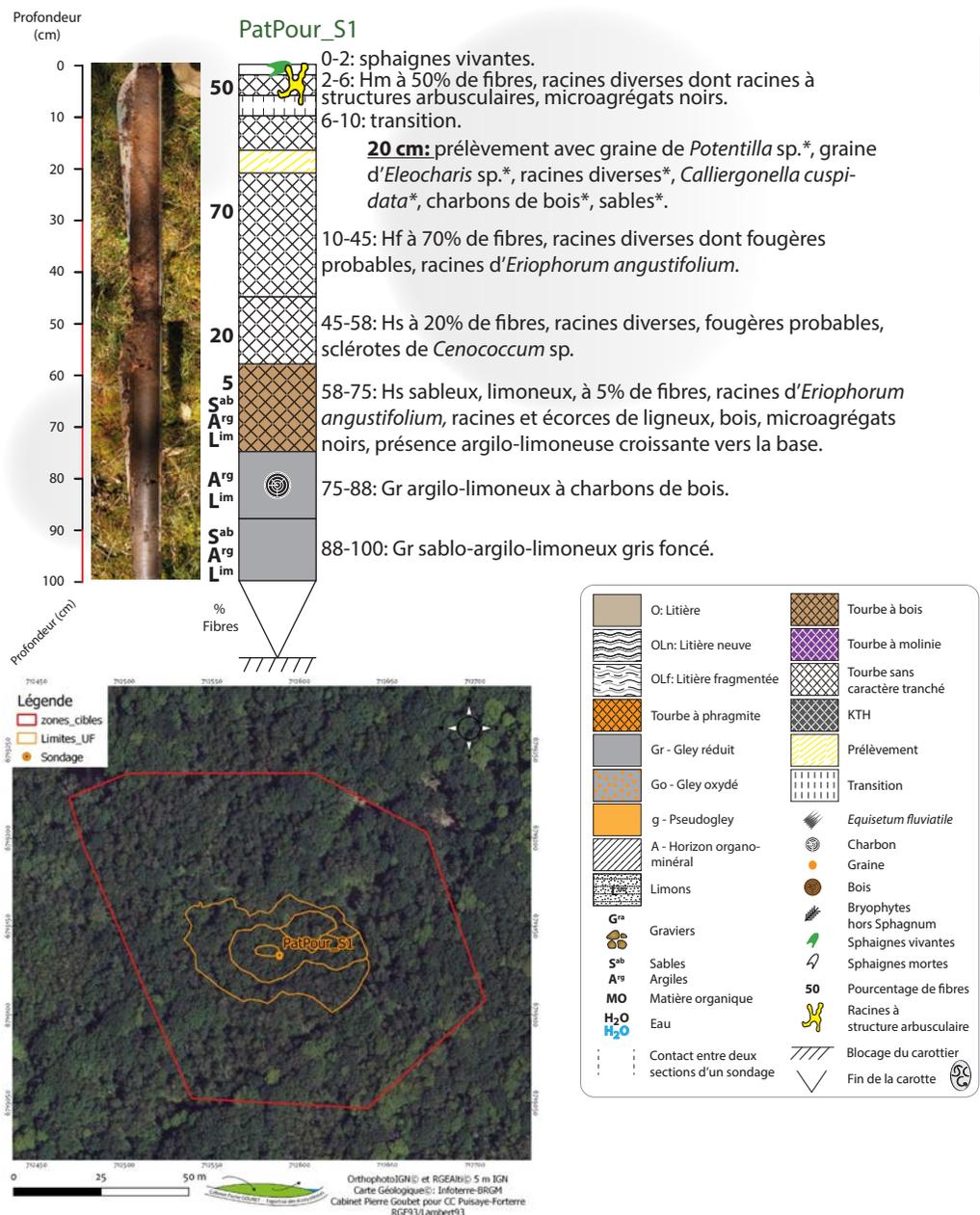


Figure IX-1-2: localisation des épaisseurs de tourbe du site des Pâtures Pourries sur fond orthophotographique IGN.



PatPour_S1
à 20 cm

PatPour_S1 à 20 cm, le fond (a), graines de *Potentilla* sp. (b) et d'*Eleocharis* sp. (c), *Calliergonella cuspidata* (d)



Figure IX-1-3: localisation du sondage pédologique et paléocécologique des Pâtures Pourries sur fond orthophotographique IGN, et représentation schématique du sondage accompagnée des photographies du prélèvement réalisé à 20 cm.

IX.1.B - Sols et tourbes sous-jacentes

Le petit complexe n'a fait l'objet d'un sondage pédologique, en son centre (figure IX-1-3).

La tourbe y est épaisse de 75 cm, reposant sur un horizon réductique typique sablo-argilo-limoneux à la base et plus sableux, à charbons, au contact de la tourbe.

La tourbe de base est elle aussi carbonneuse (indiquée par sa couleur noire) et riche en particules minérales. Elle est pauvre en fibres et contient des morceaux de bois.

La tourbe de la partie supérieure est riche en fibres, principalement des racines, mais des graines de potentille ou d'éléocharis et des restes de *Calliergonella cuspidata* indiquent un milieu de type bas-marais.

Le profil est riche en charbons et montre en surface la présence de racines à structure arbusculaire, indiquant un phénomène d'assèchement.

IX.1.C - Unités fonctionnelles

La structure floristique et fonctionnelle du complexe des Pâtures Pourries s'organise imparfaitement en 3 unités concentriques (figure IX-1-4).

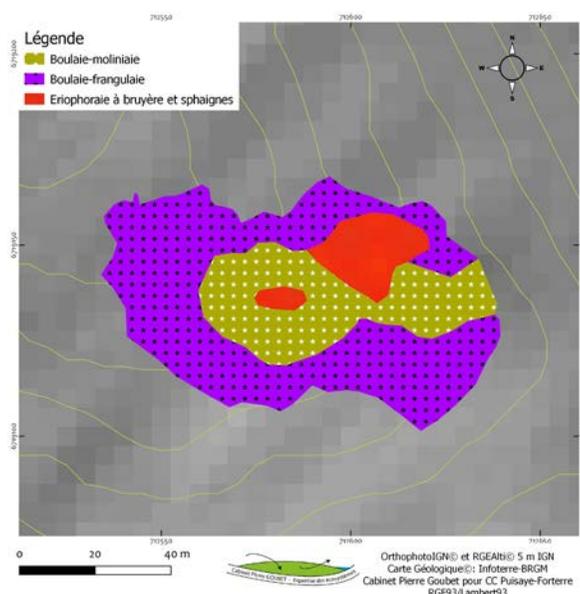


Figure IX-1-4: répartition des unités fonctionnelles du complexe des Pâtures Pourries sur fond du MNT ombré.

Le centre est occupé par deux zones plus ou moins ouvertes à *Eriophorum angustifolium*, *Erica tetralix*, *Juncus acutiflorus*, *Sphagnum palustre*, *S. angustifolium*, *S. rubellum*, *Aulacomnium palustre*, *Hypnum jutlandicum* et *Pleurozium schreberi* (figure IX-1-5). Elles sont partiellement immergées dans une première auréole de boulaie à sphaignes classique, à molinie (figure IX-1-6), elle-même encerclée d'une boulaie originale à bourdaine (*Frangula alnus*), sphaignes et mousses pleurocarpes (figure IX-1-7).

IX.1.D - Photographies aériennes anciennes

Etant donné la taille du complexe, les clichés aériens ne montrent pas de structure exploitable. A l'échelle de l'environnement du complexe, les photos montrent clairement la dynamique de colonisation ligneuse à partir d'un état partiellement boisé de la parcelle dans laquelle se situe le complexe.

Dans cette dynamique, le complexe apparaît comme une zone de résistance à la colonisation ligneuse.



Figure IX-1-5: illustration photographique du centre des Pâtures Pourries.



Figure IX-I-6: Aux Pâtures Pourries, l'auréole de boulaie à sphaignes classique, à molinie.



Figure IX-I-7: Aux Pâtures Pourries, la boulaie originale à bourdaine (*Frangula alnus*), sphaignes et mousses pleurocarpes.

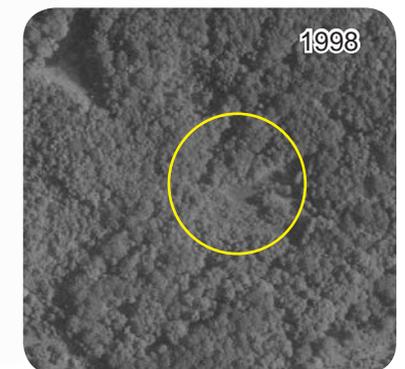
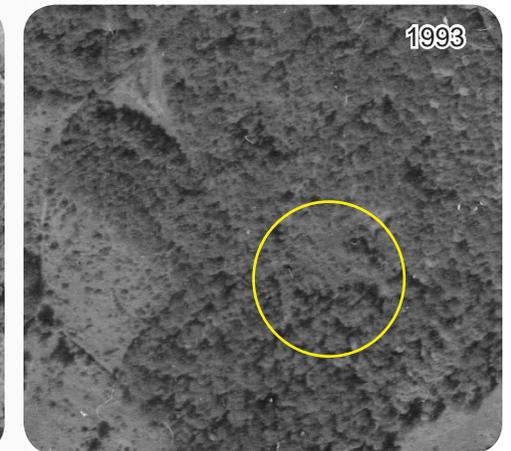
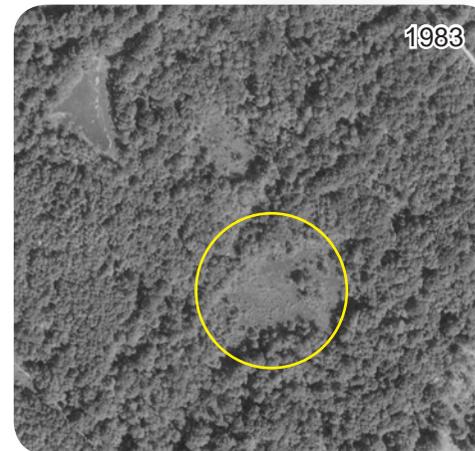
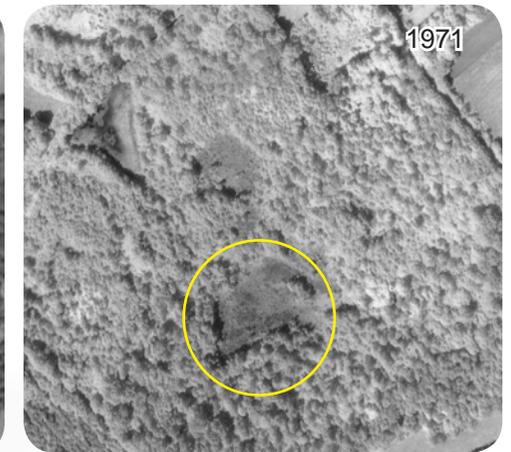
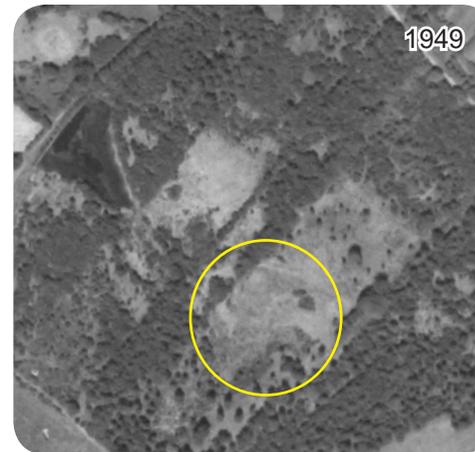


Figure IX-I-14: photographies aériennes de 1949,1971, 1983, 1993 et 1998 (source site Remonter le temps de l'IGN).

IX.2 - Interprétation fonctionnelle

L'absence de donnée de suivi des niveaux d'eau et d'une description fine de la topographie rend difficile la caractérisation fonctionnelle de ce petit complexe.

C'est principalement l'origine et les paramètres hydrologiques fondamentaux qui ne peuvent être clairement identifiés.

Les questions qui se posent sont:

- La tourbe s'est-elle déposée dans une petite dépression?

- Une nappe hydrogéologique alimente-t-elle le complexe, ou la saturation du sol en eau résulte-t-elle seulement de la concentration des écoulements de surface et de subsurface?

- La boulaie à bourdaine est-elle justement une unité spécifique d'une tourbière de concentration des eaux de surface, rendue en partie ombrotrophe par l'accumulation de la tourbe?

La présence d'une graine d'éleocharis est indicatrice d'une forme de pièce d'eau temporaire compatible avec l'hypothèse d'une tourbière différente de celles présentées jusqu'alors, indépendante d'une émergence.

La présence de racines à structure

arbusculaire indique un assèchement dans une phase turfigène terminale ou post-turfigène, puisqu'il s'agit de la partie en surface de la colonne tourbeuse. Cette perte d'engorgement résulte-elle du remplissage par la tourbe d'une dépression humide ou de la baisse de la capacité d'alimentation d'une source? Là encore, aucune réponse ne peut être apportée sans données piézométriques.

Dans le cadre d'une dépression humide d'eau de surface, le complexe serait aujourd'hui dans un état conséquent au remplissage de la dépression et au pâturage, sans possibilité de changement autre qu'un maintien d'une dynamique ombrotrophe au centre (alimentation exclusive par les eaux de pluie) et minérotrophe de surface et de subsurface sur les marges.

Etant donné la petitesse du complexe et les effets de bordures amplifiés qui en découle, l'oligotrophie induite par l'ombrotrophie devrait s'atténuer avec le temps, à travers l'enrichissement de la litière par les chutes des feuilles des arbres périphériques. Ainsi, malgré la résistance à la colonisation observée sur les photographies aériennes anciennes, les dernières zones ouvertes devraient se fermer ces prochaines décennies. Les moyens d'action pour contrer cette évolution sont inexistant, puisqu'une coupe suivie d'une mise en

place d'un nouveau pâturage contribuerait à la destruction des tapis de sphaignes. Dans ce cadre, l'état actuel de la tourbière est une transition entre un état pastoral et un système boisé probablement non turfigène, la «place» possible de la tourbe étant déjà occupée par une tourbe ancienne.

Par contre, si le système dépend d'une émergence, le complexe peut être considéré comme en transition vers

une boulaie tourbeuse, à sphaignes, dont le maintien et l'état dépendront des caractéristiques d'émergence: durée, altitude/profondeur de la charge hydraulique, capacité de produire encore de la tourbe.

La comparaison avec les autres complexes étudiés, dans la partie synthèse, pourra nous éclairer sur le fonctionnement de la tourbière des Pâtures Pourries.

IX.3 - Propositions d'action

L'incertitude sur l'origine de la tourbière et sur la nature de l'eau qui l'alimente ne modifie pas, au final, les possibilités d'action et la stratégie de conservation, sauf sur un point: la possibilité de remettre en place un pâturage pour maintenir une zone ouverte tourbeuse. Cependant, cette option de gestion ne permettra pas de maintenir le système actuel, simplement de mettre en place un système tourbeux pastoral, ouvert. Ceci-dit, cette dernière option, si elle est possible, ne constituerait probablement pas une action permettant de développer des services écosystémiques diversifiés, en dehors, peut-être, d'une diversification des habitats à travers une tourbière pastorale, probablement de type jonçaille.

IX.3.A - Connaissance

La première et probablement seule

chose à faire pour terminer le diagnostic fonctionnel est de réaliser un suivi de l'engorgement des sols, comme il a été fait sur la plupart des sites, et qui n'a pas pu être fait ici faute d'accord des propriétaires.

IX.3.B - Gestion

Nous n'avons aucune préconisation de gestion à proposer avant la validation d'un modèle fonctionnel par suivi des niveaux d'eau du sol.

IX.3.C - Suivi

La réalisation d'une cartographie régulière comme celle faite pour ce travail nous semble satisfaisante. Un passage tous les 5 ans est adapté au contexte de colonisation forestière.

X. Les Comailles



X.1 - Résultats-données

La tourbière des Comailles occupe une situation particulière, sur le flanc sud du Branlin, juste avant un point de rétrécissement de la vallée qu'il occupe, drainant un bassin versant de 44 km² (figure X-1-1).

Elle occupe également une situation particulière du point de vue géologique,

au contact des sables de Puisaye et des Argiles de Myennes sous-jacentes, d'une part, mais aussi à l'extrémité sud d'une faille majeure, légèrement inclinée vers l'ouest, marquant un affaissement relatif de la partie à l'ouest, ayant permis la conservation des dépôts tertiaires (figure X-1-2).

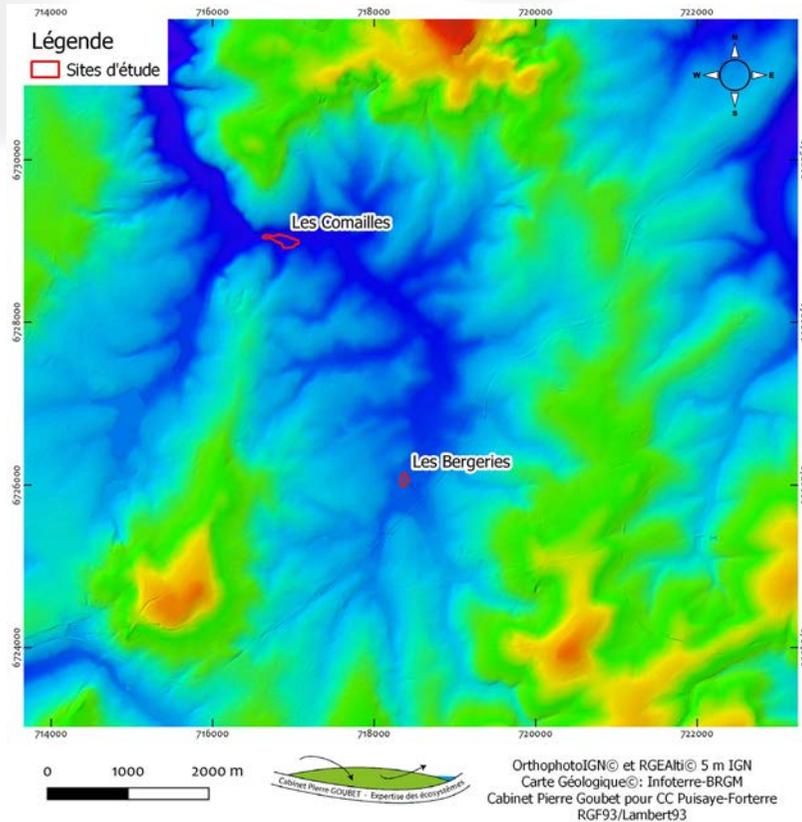


Figure X-1-1: les complexes Les Comailles et Les Bergeries, situés dans leur contexte topographique, RGEAlt_{5m}© IGN.

X.1.A - Épaisseurs de tourbe

Dans le contexte des sites étudiés, le complexe des Comailles peut-être considéré comme une grande tourbière à tourbes épaisses. Les mesures d'épaisseur de sédiments meubles réalisés à la perche atteignent 4,5 m (figure X-1-3), mais les trois sondages

au carottier réalisés pour l'analyse pédo-paléocéologique montrent que les tourbes ne dépassent pas 2,7 m d'épaisseur. La différence est probablement induite par la nature meuble des dépôts minéraux sous la tourbe que la perche ne permet pas de différencier. De ce fait, seul une série de carottage permettrait de délimiter la lentille tourbeuse.

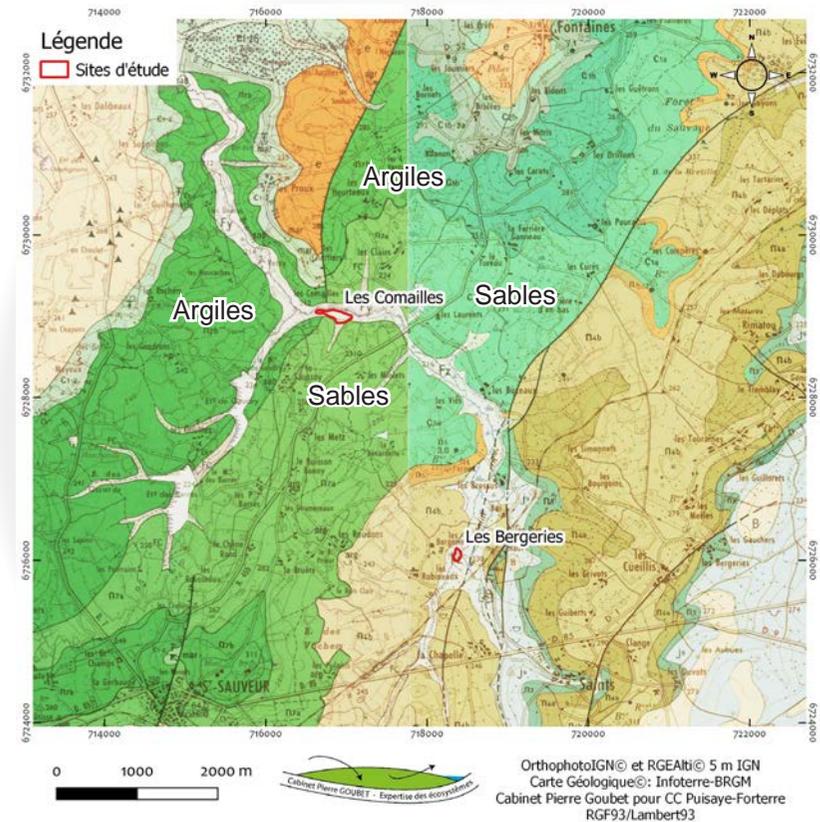


Figure X-1-2: cadre géologique des complexes Les Comailles et Les Bergeries sur fond de carte géologique (source BRGM).

X.1.B - Sols et tourbes

Trois sondages au carottier russe ont été réalisés, du sol au dépôts minéraux sous la tourbe (figure X-1-4).

Un des ces sondages a été prélevé pour une analyse en laboratoire et sera présenté à la suite.

Les deux sondages sur le terrain montrent des profils comparables, largement dominés par des tourbes à roseau (*Phragmites australis*) et/ou bois (figure X-1-5).

Le sondage 1 (codé Comailles_S1) apparaît le plus régulier, avec une tourbe à phragmite et bois sur plus de 2 m d'épaisseur. En dessous, une tourbe différente, contenant peu de macrorestes spécifiques à part des racines à structure arbusculaire occupe une épaisseur de 50 cm. Elle est à rapprocher de la tourbe de base de l'analyse des macrorestes, attribuée à une boulaie-saulaie à bruyères. Ce sondage met aussi en évidence une couche de 32 cm à graines de jonc et graviers qui se rapproche des horizons de surface à tourbe densifiée souvent rencontrée en France, typique des

pratiques pastorales. La tourbe qui surmonte l'horizon est ici fibrique, ne montrant pas d'impact anthropique. Elle recèle des racines à structure arbusculaire indiquant des périodes de relative sécheresse et à sa base un lit de racines blanches pouvant correspondre à celle d'une moliniaie.

Le sondage 2 s'approche du précédent dans sa partie basse, avec une première tourbe à bois faisant transition avec le limon sous-jacent, riche en racines à structure arbusculaire, en lits denses, indiquant une série de sécheresse, une forme d'instabilité dans

l'alimentation en eau. Au-dessus, la tourbe à phragmite et bois occupe une épaisseur de 1,30 m. Elle est surmontée d'un horizon de tourbe pauvre en fibres de type densifié pastoral (KTH), lui-même couvert par une tourbe fibrique à bois contenant des éléments typiques de bois tourbeux: graines d'*Alnus* sp., graines de *Betula pubescens*, utricules de *Carex paniculata*, utricule de *C. acutiformis*, sporanges de fougère, fragments de feuilles de ligneux, racines à structure arbusculaire, feuilles de *Thuidium tamariscinum*, *Sphagnum palustre*.

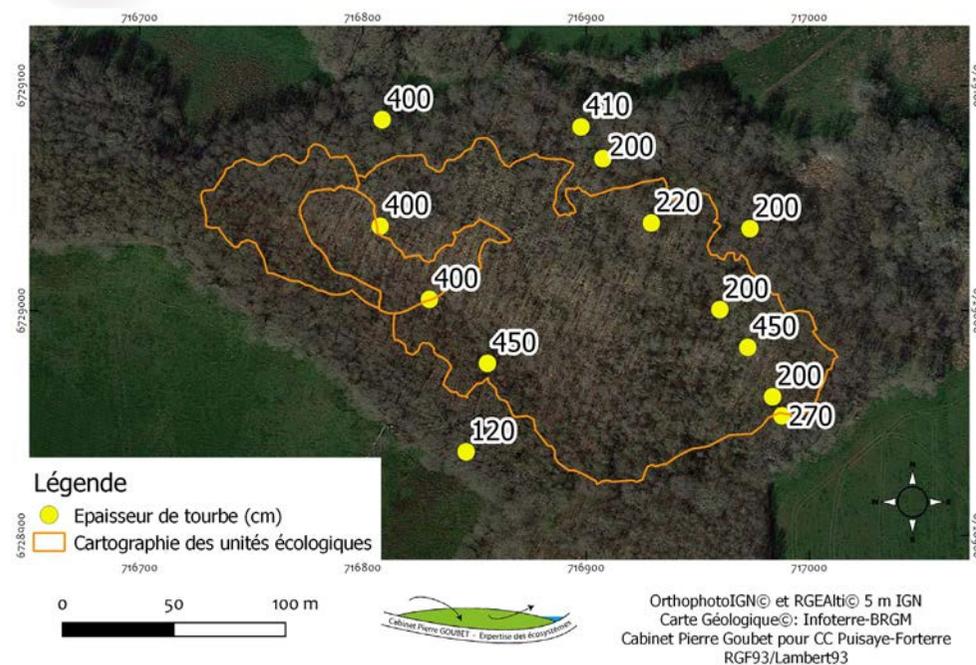


Figure X-1-3: localisation des épaisseurs de tourbe du site des Comailles sur fond orthophotographique Google Satellite.

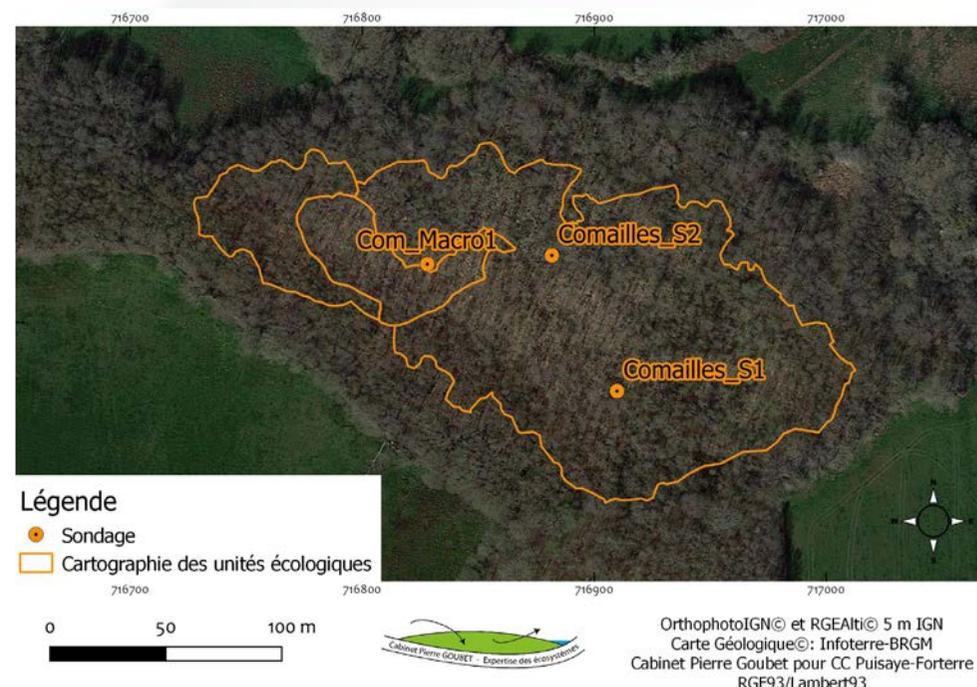


Figure X-1-4: localisation des sondages du site des Comailles sur fond orthophotographique Google Satellite.

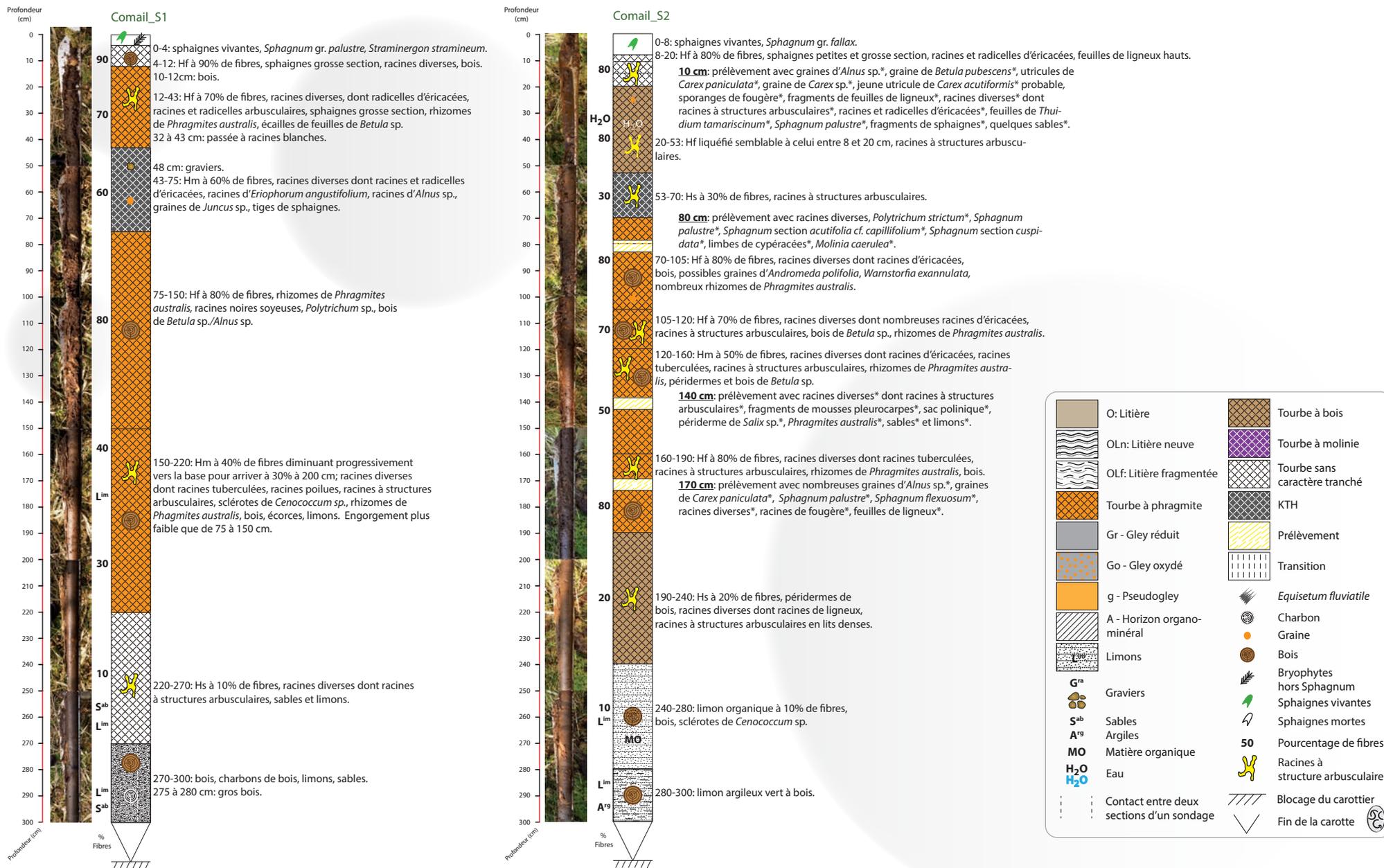


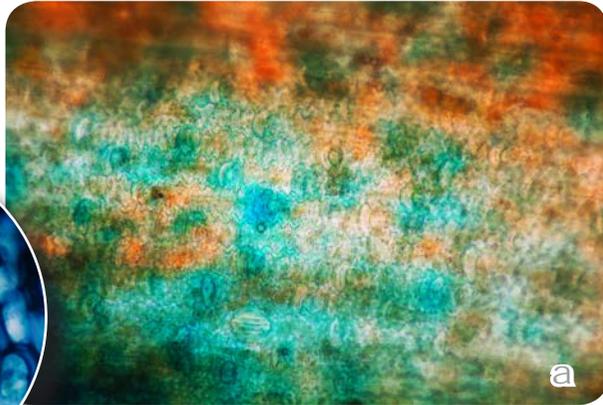
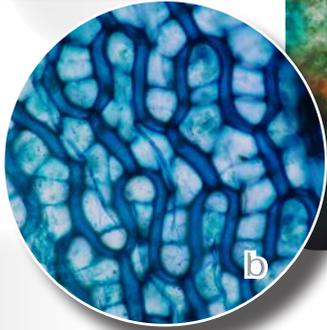
Figure X-1-5: représentation schématique des sondages du site des Comailles. Illustrations photographiques pages suivantes.



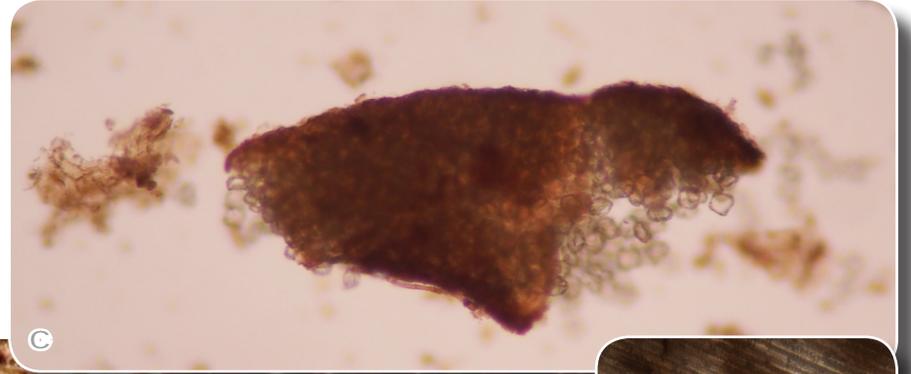
Comail_S2
à 10 cm

Comail_S2 à 10 cm, fond à graines d'*Alnus* sp et *Carex paniculata* (a), jeune utricule de *Carex acutiformis* (b), graines de *Carex* sp. (c), *Polytrichum strictum* (d), graine de *Betula pubescens* (e), graines d'*Alnus* sp (f), limbe de cypéracée (g), sporange de fougère (h), racines à structure arbusculaire (i), feuille de *Thuidium tamariscinum* (j).

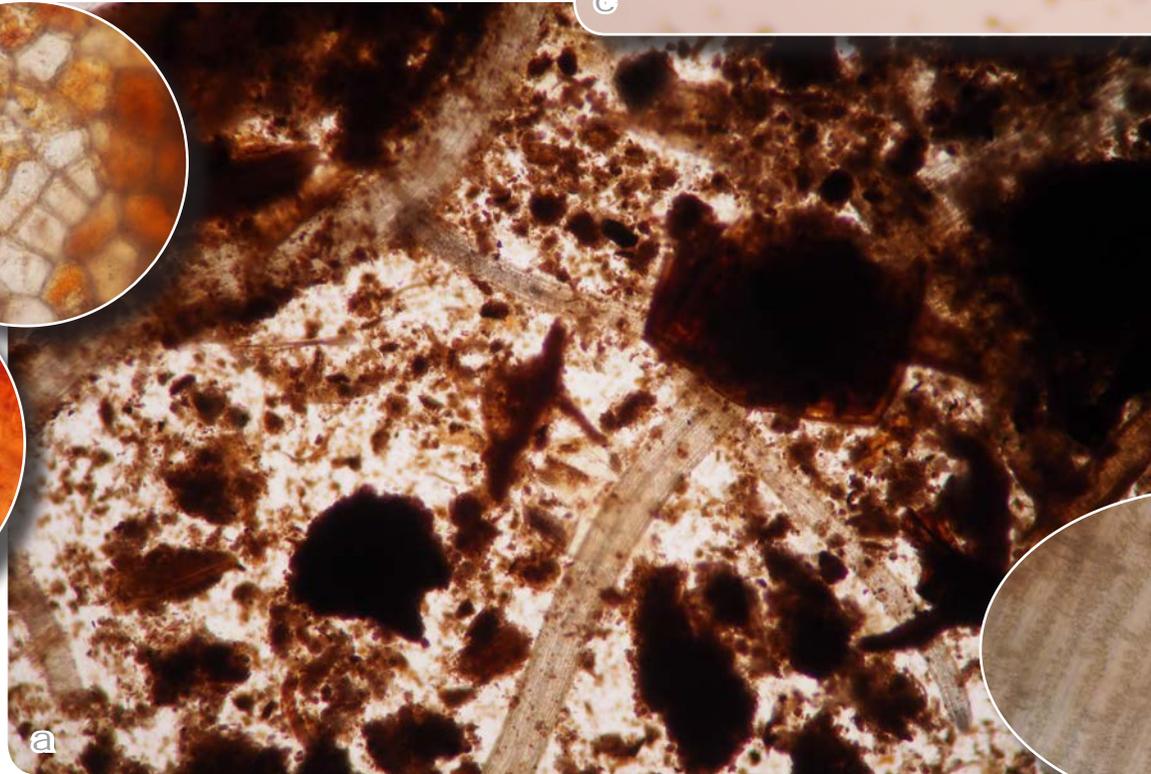
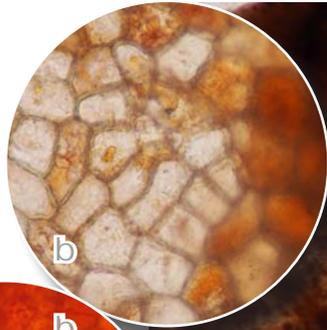
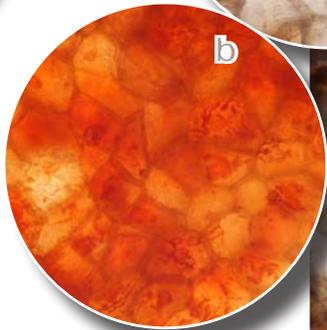
Comail_S2
à 80 cm



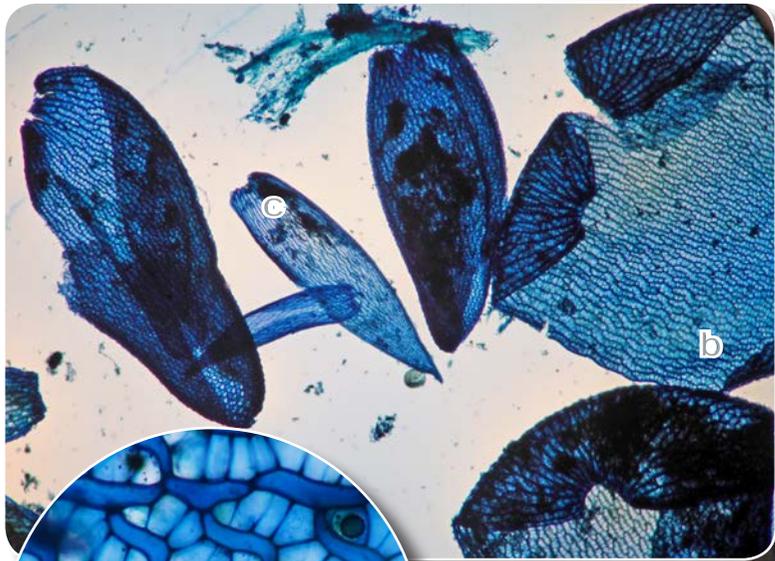
Comail_S2 à 80 cm, *Molinia caerulea* (a) et *Sphagnum palustre* (b).



Comail_S2
à 140 cm



Comail_S2 à 140 cm, le fond (a), péridermes de *Salix* sp. (b), sac pollinique (c), *Phragmites australis* (c).



Comail_S2
à 170 cm

Comail_S2 à 170 cm, le fond à graines d'*Alnus* sp. (a et d), *Sphagnum palustre* (b) et *Sphagnum flexuosum* (b), graines de *Carex paniculata* (e).

Sondage Com_macro

Longueur de profil: 300 cm



Com_macro
0-50cm



Com_macro
50-100cm



Com_macro
100-150cm



Com_macro
150-200cm



Com_macro
200-250cm



Com_macro
250-300cm

Cadre rouge = échantillon daté

Figure X-1-6: photographies des carottes constituant le sondage macrorestes Com_macro, réalisé aux Comailles .

X.1.C - Analyse des macrorestes

Les épaisseurs de tourbes importantes du complexe des Comailles constituaient une opportunité pour la réalisation d'une description précise des communautés à l'origine de l'édifice tourbeux. Bien que non initialement programmée dans la commande, nous avons donc procédé à une analyse des macrorestes classique, complétée d'une datation à la base du profil, pour déterminer l'âge des premiers dépôts tourbeux, à 275-277 cm de profondeur.

Le résultats de l'analyse est présenté dans le tableau X-1-1. Le profil montre une succession de quatre grandes unités avec du bas en haut:

- (1) Une probable boulaie-saulaie à bruyère caractérisée par une pauvreté générale en fibres et une richesse en particules minérales et charbons, en particulier à la base. Le phragmite est rare, seulement présent à la base,



Com_macro, le fond à 187 cm (a) et à 277 cm (b).



Com_macro, *Phragmites australis* à 277 cm (c).

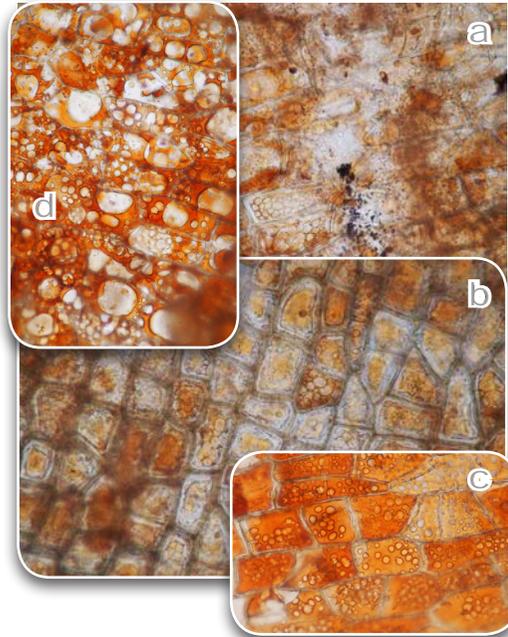
Com Macro1 - Pierre et Christine Goubet - 6 octobre 2020

Profondeur (cm)	Fibres (%)	Microgrégats (%)	Sables à argiles (%)	Charbon de bois (%)	Racines-Radicelles	Indéterminées	Feuilles	Periderme	Bois	Feuilles	Sclérotés	Periderme	Racines-Radicelles	Racines poilues	Periderme	Graines	Racines-Radicelles	Graines	Racines-Radicelles	Thuidium lamarscivum	Racines	Sporanges	Polytrichum strictum	Graines	Rhizome	Racines	Racines tuberculées	Fruits	Limbes	Sphagnum palustre	Sphagnum angustifolium	Écaille de chaton	Graines	Graines	Bas de feuilles			
0																																						
7	100	0			p	Fr																							p	r	d			1				
17	10	90	+	+	d	e																																
27	90	10	-	-	d	e																																
37	90	10			d	p																																
47	90	10			r	r																																
57	90	10	-	-	r	r																																
67	60	40	+	+	d	e																																
77	50	50	++	+	d	e																																
87	40	60	-	-	d	e																																
97	60	40	-	+	d	e																																
107	70	30	+	+	d	p																																
117	70	30	-	-	r	p																																
127	20	80	+	+	d	e																																
137	20	65	15	+	d	e																																
147	5	95	-	-	d	Fr	p																															
157	5	75	20	++	d	e																																
167	50	20	30	+	d	e																																
177	80	5	15	-	p	d																																
187	30	70	-	-	d	p																																
197	100	0																																				
207	85	5	10	+	p	r																																
217	85	5	10	+	p	p																																
227	20	50	30	+	p	p																																
237	90	10	+	+	p	p																																
247	60	40	+	+	p	p																																
257	10	80	10	+	d	e																																
267	5	65	30	+	d	e																																
277	50	20	30	++	p	e																																
287	60	5	15	20	e	p																																
297	5	20	70	5	d	e																																

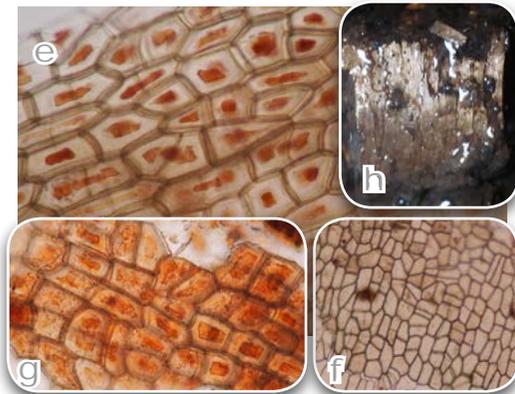
Tableau X-1-1: résultats de l'analyse des macrorestes du sondage Com_macro1. A droite, synthèse. Codes proportions: d dominant; r régulier; p ponctuel; e exceptionnel, nombres pour les éléments figurés avec n pour les éléments trop nombreux pour être comptabilisés. Fr signifie fragment. ? précise l'incapacité à pondérer le macroreste à cause d'une similitude avec un autre type proche. * indique la nature carbonisée de l'élément. Les illustrations photographiques de ce sondage sont présentées dans les pages suivantes.

287 à 137 cm
Boulaie-saulaie à
bruyères?

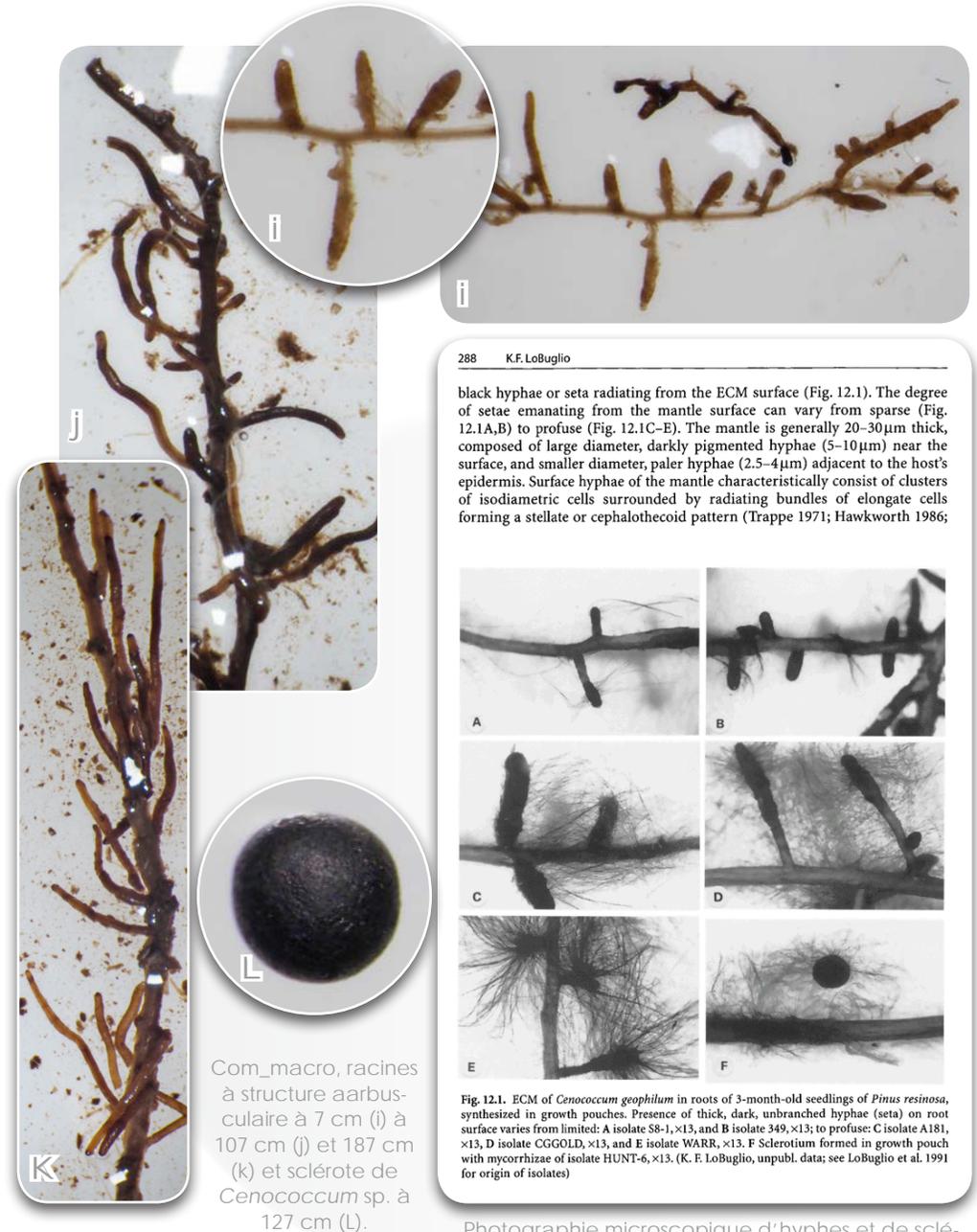
les éléments les plus représentés étant des restes d'aulnes, de bouleaux ou de saules. Les racines à structure arbusculaire sont représentées sur toute l'épaisseur de l'horizon, indiquant une forme d'aération du sol récurrente, comme si la tourbière était en «limite fonctionnelle». Une ou plusieurs éricacées sont présentes, ce qui apparaît comme atypique pour ce genre de communauté. Cette unité est stable, car elle recouvre une épaisseur de 160 cm, qui pourrait correspondre à plusieurs millénaires.



Com_macro, péridermes d'éricacée, 157 cm (a), 167 cm (b), 177 cm (c), 227 cm (d).



Com_macro, péridermes de *Betula* sp ou *Alnus* sp. à 187 cm (e), 157 cm (f), 147 cm (g), 287 cm (h).



Com_macro, racines à structure arbusculaire à 7 cm (i) à 107 cm (j) et 187 cm (k) et sclérote de *Cenococcum* sp. à 127 cm (L).

288 K.F. LoBuglio

black hyphae or setae 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; Hawksworth 1986;

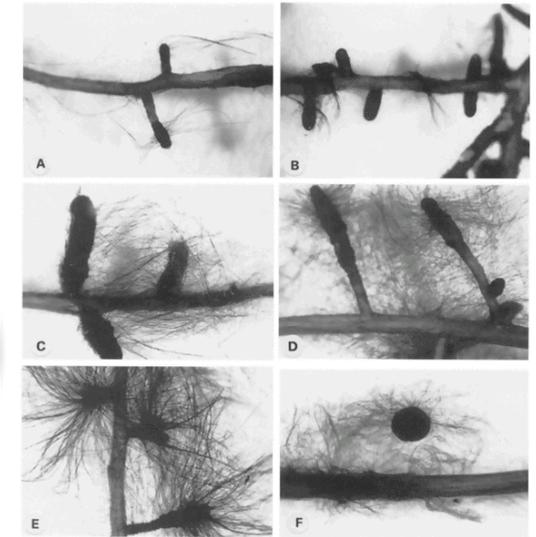
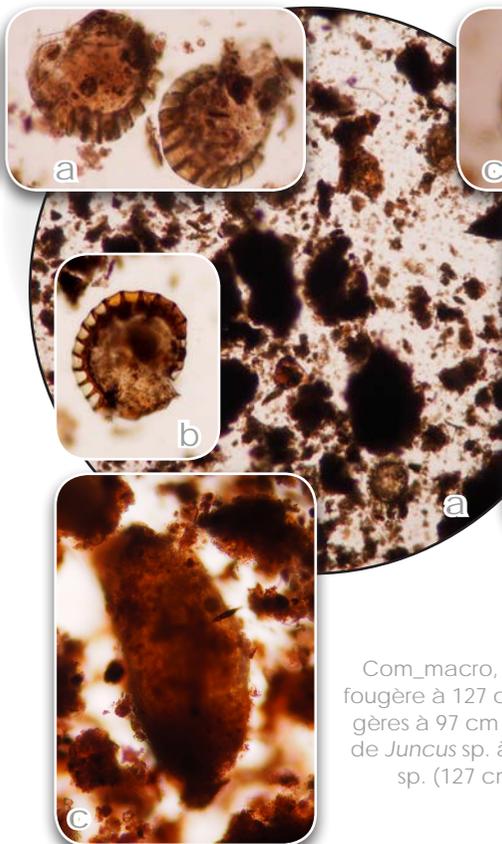


Fig. 12.1. ECM of *Cenococcum geophilum* in roots of 3-month-old seedlings of *Pinus resinosa*, synthesized in growth pouches. Presence of thick, dark, unbranched hyphae (seta) on root surface varies from limited: A isolate S8-1, ×13, and B isolate 349, ×13; to profuse: C isolate A181, ×13, D isolate 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)

Photographie microscopique d'hyphes et de sclérotés de *Cenococcum geophilum* issues de Cairney, J. W., & Chambers, S. M. (Eds.). (2013).

127 à 97 cm
Paturage?

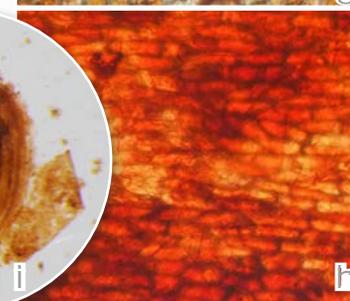
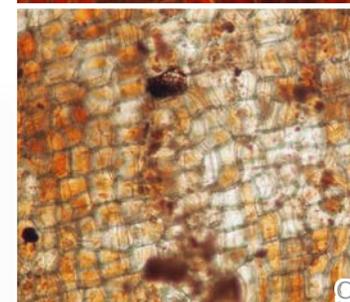
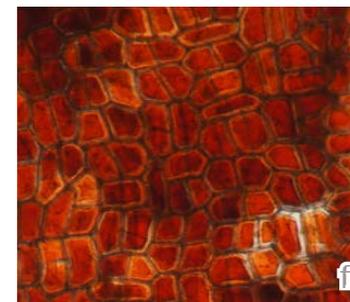
- (2) L'horizon qui la surmonte correspond à un complexe évolutif d'au moins deux composantes difficiles à caractériser sur une analyse à 10 cm de précision. La base recèle de graines de jonc et de ronce, de sporanges de fougères et de racines de prêle, faisant beaucoup penser à une mise en pâture de la communauté précédente. Les sphaignes sont présentes de manière diffuse. A cette première phase succède une forme de retour possible au boisement, indiqué par des graines d'aulne et de bouleau ou une mousse forestière (*Thuidium tamariscinum*).



Com_macro, le fond à sporanges de fougère à 127 cm (a), sporanges de fougères à 97 cm (b), 107 cm (c). Graines de *Juncus* sp. à 127 cm (c) et de *Rubus* sp. (127 cm (d) et 137 cm (e)).



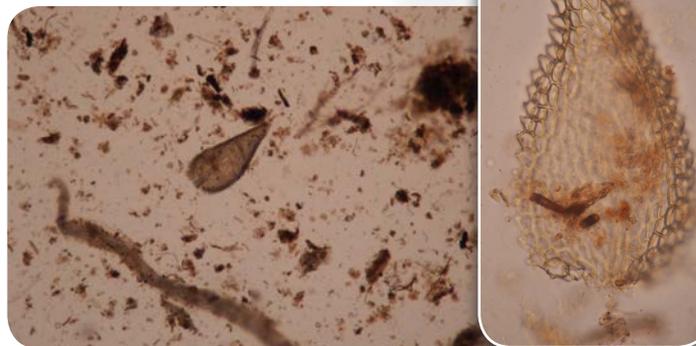
Com_macro, fragment de *Phragmites australis* à 97 cm.



Com_macro, péridermes de *Salix* sp. (à 107 cm (f) et 127 cm (g)), de *Betula* sp. à 97 cm (h) et de d'éricacée à 127 cm (j). Graine de *Betula pubescens* à 107 cm (i).



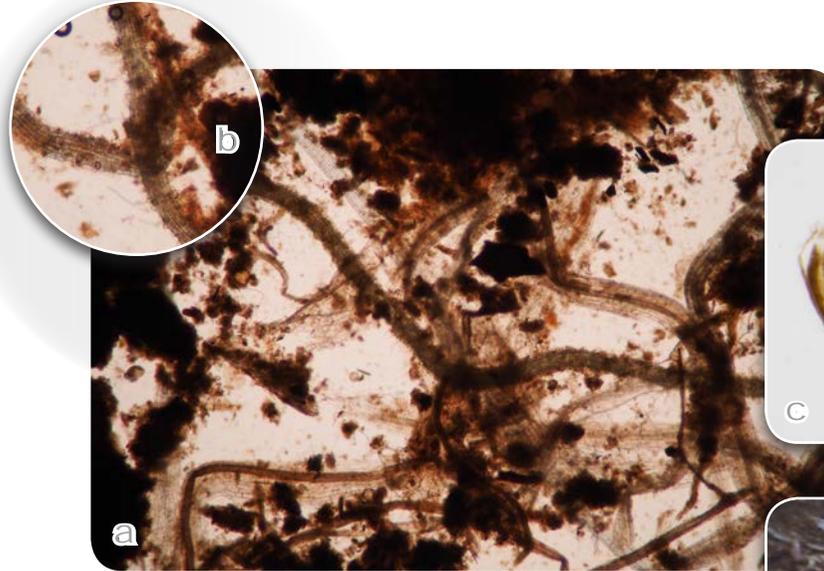
Com_macro, le fond à 97 cm.



Com_macro à 107 cm, le fond à feuille de *Thuidium tamariscinum*.

87 à 67 cm
Phragmitaie

- (3) Une nouvelle communauté s'installe vers 87 cm de profondeur, contenant du phragmite, de la tormentille, la linaigrette à feuilles étroites, du scirpe des bois et probablement la laïche rostrée. Le dépôt n'est épais que d'une vingtaine de centimètres.



Com_macro, le fond (a) à racines tuberculées (b), fruit de *Scirpus sylvaticus* probable (c) à 67 cm.



Com_macro, péricérme de *Betula* sp. à 67 cm.



Com_macro, *Polytrichum strictum* à 87 cm.



Com_macro, le fond à 87 cm.



Com_macro, fragment de *Phragmites australis* à 77 cm (d) et à 67 cm (e).



57 à 7 cm
Aulnaie-boulaie
à sphaignes

- (4) Le dernier horizon correspond à la tourbe de surface, sur une soixantaine de centimètres. Il s'agit d'une aulnaie-boulaie à sphaignes (*Sphagnum angustifolium*, *S. palustre*), semblable à celle aujourd'hui présente. Un lit de tourbe riche en sables et en charbons et pauvre en fibres, probablement dégradée, se tient à une quinzaine de centimètres sous la surface. Nous l'interprétons comme la résultante d'un incendie et non comme un horizon de surface densifié pastoral (KTH) par

analogie avec les autres sondages où le KTH se situe vers 45-75 cm de profondeur. Ici, le KTH correspondrait à la phragmitaie, entre 60 et 90 cm de profondeur, caractérisé par les racine de linaigrette engainante.

La datation carbone a été réalisée à la base de la tourbe, à 280 cm de profondeur, juste au-dessus d'un lit de charbon. La date calibrée s'échelonne entre 5471 et 5218 avant J.-C. (figure X-17).

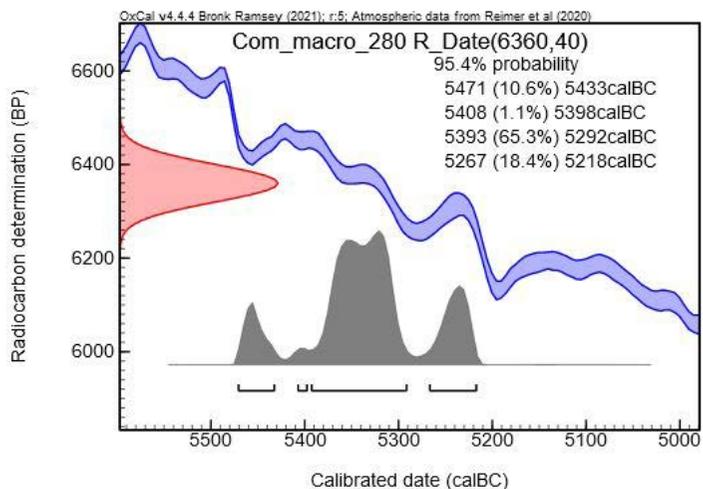


Figure X-1-7: calibration de la datation carbone de l'échantillon.



X.1.D - Unités fonctionnelles

Le complexe se structure en quatre unités majeures, dont trois ont été cartographiées dans le détail par un parcours au GPS (figure X-1-6).

La principale unité est une boulaie à sphaignes et phragmite, à nombreux *Carex paniculata* (figures X-1-7 et X-1-8), est elle bordée à l'ouest par une boulaie-moliniaie à sphaignes (figure X-1-9), toutes deux bordées par une boulaie à ronces et osmonde. Cet

ensemble est bordé au nord par l'aulnaie riveraine du Branlin (non cartographiée).

Parmi les sphaignes observées, on note *S. palustre*, *S. cf. rubellum*, *S. fimbriatum* et *S. fallax*.

La boulaie-moliniaie à sphaignes héberge: *Betula pubescens*, *Molinia caerulea*, *Carex rostrata*, *Eriophorum angustifolium*, *Erica tetralix*, *Juncus acutiflorus*, *Sphagnum cf. rubellum* (figure X-1-9), *Aulacomnium palustre*, *Hypnum jutlandicum* et *Pleurozium schreberi*.

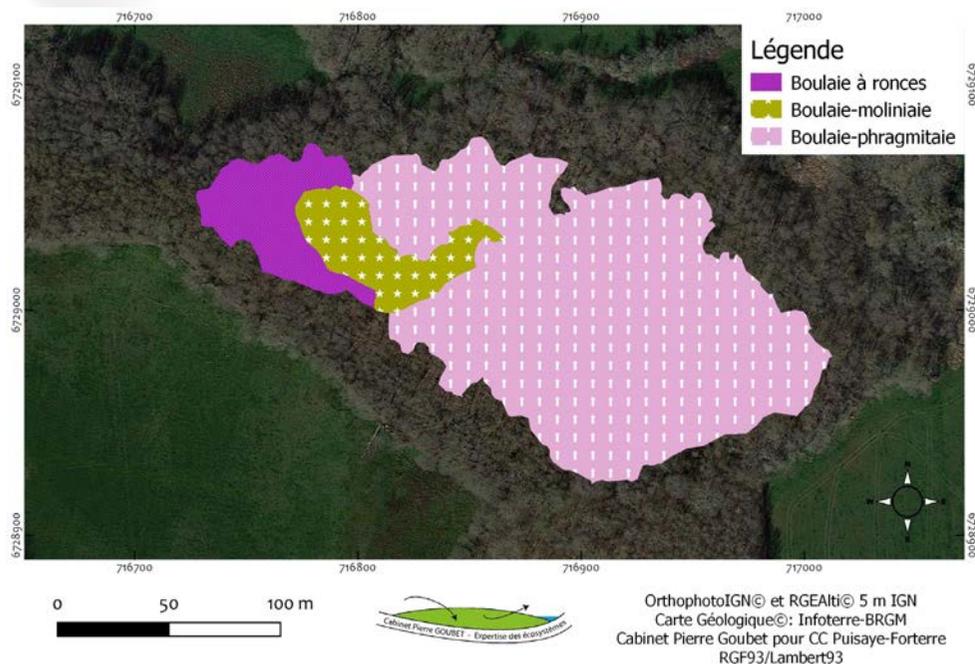


Figure X-1-6: cartographie des unités fonctionnelles du site de Comailles sur fond orthophotographique Google Satellite.



Figure X-1-7: la boulaie à phragmite.



Figure X-1-8: la boulaie à phragmite dans une zone riche en *Carex paniculata*.



Figure X-1-9: la boulaie-moliniaie qui héberge une butte à *Sphagnum* cf. *rubellum* (à droite).



Figure X-1-10: *Thuidium thamariscinum* et *Sphagnum palustre*, deux mousses présentes dans les tourbes du complexe.

X.1.E - Régimes piézométriques

Sept sondes piézométriques ont été posées aux Comailles. Le protocole visait à suivre les différentes unités présentes et à réaliser une ligne de suivi allant de la boulaie-phragmitaie au ru (codées Lign dans leur désignation). Au final, le suivi s'organise globalement en deux transects perpendiculaires, avec une émergence, au nord, qui ne s'aligne pas (figure X-1-11).

correspondant aux piézomètres sont présentés en figure X-1-12. Les profils sont majoritairement organiques sauf ceux du ru et de l'aulnaie, majoritairement minéraux, en particulier pour le Branlin, comme il est attendu.

Ces profils, peu profonds, viennent renforcer l'analyse pédologique et montrent la répartition des tourbes à bois et racines à structure arbusculaire ainsi que la présence de molinie en profondeur (75 cm) dans le profil de la boulaie-moliniaie.

Les profils pédologiques

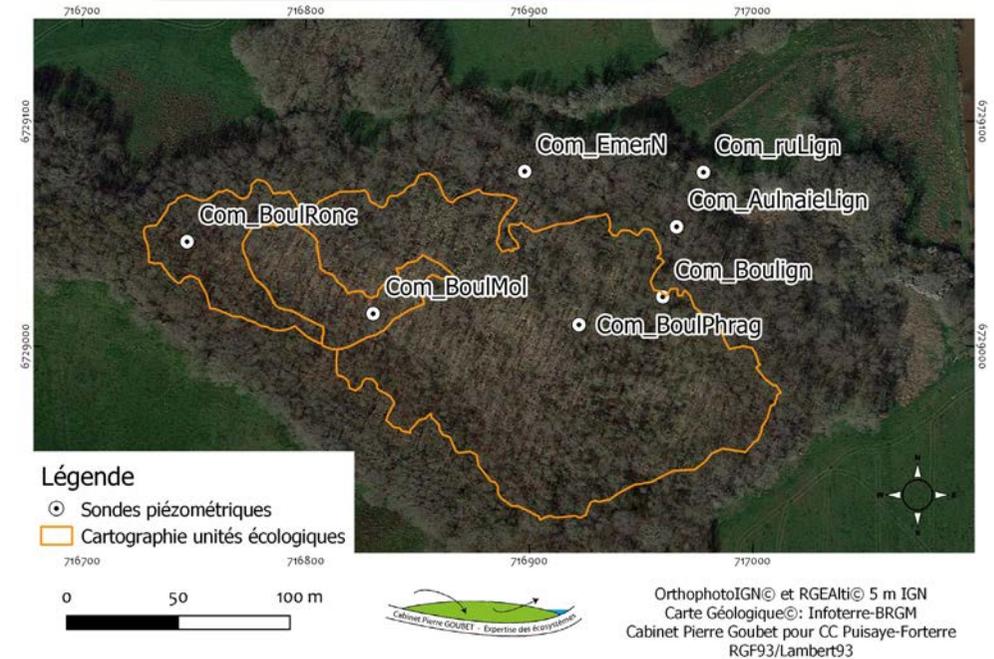


Figure X-1-11: localisation des sondages piézométriques du site des Comailles sur fond orthophotographique Google Satellite.

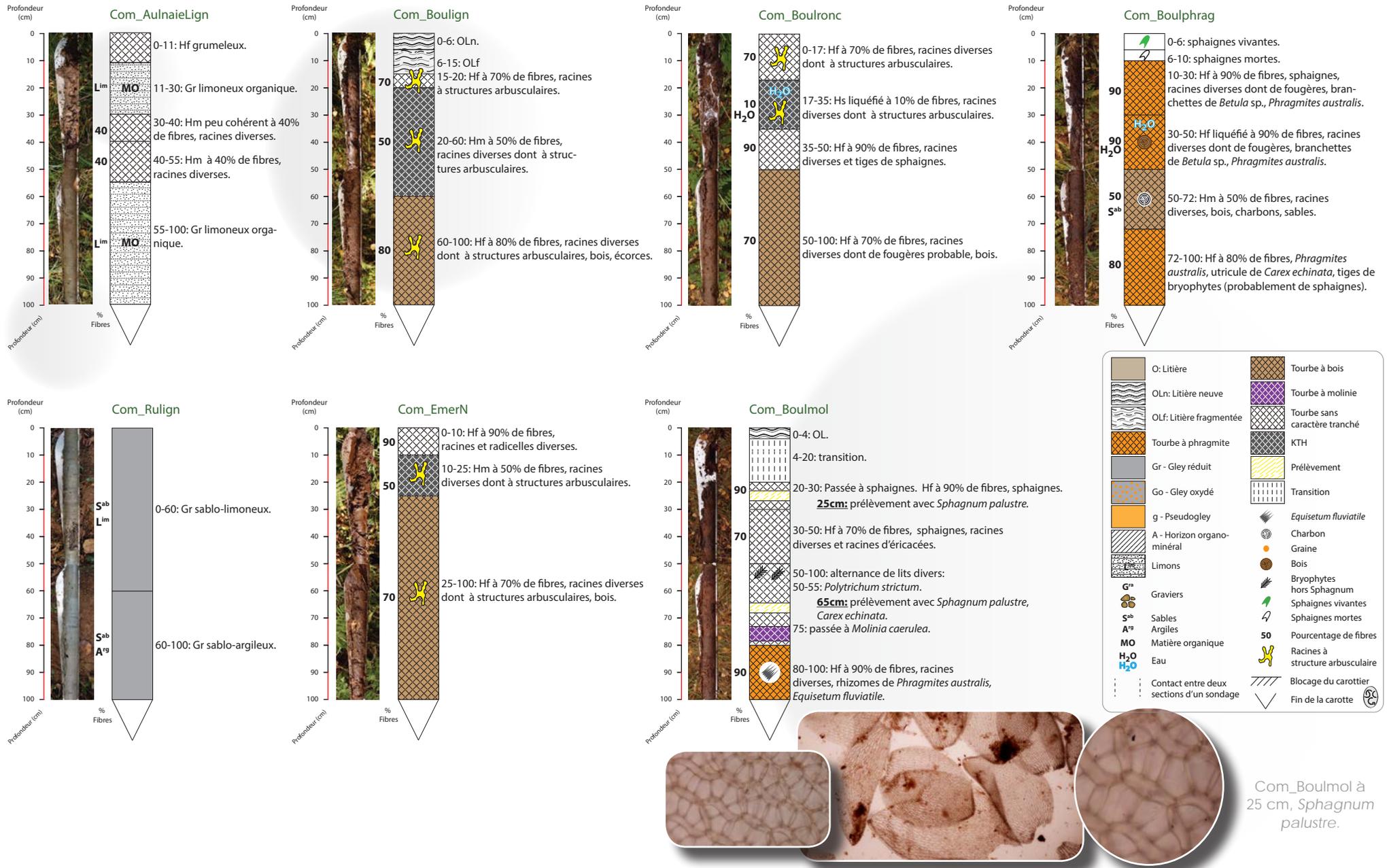


Figure X-1-12: représentation schématique des sondages piézométriques du site des Comailles et illustrations photographiques correspondantes.

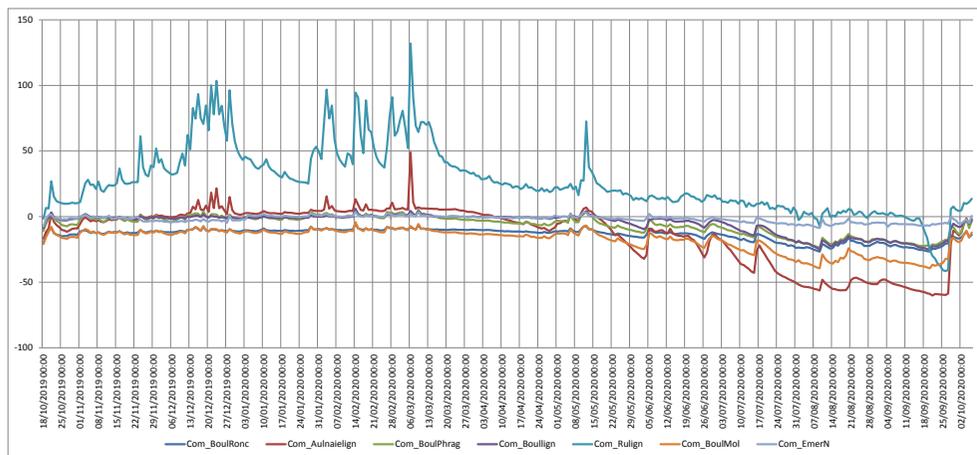


Figure X-1-13: chroniques piézométriques quotidiennes annuelles des Comailles du 18 octobre 2019 au 6 octobre 2020, exprimées en cm/sol.

Les chroniques annuelles montrent une dissociation nette entre la chroniques du Branlin (Com_Rulign) et les autres courbes, sauf pour l'aulnaie (Com_Aulnaielign) en hiver (figure X-1-13).

Le Branlin s'est asséché en septembre 2020, sans que cela n'affecte une des chroniques, indiquant parfaitement l'indépendance des zones humides par rapport au ruisseau, en été.

La chronique de l'émergence (Com_EmerN) est typiquement la plus stable dans le temps; les valeurs oscillent entre +4 et -9 cm toute l'année de mesure, mais seulement entre +2 et -6 si on exclut les valeurs extrêmes correspondant à quelques jours dans l'année.

La chronique de l'aulnaie montre

une parfaite synchronisation avec celle du Branlin lorsque cette dernière atteint la valeur de 97 cm (figure X-1-14). Ceci indique qu'à partir de cette cote du ruisseau, le secteur de l'aulnaie est inondé, les eaux de l'émergence et du ruisseau pouvant ainsi se mélanger et les particules minérales se déposer. Au final, l'aulnaie des Comailles montre elle aussi sa corrélation avec un processus dépendant d'écoulements de surface concentrés, au moins à une période de l'année si on ne se réfère qu'aux données à l'échelle annuelle. Les niveaux d'eau dans l'aulnaie sont ceux qui descendent le plus en profondeur en été, en approchant les 60 cm.

La comparaison des courbes remontées de 10 cm pour la boulaie-moliniaie (Com_BoulMol) et la boulaie-ronçaise (Com_BoulRonc) montre leur proximité proche avec celle de la

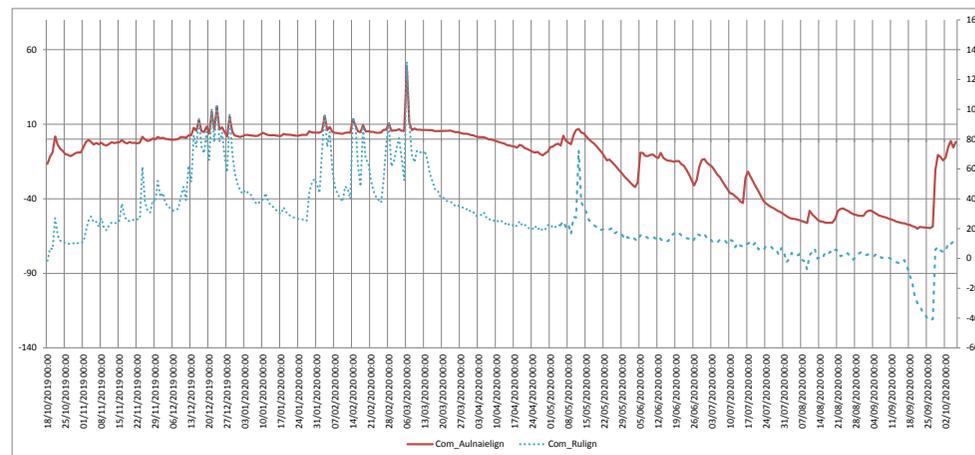


Figure X-1-14: chroniques piézométriques quotidiennes annuelles du Branlin et de l'aulnaie du 18 octobre 2019 au 6 octobre 2020, exprimées en cm/sol.

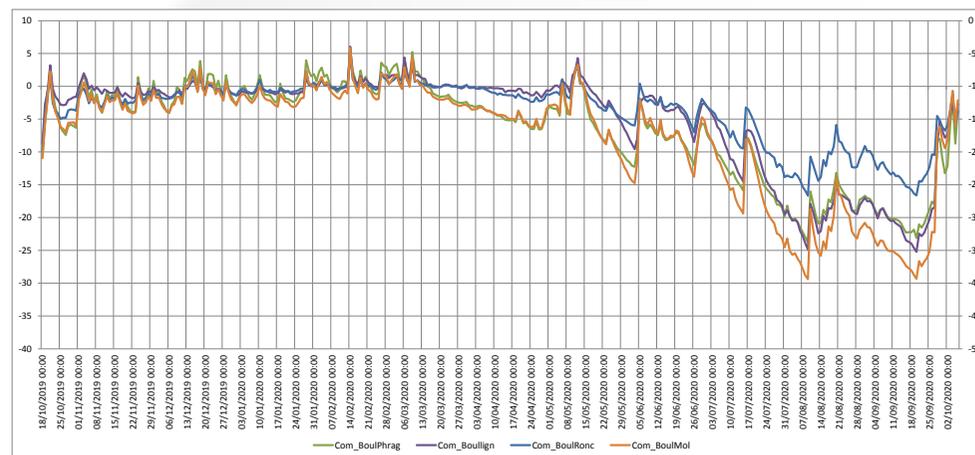


Figure X-1-15: chroniques piézométriques quotidiennes des Comailles du 18 octobre 2019 au 6 octobre 2020, exprimées en cm/sol.

boulaie-phragmitaie (Com_BoulPhrag) et de la boulaie-phragmitaie de la ligne de suivi (Com_Boullign), en particulier en hiver (figure X-1-15). A partir du printemps (vers le 13 mars), les chroniques s'associent par paires en particulier celle de la boulaie-phragmitaie

et de la boulaie-moliniaie, à 10 cm près. Le régime d'été, à partir du juillet, montre une proximité parfaite entre les deux boulaie-phragmitaies, et une proximité forte entre toutes les courbes, mais 15 cm plus en profondeur pour la boulaie-moliniaie.

Les chroniques de novembre (figure X-1-16) montrent le décalage entre les variations du Branlin et celles des émergences, correspondant au temps de concentration des écoulements sur les 44 km² du bassin versant du ruisseau.

Les autres chroniques sont synchrones et d'amplitude proche si on exclut l'émergence et la boulaie-phragmitaie de la ligne de suivi. Boulaie-ronçaise et boulaie-moliniaie montrent des courbes 10 cm plus basses que les autres.

Les chroniques de décembre (figure X-1-17) montrent l'inondation de l'aulnaie, à travers la synchronisation de la courbe avec celle du ruisseau,

alors qu'elle était synchronisée avec les autres courbes en novembre.

Les chroniques de janvier à mars ne montrent pas de phénomène nouveau. La synchronisation de la courbe de l'aulnaie avec celle du Branlin montre des inondations régulières, jusqu'en mars.

Les chroniques d'avril montrent la mise en place de l'évapotranspiration (figure X-1-18). Toutes les courbes piézométriques indiquent l'influence d'une émergence qui compense la baisse liée au prélèvement des plantes, complètement pour l'émergence et la boulaie-phragmitaie de la ligne de suivi, ou partiellement pour les autres.

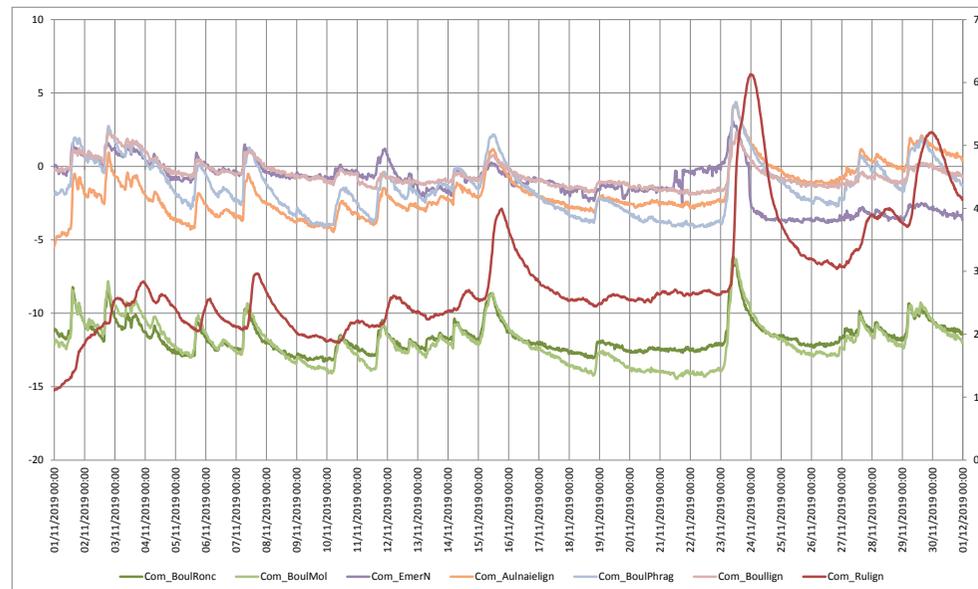


Figure X-1-16: chroniques piézométriques bi-horaires de novembre 2019 des Comailles exprimées en cm/sol.

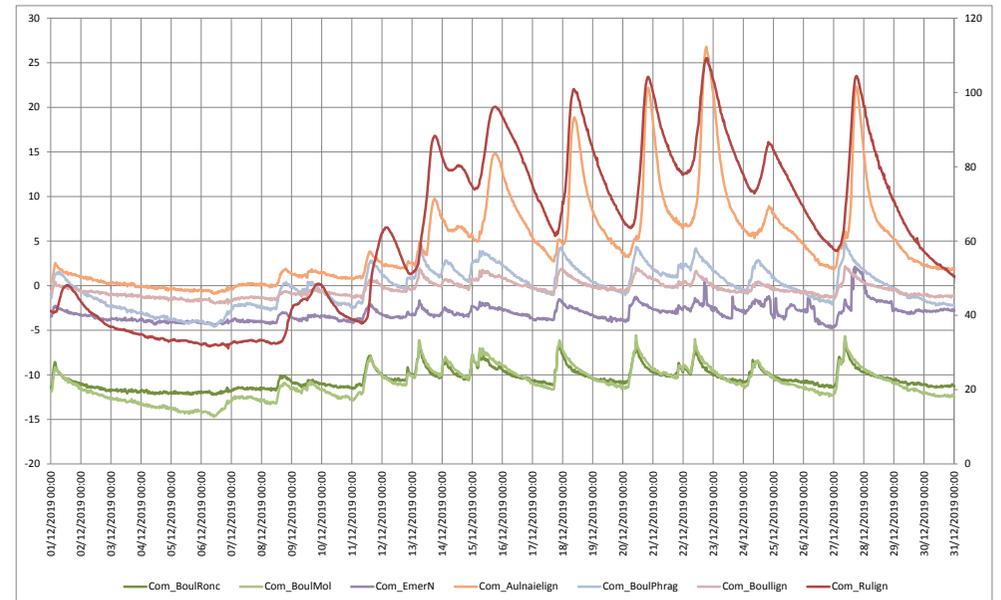


Figure X-1-17: chroniques piézométriques bi-horaires de décembre 2019 des Comailles exprimées en cm/sol.

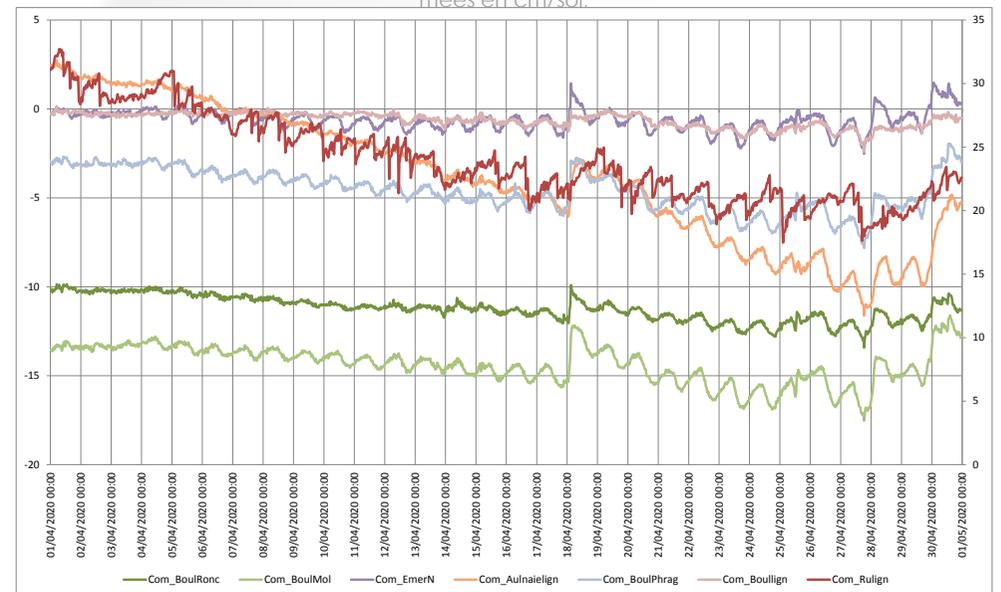


Figure X-1-18: chroniques piézométriques bi-horaires d'avril 2020 des Comailles exprimées en cm/sol.

Les chroniques de mai montrent la forte «sensibilité» de l'aulnaie à l'évapotranspiration (figure X-1-19). Interpréter ce fait est difficile. Il peut s'agir de la résultante d'une porosité plus faible du substrat dans la tranche de sol concernée, ou bien d'un besoin plus important des plantes.

En juin, le trait est comparable (figure X-1-20), mais en juillet, la chronique de l'aulnaie montre un

tarissement et une mise hors de portée de la nappe pour l'évapotranspiration (figure X-1-21).

Les courbes d'août et de septembre ne montrent pas de nouveau trait particulier (figures X-1-22 et X-1-23). La constance des niveaux, en dehors de l'aulnaie ou du Branlin, est remarquable, même au cœur de l'été. Le complexe est alimenté par une émergence particulièrement pérenne.

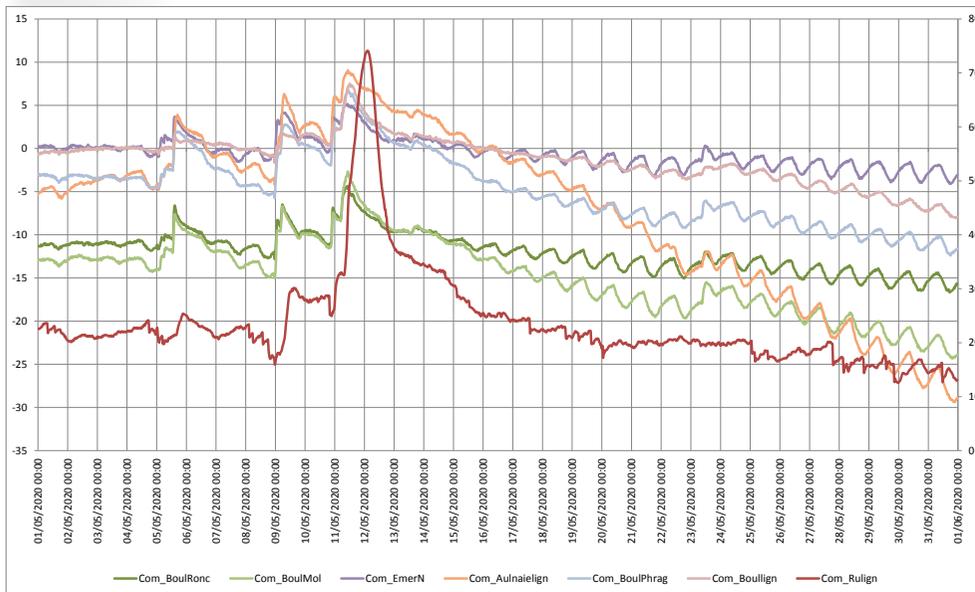


Figure X-1-19: chroniques piézométriques bi-horaires de mai 2020 des Comailles exprimées en cm/sol.

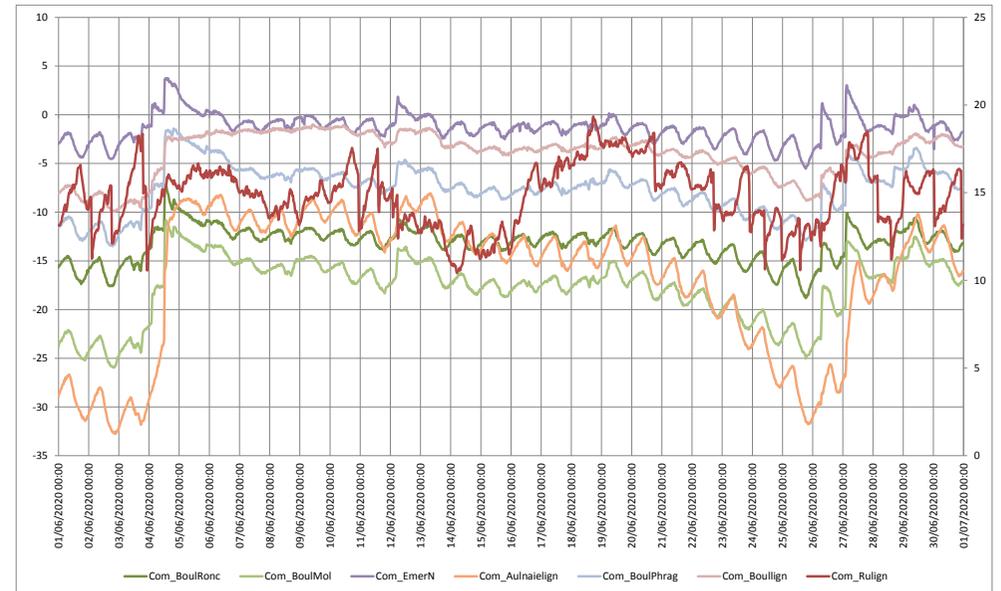


Figure X-1-20: chroniques piézométriques bi-horaires de juin 2020 des Comailles exprimées en cm/sol.

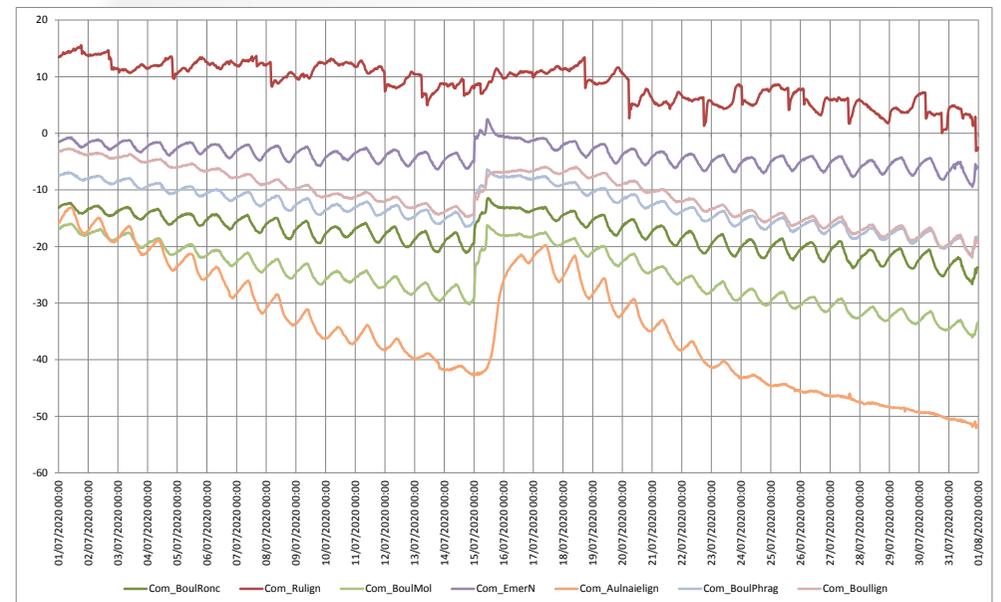


Figure X-1-21: chroniques piézométriques bi-horaires de juillet 2020 des Comailles exprimées en cm/sol.

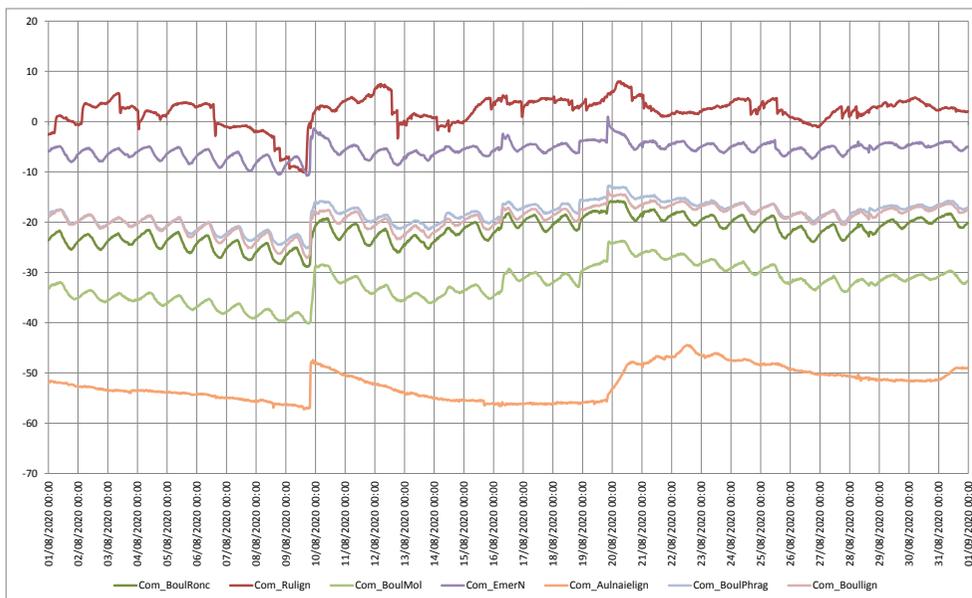


Figure X-1-22: chroniques piézométriques bi-horaires d'août 2020 des Comailles exprimées en cm/sol.

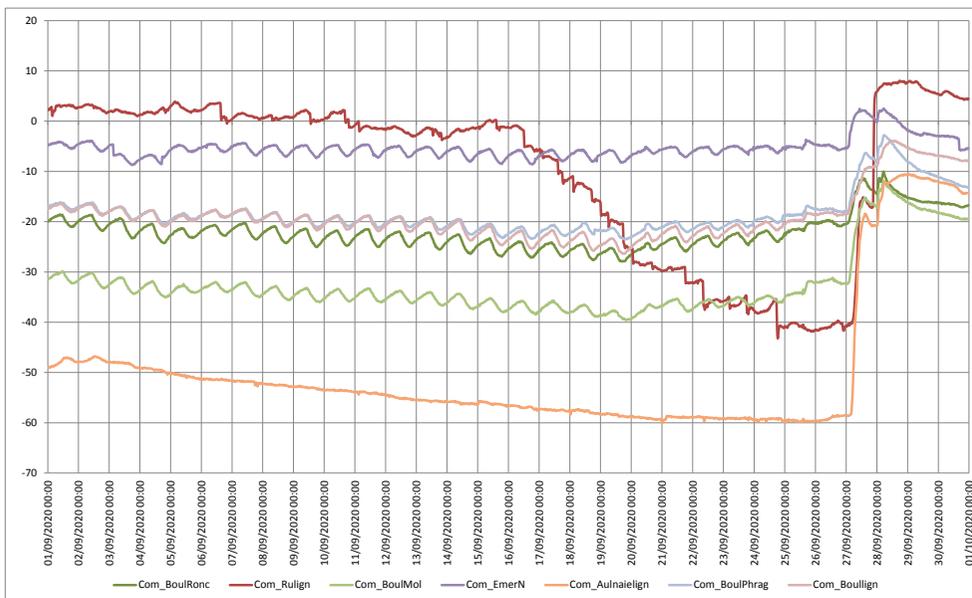


Figure X-1-23: chroniques piézométriques bi-horaires de septembre 2020 des Comailles exprimées en cm/sol.

X.1.F - Photographies aériennes anciennes

Le complexe des Comailles n'a pas changé fortement d'apparence depuis les années 1940 (figure X-1-24). Il semble que la densité des arbres et de la canopée ait cru. Il est aussi possible

que des coupes aient eu lieu entre les années 1940 et les années 1960, mais cela est difficile à évaluer.

Il semble que le site soit boisé depuis au moins les années 1940, à l'exception de petites zones.

X.2 - Interprétation fonctionnelle

Sans donnée d'inventaire des tourbières régionales, il est difficile d'évaluer strictement l'intérêt patrimonial du complexe, mais sur la base de notre propre expérience, ce site présente de nombreux éléments d'intérêt majeur. Le complexe des Comailles est la tourbière la plus grande et la plus fonctionnelle des sites étudiés. Elle est dans l'état originel supposé typique de nombreuses tourbières aujourd'hui non fonctionnelles ou disparues. Les deux à trois mètres de tourbe présents constituent des archives paléocéologiques exceptionnelles, couvrant 7000 années d'histoire locale.

La nature de tourbière d'émergence du complexe est clairement révélée par les données de niveaux d'eau dans les sols, les communautés actuelles et les communautés passées déduites de l'analyse des macrorestes.

Si l'existence d'une émergence de la nappe des Sables de la Puisaye à proximité de leur contact avec

les Argiles de Myennes sous-jacentes n'offre pas de discussion, le fait qu'il existe une forme de concentration des écoulements au niveau du complexe n'a pas d'explication argumentée sur la base des données disponibles. Il peut s'agir d'une forme de concentration induit par une paléotopographie des argiles de Myennes; il peut s'agir d'un effet du rétrécissement de la vallée à l'endroit des Comailles, poussant une nappe d'accompagnement relativement lointaine du Bralin à émerger; ou bien d'une conséquence de la concentration des flux induite par l'existence d'une faille. La conjonction de plusieurs de ces éléments est également possible, comme l'est l'hypothèse d'une simple décharge de la nappe locale, plus capacitive à cet endroit qu'à l'amont des autres sites étudiés. La meilleure compréhension des processus hydrologiques en jeu nécessiterait l'élargissement de la démarche de connaissance du bassin versant hydrogéologique.

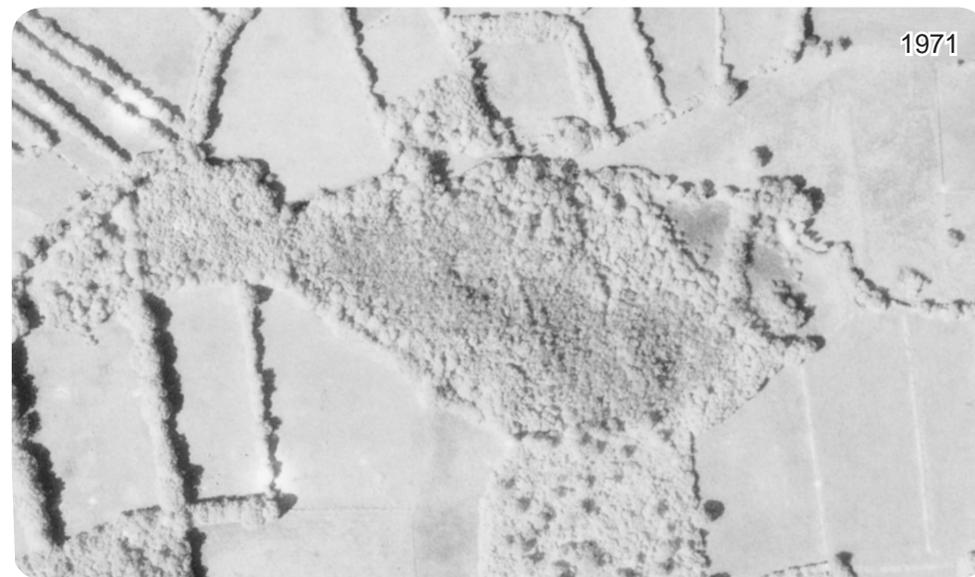
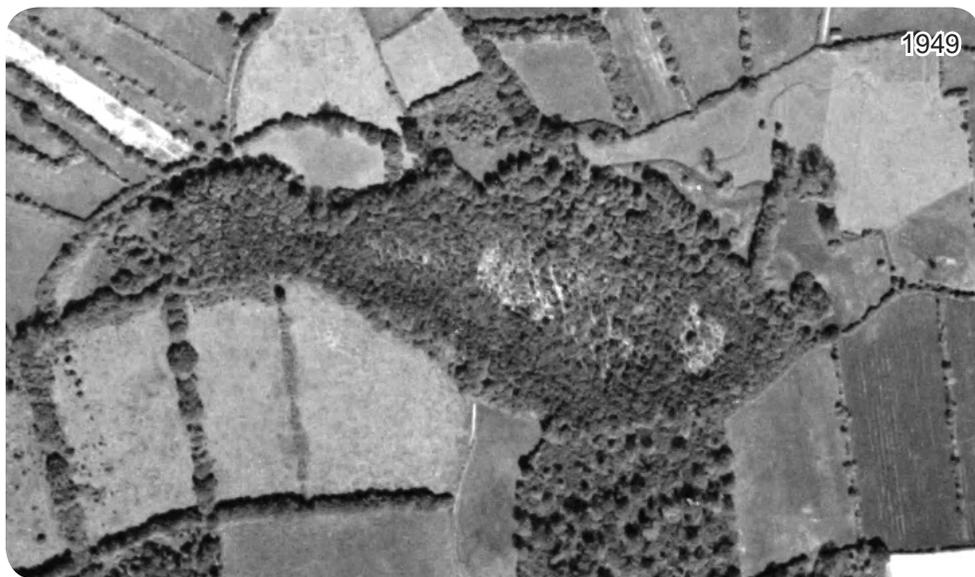


Figure X-I-24: photographies aériennes de 1949, 1964, 1971 et 1978 (source site Remonter le temps de l'IGN).

Le fonctionnement général du complexe est donc celui d'une tourbière d'émergence typique avec une production de tourbe permise par l'existence d'un écoulement ascendant, diffus sur l'ensemble de la zone humide. Ce processus d'émergence sera expliqué en détail dans la partie «synthèse» de ce rapport.

L'histoire de la tourbière apparaît relativement diversifiée avec trois phases majeures. La première est celle d'une boulaie-saulaie, contenant peut-être des aulnes, sous l'influence probable du ruisseau à travers des débordements récurrents, mais relativement exceptionnels d'après la durée représentée par 130 cm de sédiments considérés. La durée de cette communauté nous est inconnue, mais le commencement de la turfigenèse se situe entre 5471 et 5218 avant J.-C. La tourbière des Comailles a donc plus de 7000 ans, vraisemblablement autant que l'agriculture de sud-est du Bassin parisien. Les archéologues indiquent ainsi que les premières installations néolithiques du secteur Aisne, Marne, Aube ont lieu lors de la période dite du Rubané ancien, vers 5300-5200 ans avant J.-C. (Bostyn *et al.*, 2015; Allard, 2018). La mise en place de la tourbière à la suite d'incendies massifs indiqués par le niveau charbonneux du dessous de la tourbe datée laisse présumer d'une influence majeure de l'Humain dans la mise en place de la turfigenèse.

En d'autres termes, la tourbière naît des bouleversements, inédits, induits par les agriculteurs-éleveurs lors de leur arrivée, faisant suite à une évolution lente des sols et communautés depuis le retrait des glaciers et surtout de leur influence périglaciaire pour ce qui concerne l'Yonne. Ceci n'est pas exceptionnel, la corrélation entre l'apparition ou l'intensification des usages agricoles et la mise en place de la turfigenèse est reportée par ailleurs. Le détail des processus en jeu reste incertain. Il est possible que la turfigenèse apparaisse suite à des modifications hydrologiques (hausse des niveaux des nappes par changement de couvert végétal), et/ou à travers la mise en place de manteaux colluviaux sur des émergences concentrées existantes.

La seconde phase est probablement celle de la mise en pâturage ou de l'exploitation par fauche du milieu, avec des phases d'abandon, dont l'abandon le plus récent, qui se prolonge dans l'actuel et qui permet de dissocier une troisième phase où l'aulnaie-boulaie à sphaignes domine. Cette période correspond à une soixantaine de centimètres de tourbe, probablement d'origine récente, âgée d'un siècle ou un siècle et demi. Un incendie relativement récent est également indiqué dans le profil.

Les données actuelles comme celles du passé révélées par l'analyse

des macrorestes, indiquent que la nature de l'eau de la nappe des Sables de la Puisaye permet l'expression de communautés à roseaux et ligneux, ce qui est classique pour des tourbières d'émergence.

La comparaison des données de communautés anciennes et des communautés actuelles laisse présumer d'une forte naturalité du complexe et d'une dynamique résiliente, lorsqu'on

prend en compte le dernier mètre de tourbe. Cela confère donc au complexe un état de conservation favorable et un potentiel fonctionnel atteint.

Il faut cependant considérer que la marge ouest du complexe, occupée par la boulaie à ronces, n'apparaît plus turfigène, bien qu'hydrologiquement peu différenciée des autres secteurs et en particulier de la boulaie-moliniaie, toute proche.

X.3 - Propositions d'action

L'état «optimal» du complexe implique des modalités de gestion indirectes, pour le maintien des conditions hydrologiques actuelles et l'absence de toute perturbation directe sur la tourbière.

X.3.A - Connaissance

La nature apparemment exceptionnelle du complexe, par sa taille, le volume de tourbe qu'il héberge, et son état actuel fonctionnel, résilient, en fait un objet d'étude de choix pour la compréhension de la mise en place, du développement passé et du fonctionnement actuel des tourbières du Crétacé inférieur des marges est et sud-est du Bassin parisien.

Ceci-dit, pour ce qui concerne la

conservation des espèces et des Habitats, le diagnostic réalisé lors de la présente étude nous apparaît globalement satisfaisant, à l'exception de deux points majeurs: (1) l'absence d'hypothèse sur la dissociation entre le complexe turfigène représenté par les boulaie-phragmitaie et boulaie-moliniaie et la partie non turfigène occupée par la boulaie à ronces; et (2) la méconnaissance sur l'origine de l'eau et le processus de concentration des écoulements. Ceci-dit, nous n'avons aucune démarche de connaissance complémentaire à proposer pour explorer la première problématique, et la seconde ne peut pas se concevoir sans description de la topographie fine, et par une première approche géologique et géomorphologique complémentaire, menant éventuellement à une étude

hydrologéologique.

Bénéficier d'une description topographique fine à travers un levé lidar constituerait une grande avancée en terme fonctionnel, avec une meilleure compréhension de la mise en place du complexe, de la dissociation entre les différentes unités de la tourbière. Dans l'idéal, le levé lidar devrait englober une surface large autour du complexe, couvrant une petite dizaine de kilomètres carrés, au pire deux kilomètres carrés couvrant le versant sud du Branlin surplombant le complexe.

X.3.B - Gestion

Aucune gestion directe n'est requise, en dehors de la limitation stricte de toute atteinte, piétinement compris (à l'exception des mammifères sauvages).

La gestion conservatoire devrait surtout être réalisée à travers la considération de l'impluvium, en grande partie au sud du complexe, mais aussi au nord par principe de précaution (figure X-3-1).

Le maintien de la quantité d'eau est relative à l'absence de prélèvements par pompage. Aucun puits ne devrait donc être réalisé sans étude d'impact sur la tourbière. Pour ce qui concerne la qualité de l'eau, il est difficile d'évaluer les conséquences possibles de

nouvelles pratiques telles que la mise en place de cultures (blé, maïs, etc.). L'eutrophisation des eaux de nappes est un sujet complexe et elle ne se réalise pas de la même manière pour l'azote et le phosphore, compliquant les évaluations. En l'occurrence, le maintien d'une couverture boisée sur une partie de l'impluvium est un fait favorable. Les conversions de prairies en cultures devraient être évitées par précaution.

X.3.C - Suivi

Le suivi minimum concerne la réalisation d'une cartographie des unités écologiques telle que celle réalisée pour cette étude.

Pour bénéficier d'un outil de suivi fin réellement pertinent, il est nécessaire de mettre en place un profil de structure et de suivi sur un axe transversal du complexe, du versant minéral au sud jusqu'au Branlin, représentant ainsi 150 m de linéaire. Cet outil permet la description de la composition et de la structure floristique à travers 150 relevés de 0,2 m² contigus, le bornage des extrémités et de points relais permet la réitération de la mesure à différents pas de temps. Cependant, dans le cadre d'un site comme celui des Comailles, le travail est rendu difficile par la présence de nombreux arbres et des hautes herbes.

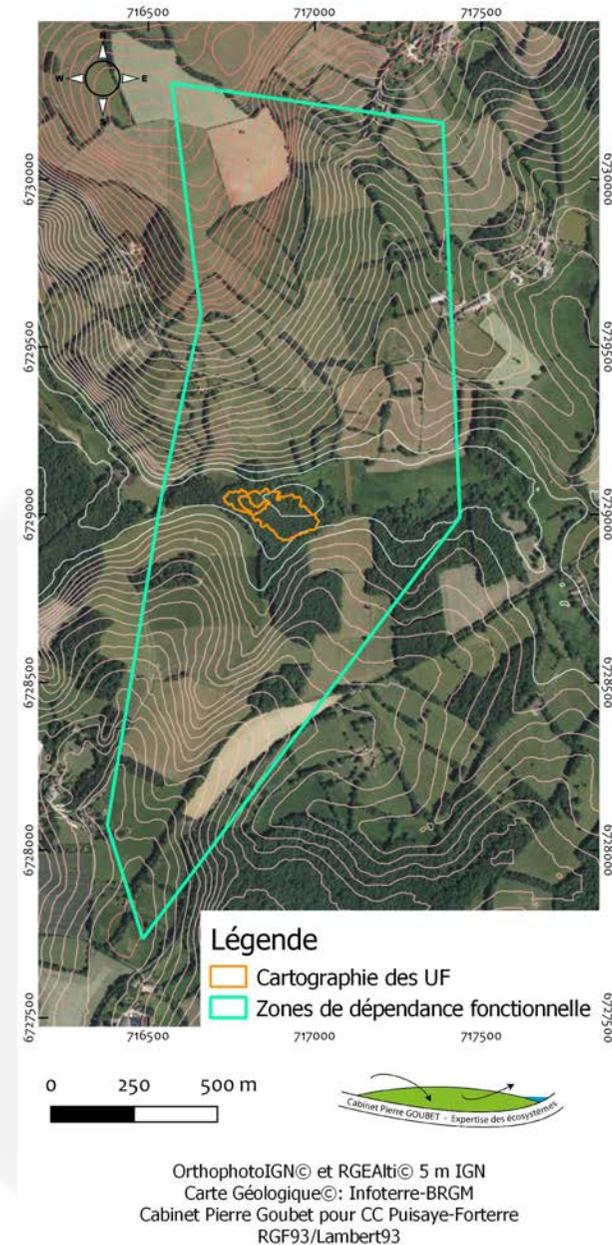


Figure X-3-1: délimitation grossière de l'impluvium du site des Comailles sur fond orthophoto-graphique IGN.

XI. Les Bergeries



XI.1 - Résultats-données

Le replat de fond de vallée situé en rive gauche du Branlin, à l'est du hameau des Bergeries, héberge des sols tourbeux et des communautés à sphaignes et bouleaux.

Ce site est à part dans la série étudiée par la nature des roches environnantes: une série de sables et d'argiles du Barrémien. Il apparaît également original pour sa situation dans le lit majeur du ruisseau, de manière relativement indépendante par rapport aux versants, apparaissant même perché sur le MNT, entouré par les ruisseaux sur les cartes topographiques, créant ainsi une sorte d'îlot.

Le complexe est traversé par quelques drains transversaux qui dirigent l'écoulement vers le Branlin.

XI.1.A - Épaisseurs de tourbe

Les épaisseurs de sédiments meubles mesurées à la perche atteignent 2,2 m (figure XI-1-1), mais la comparaison des données avec les carottages laisse présumer d'une épaisseur toujours largement inférieure de la

tourbe. Pour le sondage 1 (Berg_S1), la mesure brute est de 200 cm, mais le profil pédo-paléoécologique n'indique que 125 cm de tourbe. Seuls les carottages sont donc à-même de permettre de déterminer l'épaisseur de tourbe.

XI.1.B - Sols et tourbes sous-jacentes

Deux carottages pédo-paléoécologiques ont été réalisés dans le secteur de la boulaie à sphaignes et celui de l'aulnaie (figures XI-1-1 et XI-1-2). En complément, trois sondages ont été relevés lors de la pose des piézomètres (figure XI-1-7).

Les tourbes observées sont majoritairement issues de communautés à carex, phragmite et ligneux. La prêle des borbiers est aussi régulièrement répartie dans les profils et les graines de ményanthe ou de comaret sont présentes çà et là. La tourbière est donc minérotrophe à forte composante tremblante, ce qui se conçoit aussi bien en contexte lacustre qu'en contexte d'émergence.

Les tourbes reposent sur des

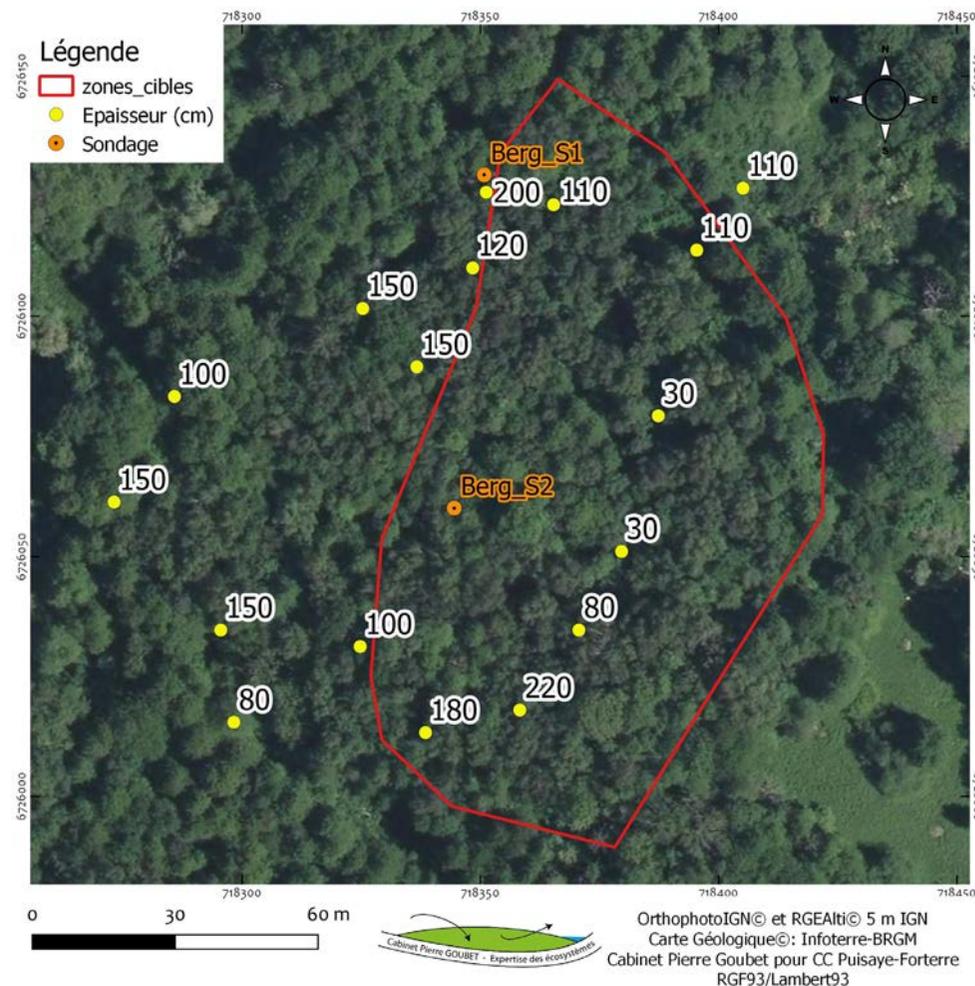


Figure XI-1-1: localisation des épaisseurs de tourbe et des deux sondages pédo-paléoécologiques de terrain du site des Bergeries, sur fond orthophotographique IGN.

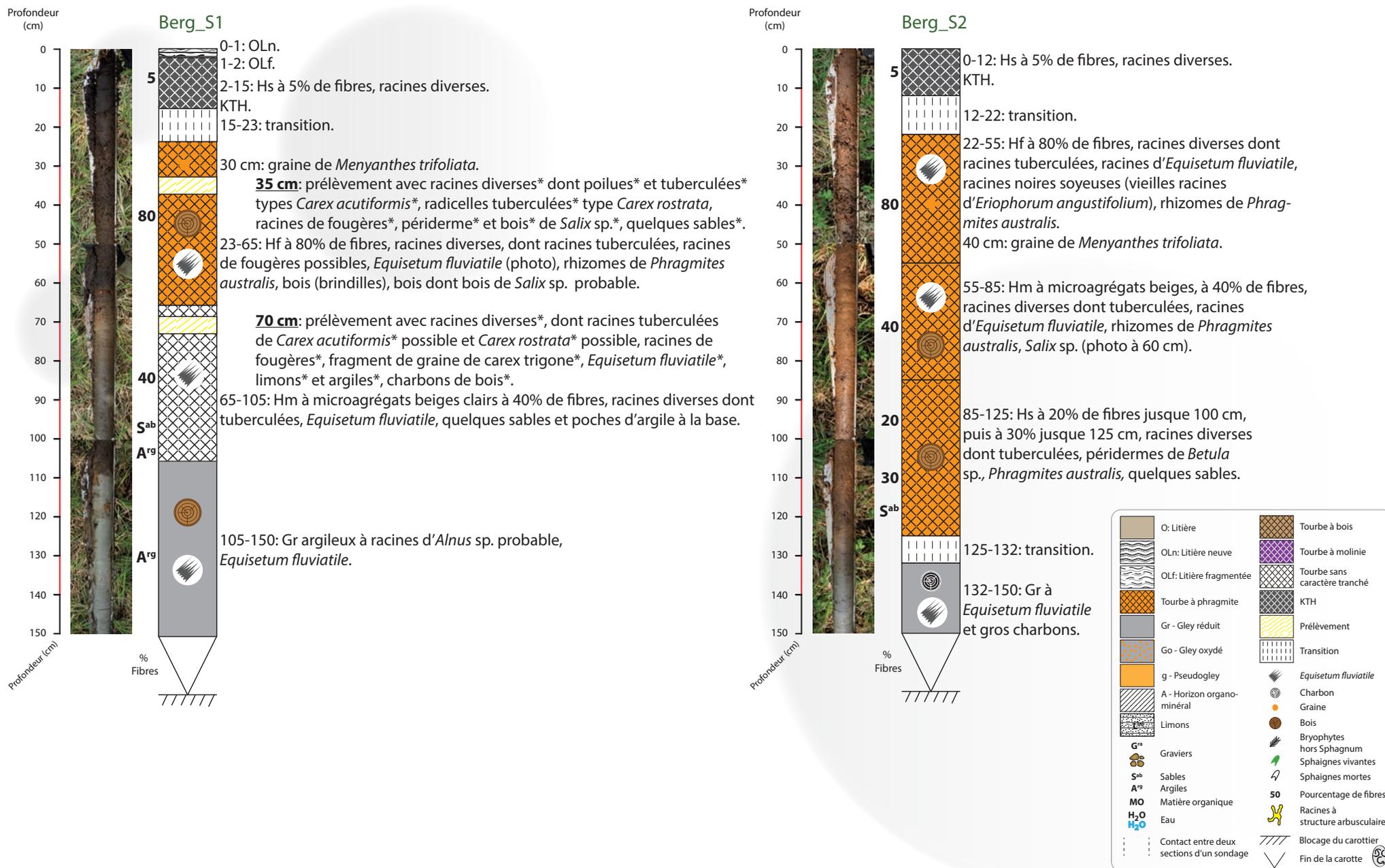
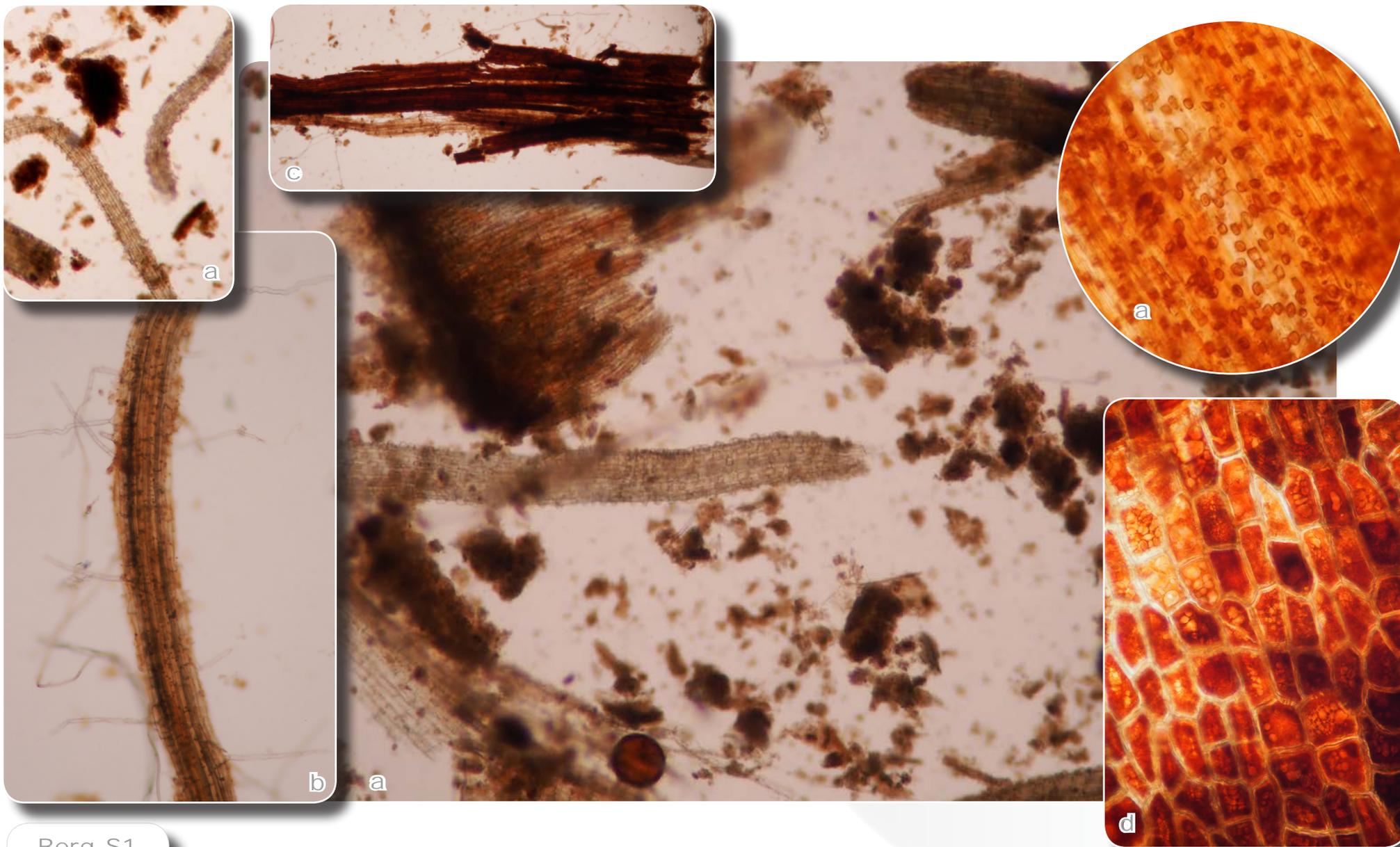
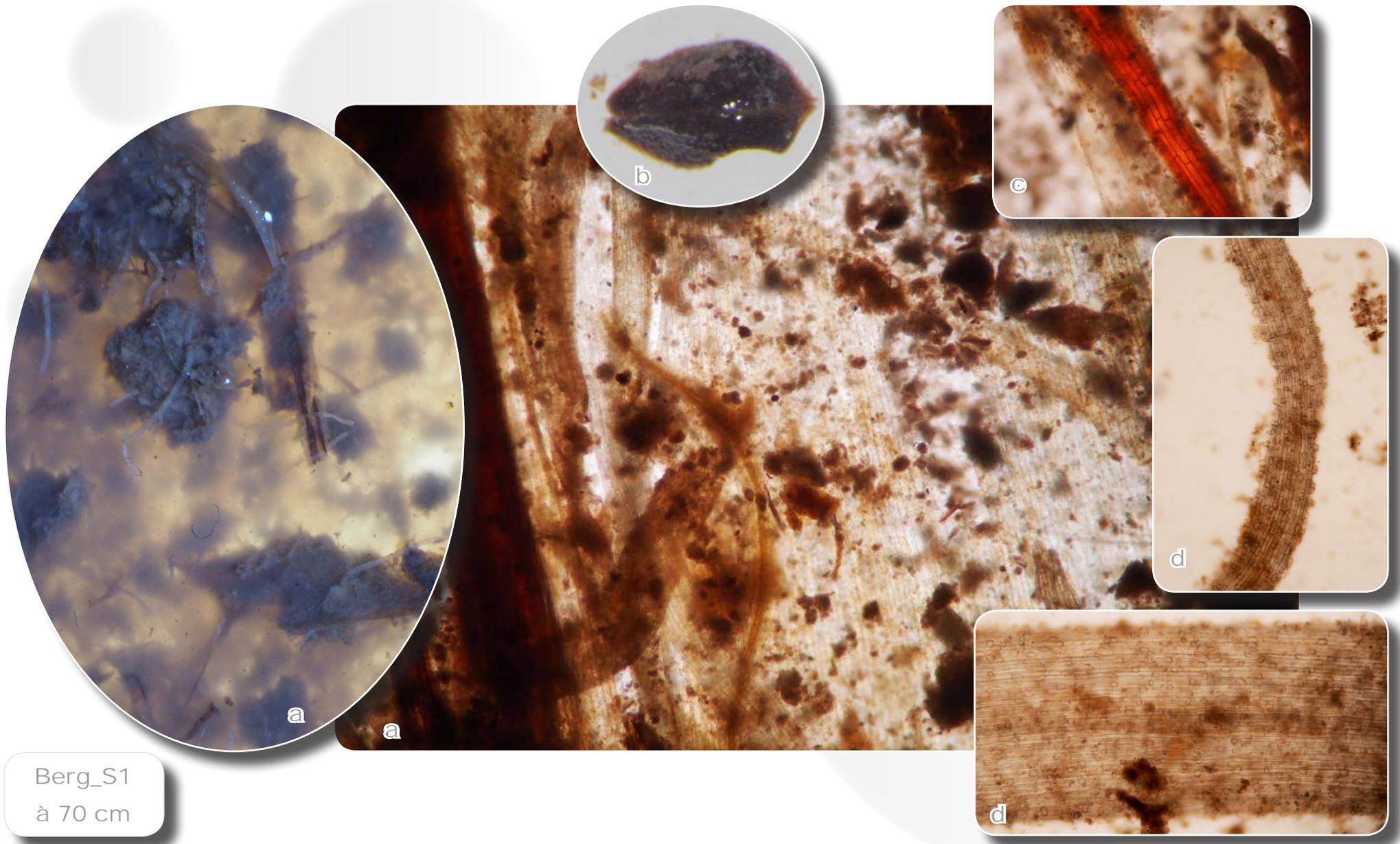


Figure XI-1-2: représentation schématique des sondages pédologique et paléoécologique Berg_S1 et Berg_S2.



Berg_S1
à 35 cm

Berg_S1 à 35 cm, le fond à racines tuberculées (a) et poilues type *Carex acutiformis* (b), racines de fougères(c), péricarde de *Salix* sp. (d).



Berg_S1
à 70 cm

Berg_S1 à 70 cm_, le fond (a), fragment de graine trigone de *Carex* sp. (b), racine de fougère (c), racines tuberculées de *Carex acutiformis* (d).

horizons réductiques typiques (gleys).

Les charbons sont fréquents.

Les horizons de surface sont densifiés, grumeleux, pauvres en fibres, correspondant à des kultureller Trockenhorizont typiques.

XI.1.C - Unités fonctionnelles

La nature des communautés végétales sur le complexe des Bergeries n'a pas été détaillée. Le complexe est dominé par diverses aulnaies où différents carex dominent par place (figures XI-1-3 et XI-1-4). *Carex acutiformis* est



Figure XI-1-3: .l'aulnaie à carex des Bergeries. La flèche montre l'alignement de *Carex paniculata* le long d'un ancien drain.

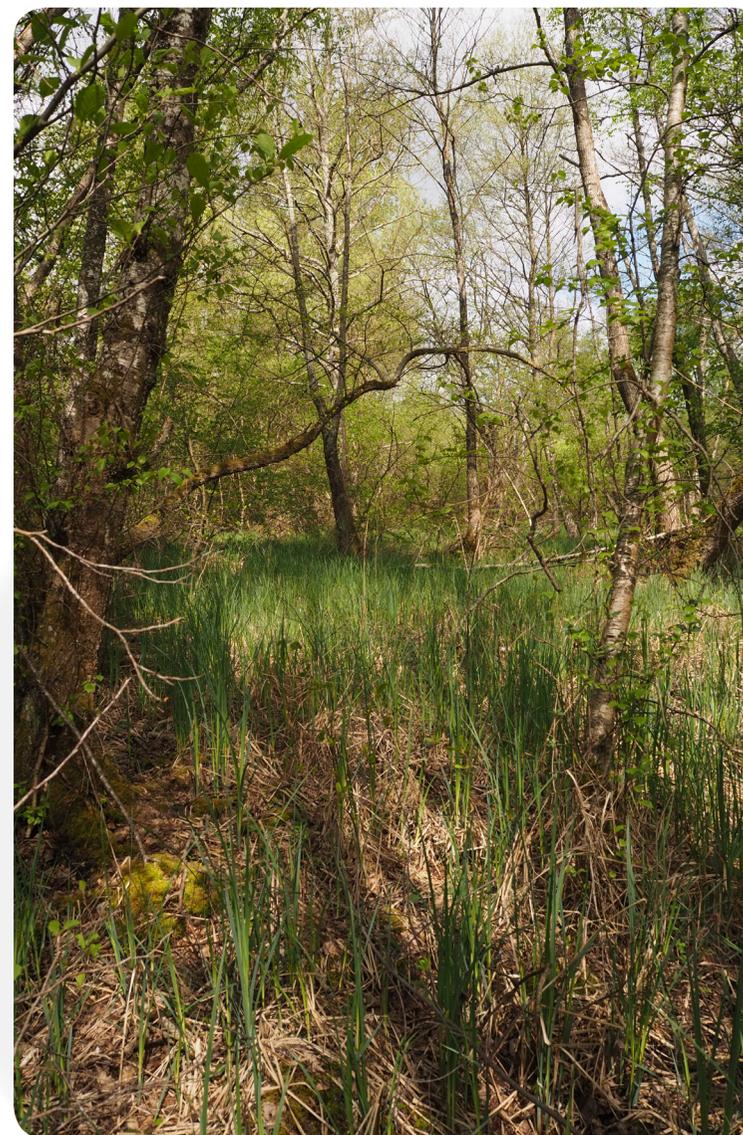


Figure XI-1-4: .autre aspect de l'aulnaie à carex.

probablement le plus répandu, mais une espèce à 2 stigmates a aussi été observée. Il pourrait s'agir de *C. riparia*, voire *C. acuta*. *C. paniculata* est présent en nombre le long des drains et à proximité du Branlin. La ronce est présente en certains points, possiblement là où le frêne est le plus représenté.

Une boulaie à sphaignes (*Sphagnum palustre*; figure XI-1-5) se tient sur quelques centaines de mètres carrés, dans la partie nord de la zone d'étude. La présence de la mousse sur des racines surélevées par la chute

d'un arbre montre la forte dépendance des sphaignes à l'eau atmosphérique (figure XI-1-6). La linaigrette à feuilles étroites (*Eriophorum angustifolium*) est également présente dans la même secteur.

XI.1.D - Régimes piézo-métriques

Trois sondes de suivi des niveaux d'eau dans le sol ont été posées sur le complexe (figure XI-1-7). Il s'agissait de caractériser les principales unités et surtout d'évaluer les différences entre



Figure XI-1-5: *Sphagnum palustre*, vérifié au microscope, de la boulaie des Bergeries.

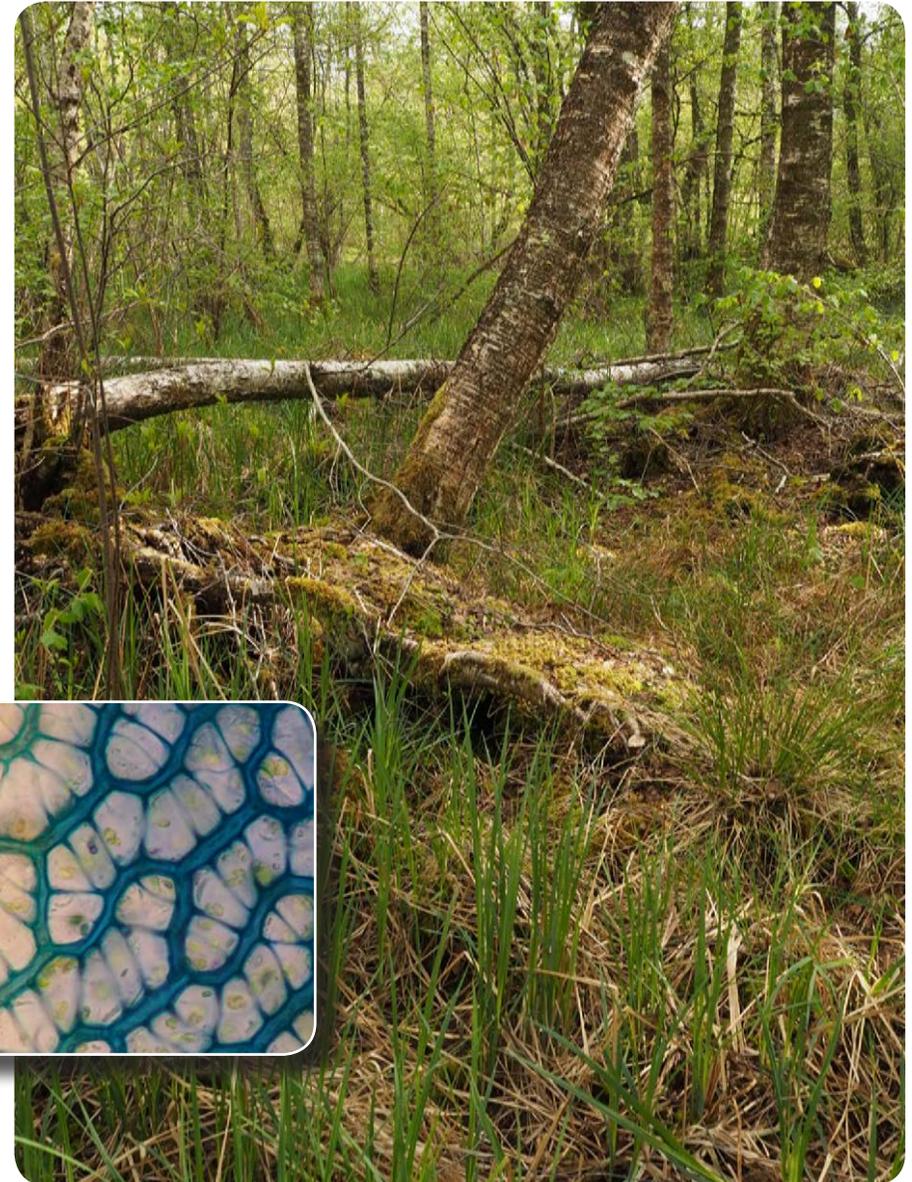
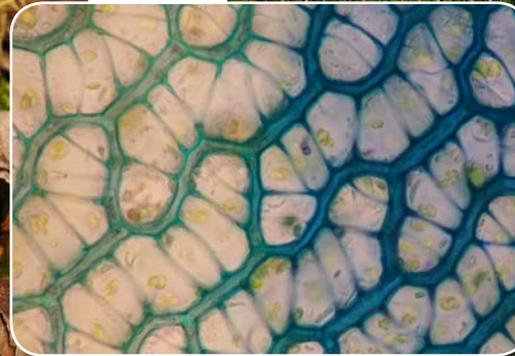


Figure XI-1-6: les sphaignes se maintiennent même après que le bouleau ait basculé, indiquant la faible contribution directe de l'eau du sol pour la vie de la mousse dépendant ici en grande partie de l'eau atmosphérique.

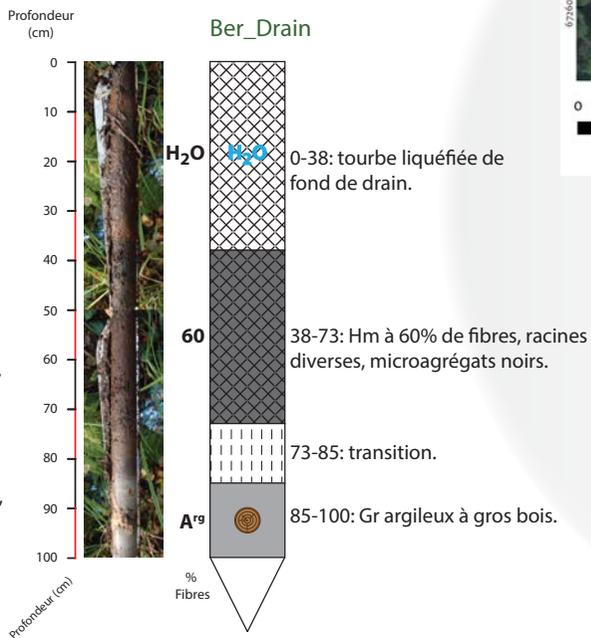
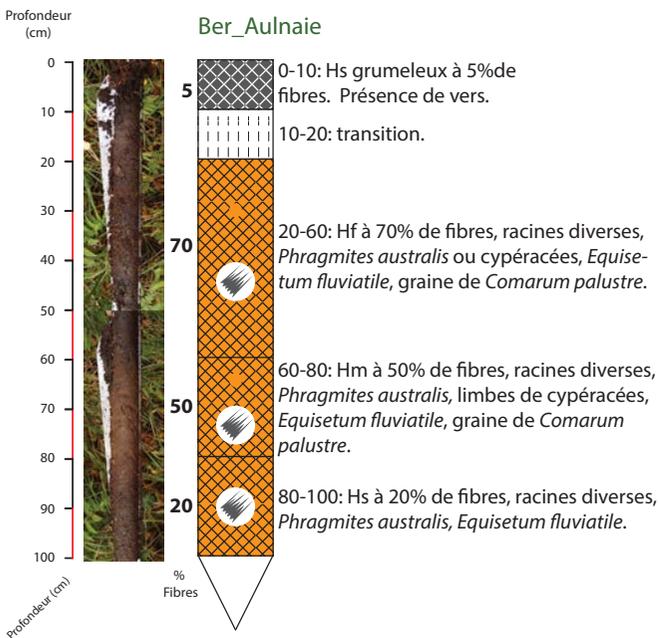
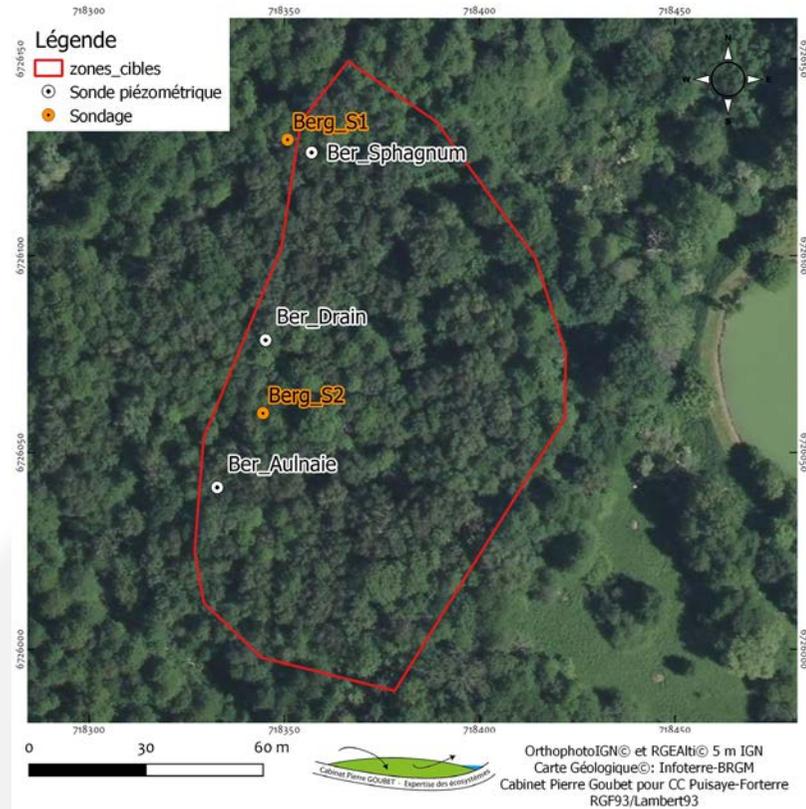
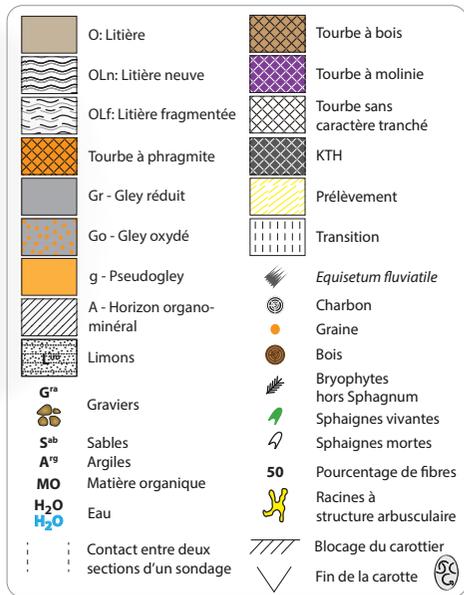
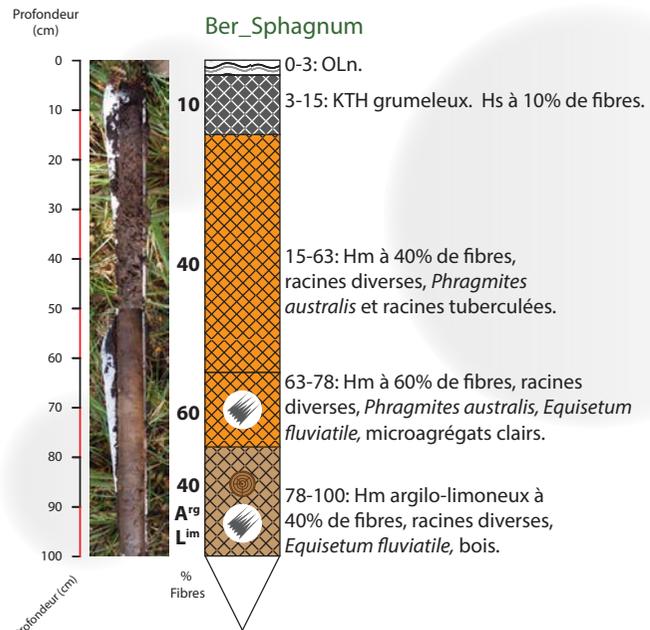


Figure XI-1-7: représentation schématique et localisation des sondages piézométriques du site des Bergeries sur fond orthophotographique IGN.

la boulaie et l'aulnaie, d'une part, et de caractériser le régime d'un des drains, d'autre part.

Pour l'aulnaie (Ber_Aulnaie) et la boulaie (Ber_Sphagnum), les chroniques annuelles (figure XI-1-8)

apparaissent proches en variation et en profondeur. Les valeurs pour l'aulnaie sont cependant souvent entre 10 et 15 cm plus basses que la boulaie, sauf lors de niveaux hauts ou de remontées importantes où l'écart se réduit jusqu'à s'annuler. La courbe du drain

(Ber_Drain) est en variation proche des deux autres, mais logiquement à des niveaux plus élevés, il s'agit en majorité d'une chronique limnimétrique. La différence majeure est la régularité du niveau de la courbe du drain au printemps, entre avril et juillet [1], alors que

les deux autres chroniques montrent des niveaux variables.

Les chroniques de novembre montrent la proximité des niveaux et des variations évoquées pour l'année (figure XI-1-9).

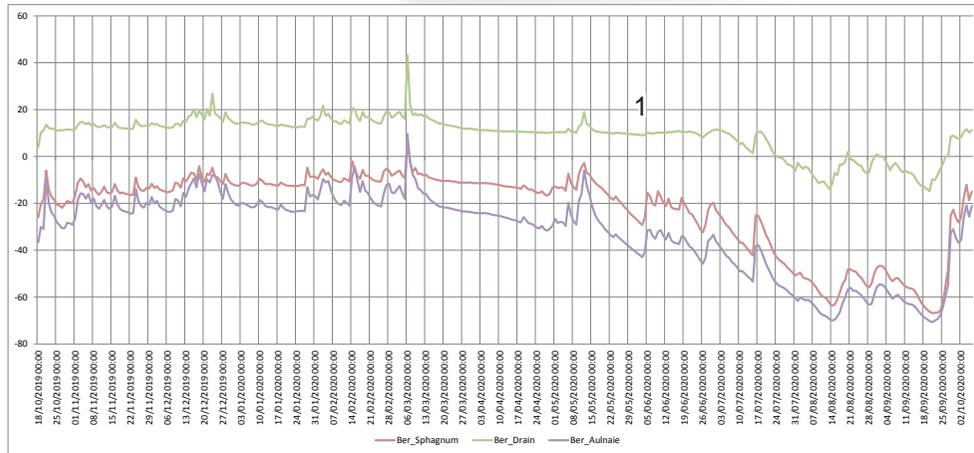


Figure XI-1-8: chroniques piézométriques quotidiennes annuelles des Bergeries du 18 octobre 2019 au 6 octobre 2020, exprimées en cm/sol.

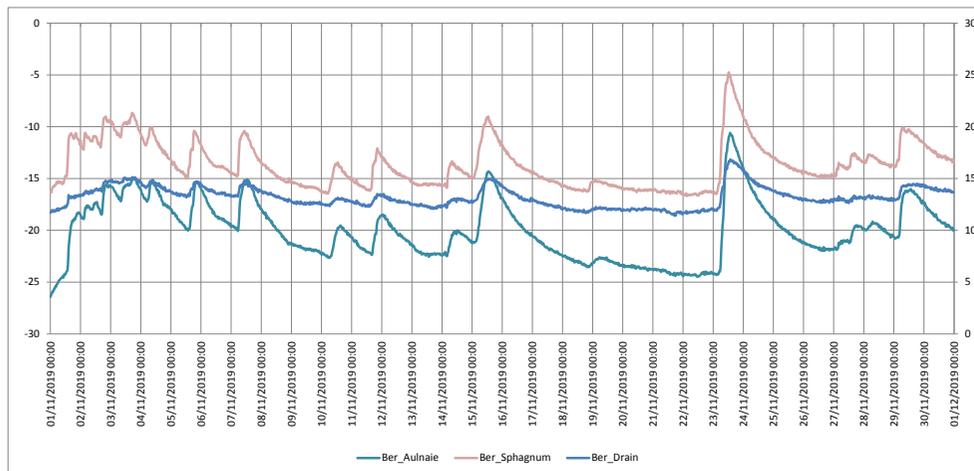


Figure XI-1-9: chroniques piézométriques de novembre 2019 exprimées en cm/sol. Échelle du drain à droite.

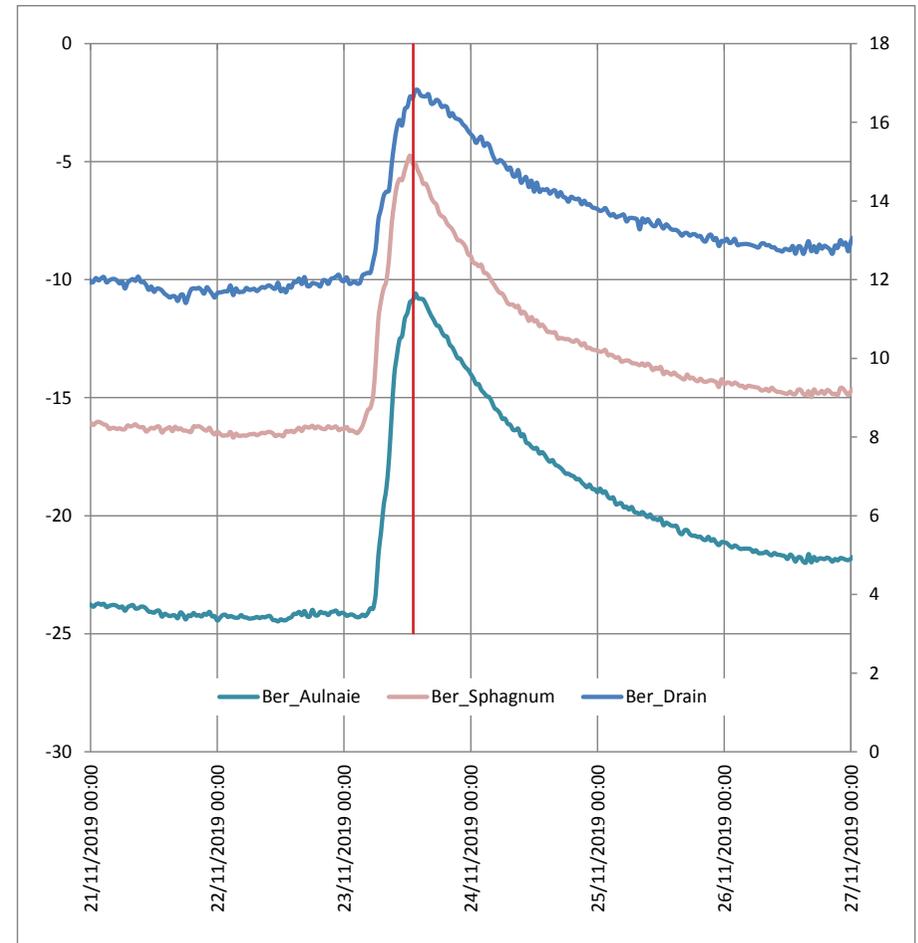


Figure XI-1-10: chroniques piézométriques bi-horaires du 21 au 26 novembre 2019 exprimées en cm/sol. Échelle du drain à droite.

Les chroniques apparaissent syn-chrones lors de la montée des niveaux relative à une précipitation (figure XI-1-10).

Les chroniques de décembre 2019

(figure XI-1-11) et de janvier 2020 (figure XI-1-12) montrent un décalage entre la pic de crue du drain et des deux autres lieux. Certains pics apparaissent même complètement déconnectés de 20-25 heures. Il est fort probable que

cela soit induit par une lame d'eau transitant d'un bord à l'autre, ou un débordement du Branlin. La comparaison des courbes du Branlin aux Bergeries et aux Comailles montrent une certaine coïncidence pour certains événements.

Les chroniques d'avril (figure XI-1-13) montrent les premiers effets de l'évapotranspiration, très faiblement sur le drain. Le trait est identique en mai (figure XI-1-14).

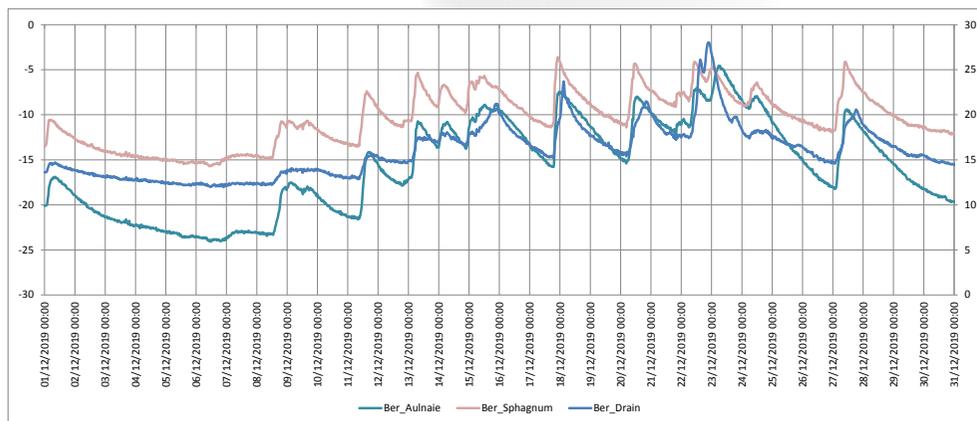


Figure XI-1-11: chroniques piézométriques bi-horaires de décembre 2019 exprimées en cm/sol. Échelle du drain à droite.

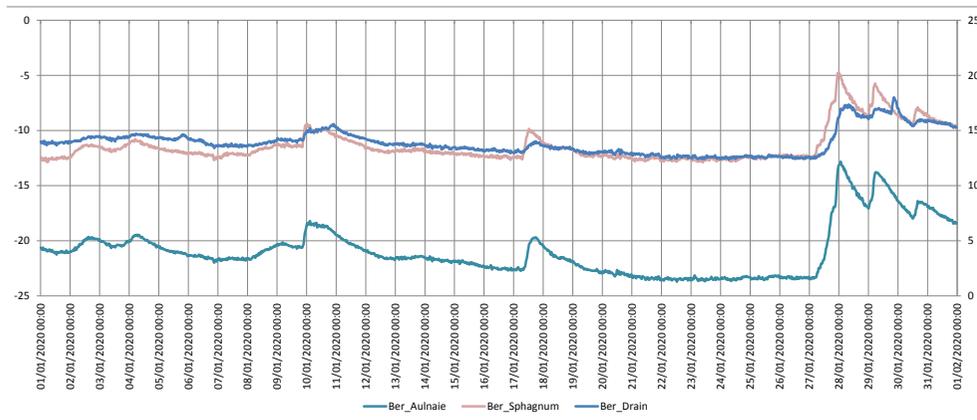


Figure XI-1-12: chroniques piézométriques bi-horaires de janvier 2020 exprimées en cm/sol. Échelle du drain à droite.

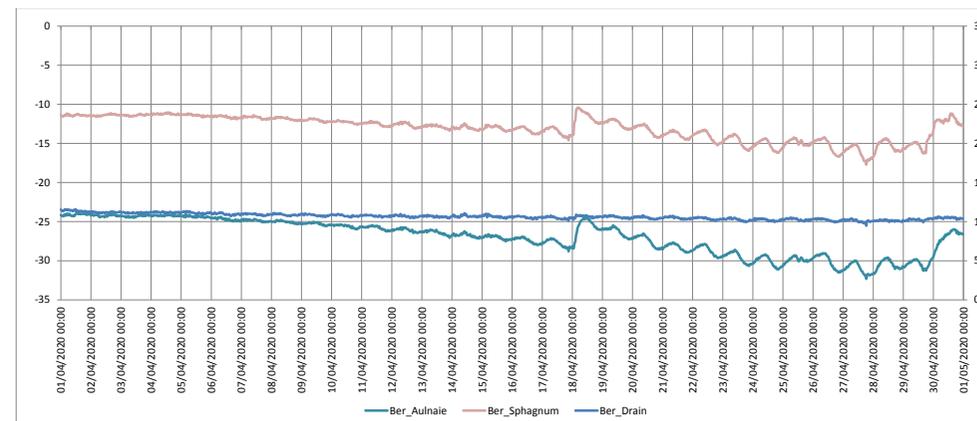


Figure XI-1-13: chroniques piézométriques bi-horaires d'avril 2020 exprimées en cm/sol. Échelle du drain à droite.

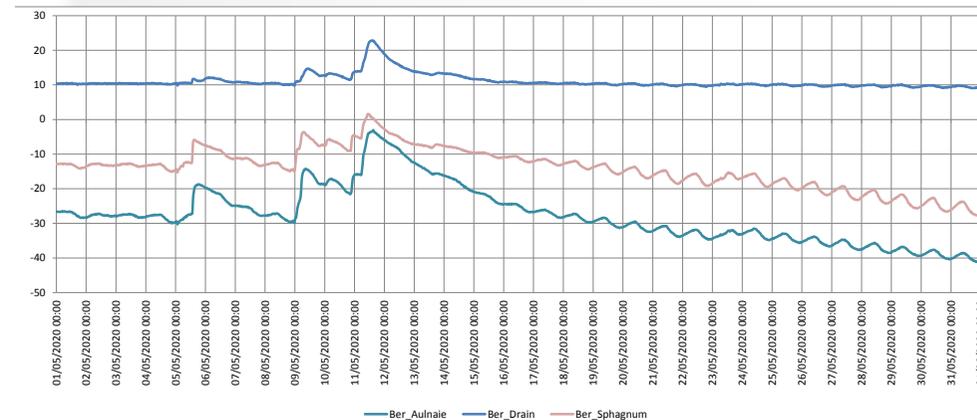


Figure XI-1-14: chroniques piézométriques bi-horaires de mai 2020 exprimées en cm/sol. Échelle du drain à droite.

L'évapotranspiration est encore marquée sur les chroniques de la boulaie et de l'aulnaie en juin (figure XI-1-15). Elle apparaît également sur la chronique du drain vers le 24, lorsque le niveau s'approche de +10 cm.

En juillet (figure XI-1-16), le niveau du drain passe sous +10 cm et

l'évapotranspiration devient parfaitement marquée. A l'opposé, elle s'atténue pour les deux autres courbes, avec sa quasi disparition à partir du 27 pour l'aulnaie. Le fait que l'évapotranspiration apparaisse sur la courbe du drain est certainement en lien avec le passage d'un régime inondé, limnimétrique, à un régime piézométrique. Le

fait que cela se réalise à +10 cm est probablement un artefact induit par la difficulté de mesurer le niveau zéro du sol dans un drain vaseux.

Les chroniques d'août figure (XI-1-17) et septembre 2020 figure (XI-1-18) montrent les mêmes traits. On observe cependant des effets ponctuels

de l'évapotranspiration sur la boulaie et parfois sur l'aulnaie, lorsque les niveaux croissent suite à des pluies. Il semble que la déconnexion des prélèvements des plantes se réalise vers la profondeur de 50 cm.

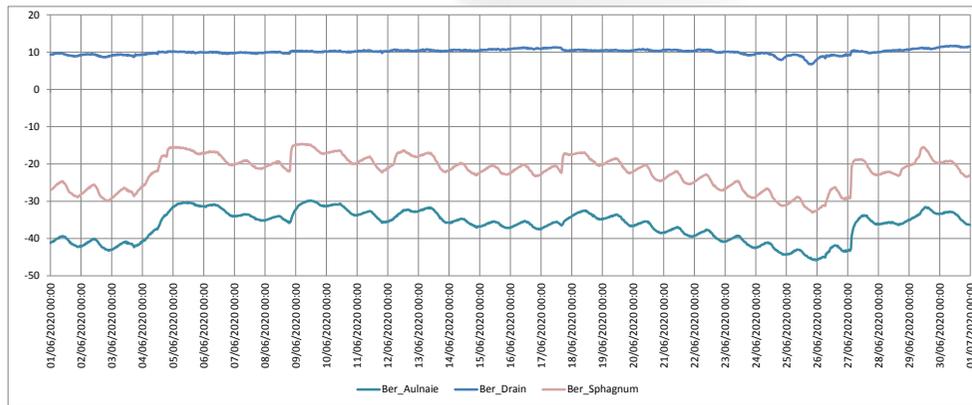


Figure XI-I-15: chroniques piézométriques bi-horaires de juin 2020 exprimées en cm/sol. Échelle du drain à droite.

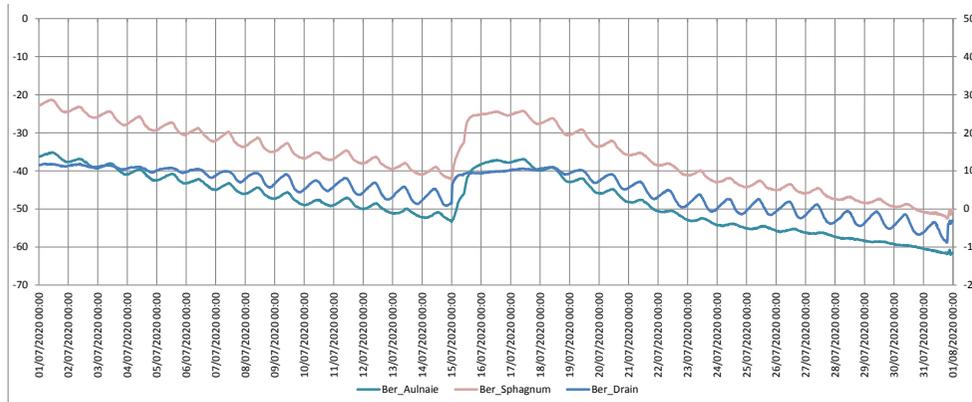


Figure XI-I-16: chroniques piézométriques bi-horaires de juillet 2020 exprimées en cm/sol. Échelle du drain à droite.

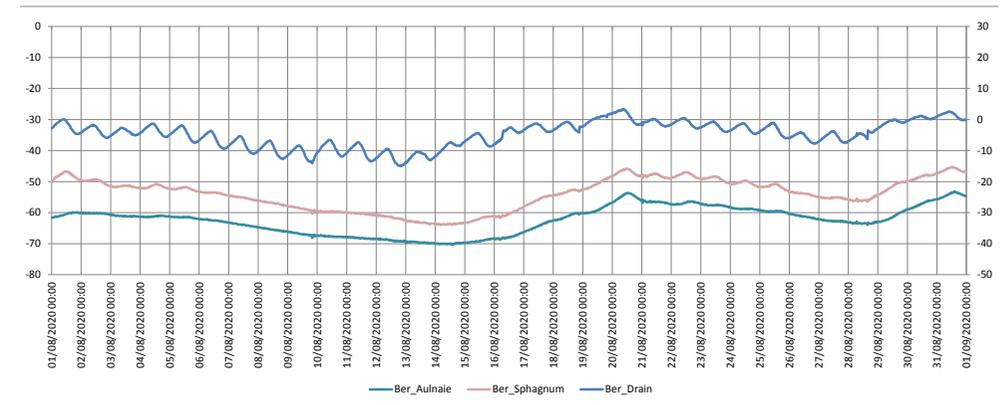


Figure XI-I-17: chroniques piézométriques bi-horaires d'août 2020 exprimées en cm/sol. Échelle du drain à droite.

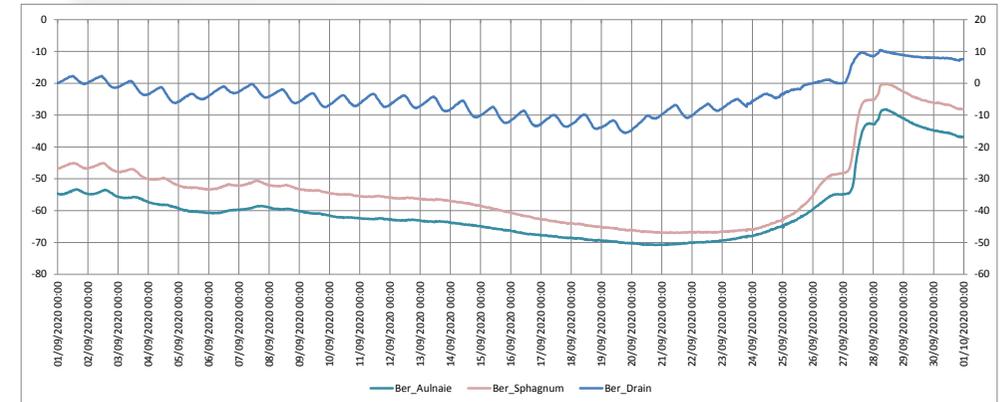


Figure XI-I-18: chroniques piézométriques bi-horaires de septembre 2020 exprimées en cm/sol. Échelle du drain à droite.

XI.1.E - Photographies aériennes anciennes

Les photographies aériennes

anciennes de 1949 (figure XI-1-19) et de 1964 (figure XI-1-20) mettent en évidence le passé pastoral du complexe et les modalités de boisement à partir

de noyaux de ligneux existants dès les années 1940 au moins.

La partie aujourd'hui riche en sphaignes est déjà arborée en 1949.

La partie aujourd'hui riche en

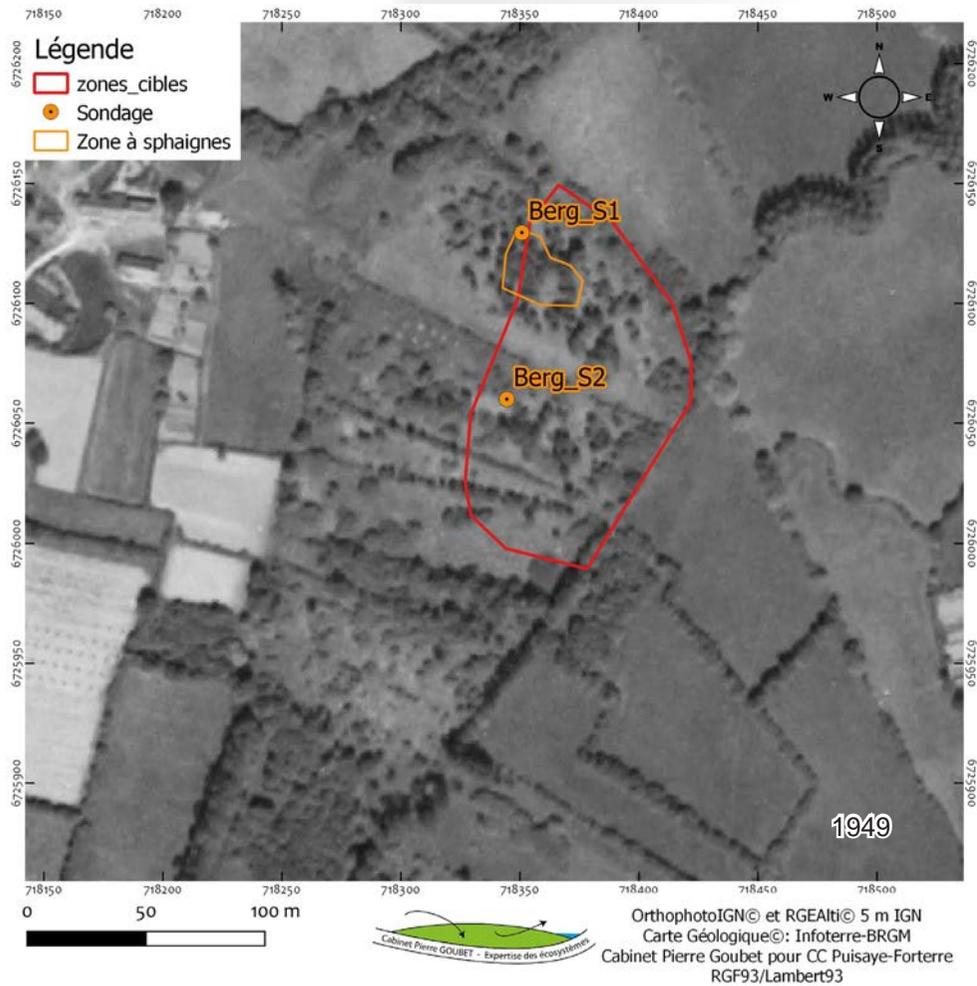


Figure XI-1-19: photographie aérienne de 1949 (source site Remonter le temps de l'IGN).

Figure XI-1-20: photographie aérienne de 1964 (source site Remonter le temps de l'IGN).

XI.2 - Interprétation fonctionnelle

Le complexe des Bergeries se tient sur les bords du Branlin, dans une zone de confluence avec l'Ingeron un petit ruisseau local. Les aménagements hydrauliques sont nombreux; ils cerclent le complexe et le tronçonnent transversalement, menant à former une sorte d'îlot rehaussé.

Le site est majoritairement occupé par des aulnaies, à l'exception de 600 m² de boulaie à sphaignes. Ces boisements sont assez anciens car ils sont présents dans la zone à sphaignes depuis les années 1940 au moins, comme l'atteste les photographies aériennes. Le contexte était cependant encore pastoral à l'époque, dans certaines parcelles au moins.

Les tourbes sont d'origine minérotrophe.

Les données piézométriques mettent en évidence l'existence d'une décharge hydrogéologique pérenne, même en été. Cependant, à l'emplacement des piézomètres, la profondeur de

la nappe semble limitée en été, au-delà de la profondeur d'enracinement des plantes, en dessous de 50 cm. A priori, cela ne gêne pas les sphaignes qui semblent plutôt se satisfaire de l'humidité atmosphérique pour assurer leur survie en été.

Le complexe est donc une tourbière d'émergence en phase post-pastorale, à kultureller Trockenhorizont, occupée aujourd'hui par des formations boisées oligotrophes (boulaies à sphaignes) et mésotrophes (aulnaies).

Il est possible que les drains du complexe soient périodiquement inondés par un débordement du Branlin. Cette influence du ruisseau est probablement à l'origine de l'eutrophisation d'une partie du site, au débouché de certains drains, occupé par des populations denses d'ortie et de gaillet grateron (figure XI-2-1). Ici, les apports particuliers ou dissous viennent enrichir le sol et permettent l'expression de communautés exigeantes en nutriments.



Figure XI-2-1: secteur du complexe des Bergeries à orties et gaillet probablement en lien avec des débordements du Branlin.

XI.3 - Propositions d'action

XI.3.A - Connaissance

Le fonctionnement du complexe des Bergeries apparaît relativement bien décrit. La nature de tourbière d'émergence en phase post-pastorale, à sol tourbeux dégradé, est clairement exprimée à travers les données acquises pour ce travail.

XI.3.B - Gestion

Il se pose la question d'une action de gestion visant à remonter la nappe à des niveaux accessibles aux plantes en été. Mais avant tout, c'est la celle des effets attendus d'une telle mesure qu'il faut traiter.

Cette question est d'ordre théorique car nous ne connaissons pas de cas pratiques qui peuvent servir d'exemple.

La plupart des plantes déjà présentes sont adaptées à l'engorgement permanent, il ne faut donc pas s'attendre à une substitution des communautés actuelles à travers ce processus, à l'exception de l'exclusion du frêne.

Les effets trophiques, qui sont les plus à-même d'induire des changements importants favorisant sphaignes et bouleaux, sont difficilement prédictibles. La remontée du niveau engendrerait au moins la capacité du système à éviter le débordement du Branlin, à travers un effet de chasse en sens opposé aux apports du ruisseau.

L'action qui semble la plus simple à réaliser pour remonter les niveaux d'eau est la neutralisation des écoulements au niveau des drains. Ceci-dit, les effets hydrauliques d'un bouchage des drains restent inconnus dans le contexte d'une tourbière d'émergence comme aux Bergeries. Là encore, c'est la théorie qui laisse présumer d'une remontée de la nappe, pas la mesure directe par expérimentation. Il n'est ainsi pas certain que le niveau de l'eau dans le sol soit d'abord conditionné par le niveau de charge de la nappe qui alimente l'émergence, niveau aujourd'hui plus bas qu'hier.

De plus, une action de bouchage des drains doit aussi s'évaluer du point de vue des apports trophiques qu'elle peut entraîner. Il faudrait donc

ici évaluer si l'eau qui transite entre la partie nord-ouest du complexe et le Branlin est de qualité satisfaisante pour potentiellement stagner dans le complexe sans l'enrichir du point de vue trophique.

Intervenir sur les drains du complexe des Bergeries est donc une action de gestion théoriquement envisageable, mais aux résultats imprévisibles. Il ne nous semble pas pertinent de la réaliser à ce stade de connaissance des tourbières d'émergence.

XI.3.C - Suivi

Le suivi minium est celui de la cartographie des sphaignes. Celle-ci correspond probablement aussi à la cartographie des unités écologiques, mais cela reste à vérifier. Peut-être que la caractérisation spatiale des zones sans aulnes, à bouleaux, aurait du sens dans le cadre d'un suivi, pour déterminer l'évolution du statut trophique du complexe.



Sphagnum palustre, «la» sphaigne des Bergeries.

XII. Synthèse fonctionnelle à l'échelle de la Puisaye



Ce travail d'écologie des écosystèmes a permis la caractérisation de traits fonctionnels majeurs pour 7 entités tourbeuses à bouleaux, tourbe et sphaignes, considérées comme d'intérêt communautaire prioritaire au titre de l'Habitat 91DO*-1.1 de la démarche européenne dite Natura 2000.

Ces Habitats s'intègrent dans des

logiques écosystémiques spécifiques qu'il est nécessaire de prendre en compte pour leur conservation.

Nous présenterons donc dans cette partie du document des éléments essentiels du fonctionnement des tourbières des types observés lors de l'étude, avant de proposer une synthèse globale.

XII.1 - Rappels généraux sur les milieux tourbeux et les boulaies en particulier

Le fonctionnement des écosystèmes répond à des logiques naturelles non aléatoires, organisées suivant des règles qui répondent fondamentalement à la physique, à la chimie et, par dérivées, aux autres sciences de la nature. Ces règles imposent de la cohérence fonctionnelle, mais celle-ci nous est rendu imperceptible par la complexité des processus et la diversité des éléments en jeu. Ce n'est qu'à travers une démarche rationnelle, scientifique, que les règles qui régissent le fonctionnement des tourbières peuvent nous apparaître. Cette démarche est pluridisciplinaire, faisant appel à des disciplines comme la botanique, la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie, la pédologie, la biogéochimie, etc., qui font l'objet d'une intégration à travers les outils de l'écologie des écosystèmes. Cet aspect multidisciplinaire est une nécessité scientifique, mais il ne rend

pas plus accessible la perception des modalités fonctionnelles, en dehors de quelques écologues spécialistes du sujet. Il peut même rendre plus difficile la compréhension du fonctionnement des tourbières en exigeant une culture scientifique élargie.

Pour simplifier cette complexité, il est pratique de considérer 4 principales logiques fonctionnelles qui agissent sur les espèces ingénieuses, des plantes, et qui sous-tendent la formation et le fonctionnement des tourbières.

Sans ordre précis, il s'agit (figure XII-1-1): (1) des processus liés aux écoulements; (2) des processus pédologiques; (3) des processus biogéochimiques portant en particulier sur l'azote, le phosphore, le calcium et le magnésium; (4) des processus induits par les usages, surtout le pastoralisme

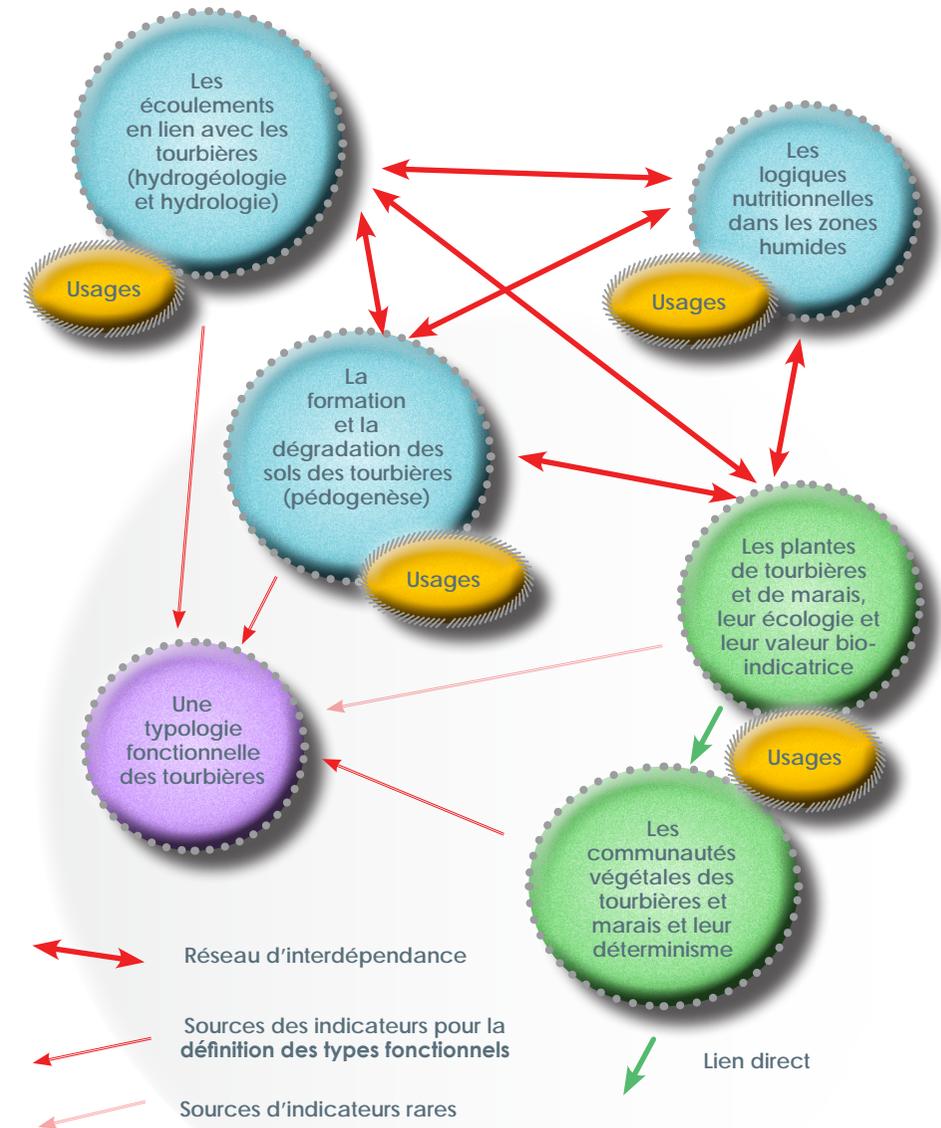


Figure XII-1-1: fondamentaux d'écologie des écosystèmes tourbeux. De la connaissance indispensable à la bonne gestion conservatoire.

pour ce qui est des sites de Puisaye, qui, en quelque sorte, se superposent aux trois logiques précédentes. L'ensemble de ces divers processus détermine la possibilité pour des plantes adaptées de s'installer, suivant leur niche écologique, et de former des communautés, suivant des processus tels que la compétition, la facilitation ou la coopération.

Nous présenterons donc ces processus clés suivant la séquence suivante: (1) les écoulements, (2) la formation et la dégradation de la tourbe (les pédogenèses) et (3) les logiques nutritionnelles. Il s'agit d'un ordre subjectif, puisque les trois groupes de processus se réalisent de manière concomitante et dépendante.

Les conséquences des usages humains sur les processus fondamentaux «naturels» ou originels peuvent être, dans très grande majorité des cas, considérées comme secondaires, dans un sens historique et fonctionnel, agissant sur des logiques naturelles. Par contre, ces contraintes ne sont pas secondaires dans le sens d'une importance moindre, car dans certains cas ce sont elles qui déterminent aujourd'hui

l'état et le fonctionnement d'une tourbière. Ces actions anthropiques entrent dans le champ global des paramètres écologiques et sont parfaitement intégrées dans l'analyse fonctionnelle; elles méritent d'être discutées à part, dans une quatrième partie.

XII.1.A - Logiques hydrologiques

Comprendre les grands principes qui régissent les mouvements d'eau est un prérequis à la conservation des tourbières.

L'eau répond à deux forces majeures: la pesanteur, lorsqu'elle se meut librement, et la pression quand elle est contrainte à se mouvoir dans un cadre confiné.

Le principe qui régit la circulation de l'eau est d'une part le propre poids de l'eau, comme tout corps régit par la pesanteur, mais aussi le poids de l'eau située au dessus d'une molécule d'eau, qui en quelque sorte pousse cette molécule, la «charge d'un poids», d'où le terme de charge hydraulique.

Les écoulements de surface sont

régis par les logiques simples de gradient topographique, l'eau s'écoule d'un point haut vers un point bas, ce fait est intuitif et parfaitement perçu par chacun; il ne fait pas intervenir le concept de charge hydraulique. Mais dans les nappes, cela n'est pas le cas. Le fait que l'eau circule dans un espace contraint fait intervenir de manière plus significative la notion de charge hydraulique. Il arrive même fréquemment que les roches soient structurées de façon à ce que l'eau ne puisse librement circuler, elle devient captive de son encaissant et subit une pression qui rend la notion de charge hydraulique indispensable à manipuler. La charge, la pression, devient prépondérante et les déplacements deviennent possibles dans n'importe quelle direction, éventuellement d'un point bas vers un point haut. C'est cette pression qui permet la distribution de l'eau de ville à partir d'un château d'eau ou la répartition des niveaux dans deux vases communiquant. La circulation de l'eau dans les roches, guidée par la pression, devient donc contre-intuitive.

La pression se transmet à une vitesse proche de celle du son, autant dire instantanément. Il faut donc

considérer que lorsqu'une lame d'eau issue d'une précipitation vient s'ajouter à une nappe, elle applique une pression quasi immédiate à l'émergence. Dans certains contextes, cela pourrait laisser croire que le délai entre une pluie et une remontée de l'eau dans le sol à l'émergence correspond au temps de transport de l'eau de pluie entre la zone d'infiltration et la source. En réalité, le délai correspond au temps nécessaire à la lame d'eau de transiter dans la zone non saturée du sol, entre la surface et le toit de la nappe. Cela est d'importance quand on doit traiter de problèmes de pollution ou comprendre le contenu en éléments dissous des eaux d'émergence, par exemple.

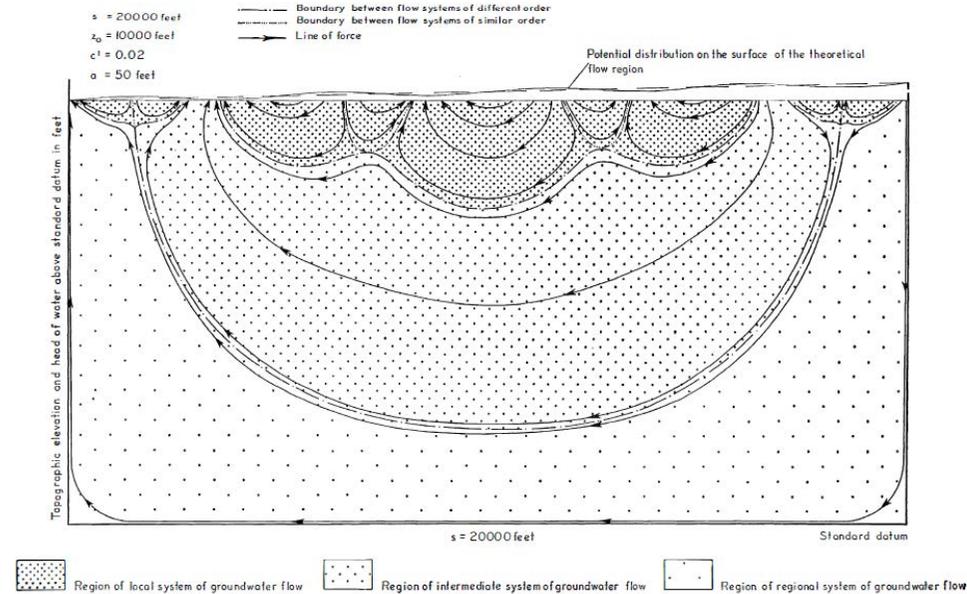
La charge hydraulique et la capacité de l'eau à s'écouler de bas en haut qui en découle sont fondamentales, car elles permettent l'existence d'un type très répandu de tourbières: les tourbières d'émergence, communes en Puisaye.

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 (figure XII-1-2). Ce modèle a été proposé par Tóth en 1963. 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 (Goubet, 2015).

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 XII-1-3). L'absence du compartiment diffusif entraîne en général l'existence d'émergences concentrées, et l'absence de tourbière.

Le système est analogue à un réservoir, situé en hauteur, qui est connecté à une céramique poreuse située plus bas par un tuyau. 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

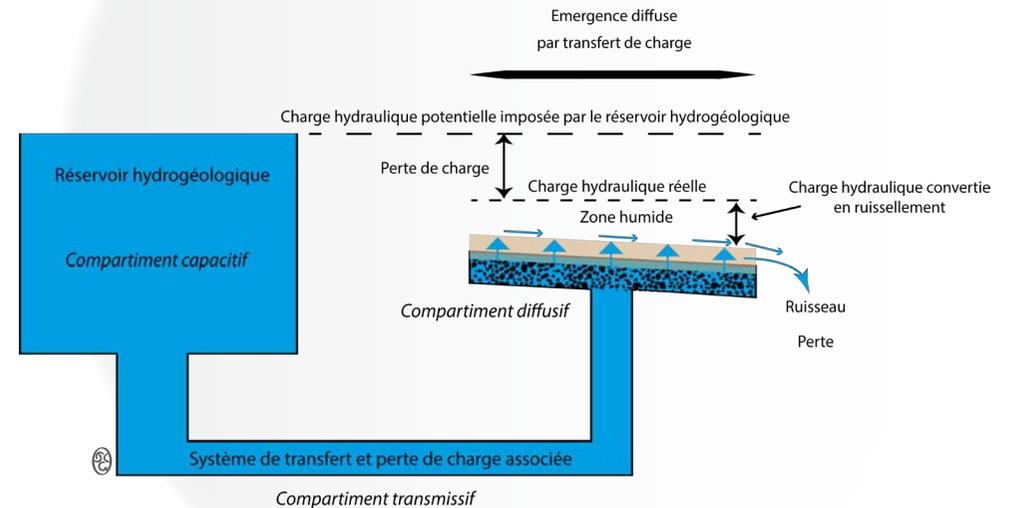


Figure XII-1-2: circulations des eaux souterraines montrant l'importance des flux ascendants dans l'alimentation des émergences (Tóth, 1963).

Figure XII-1-3: schéma explicatif du modèle d'émergence diffuse par transfert de charge. Échelles non respectées.

piézométriques mettent en évidence un gradient de charge hydraulique (figure XII-1-4). 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 XII-1-5). 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 hydrique 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.

La photographie issue de Google

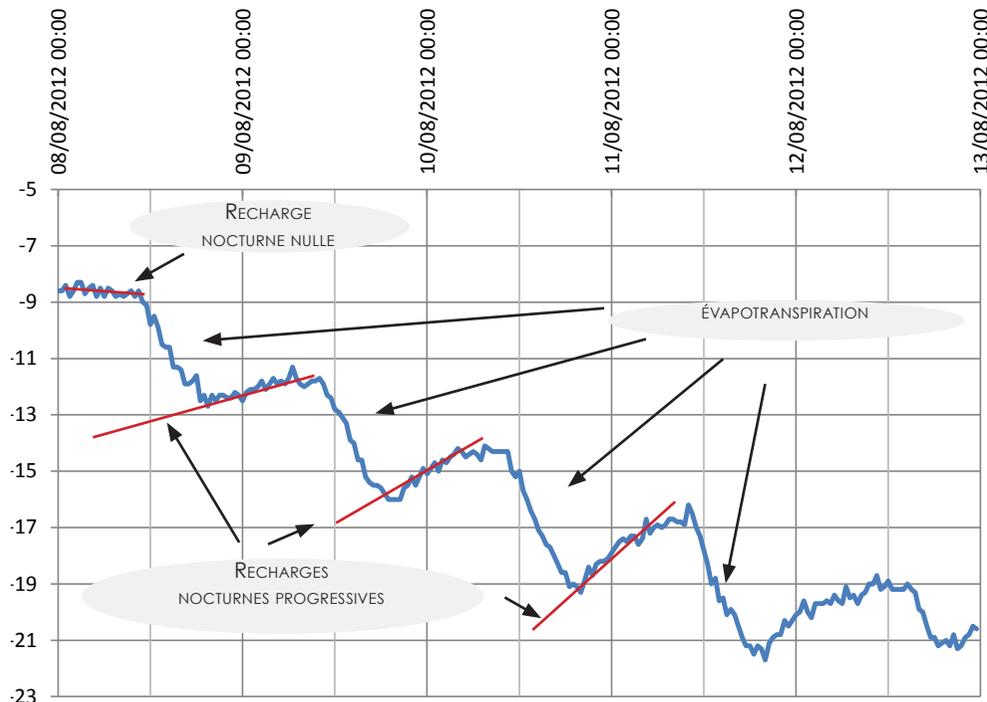


Figure XII-1-4: chroniques piézométriques montrant un gradient de charge ascendante (Goubet, 2013).

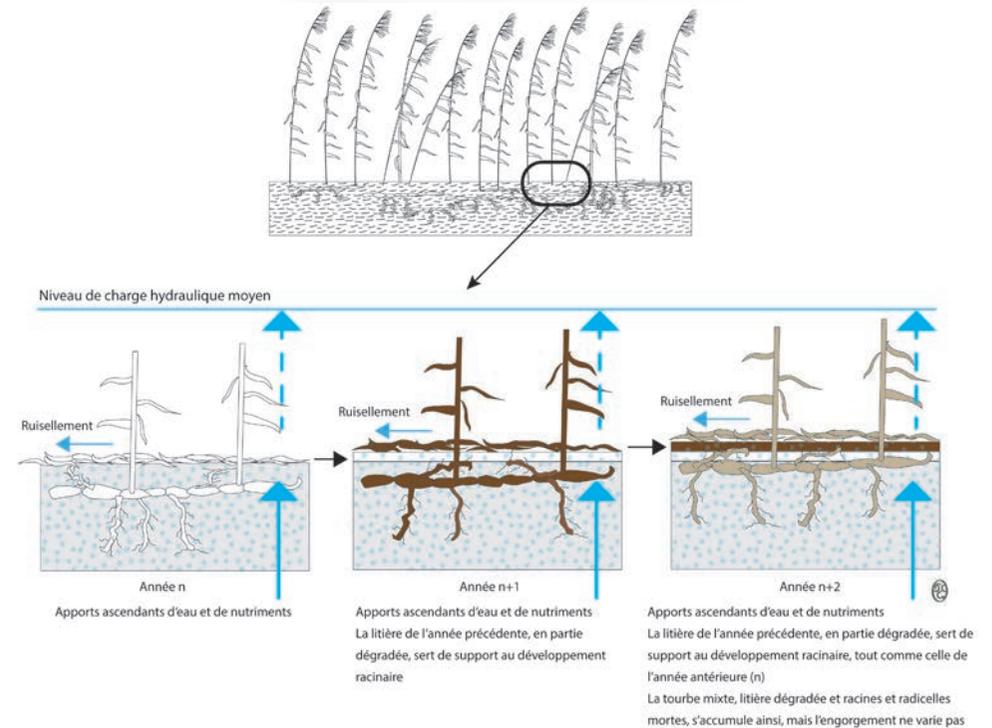


Figure XII-1-5: modèle de croissance d'un terre tourbeux à phragmite.

Earth présentée en figure XII-1-6 met en évidence la structure typique d'un secteur d'émergence avec des points d'émergence concentré à l'amont de zones d'émergence diffuse et des écoulements concentrés à l'aval des émergences. Le contexte est volcanique, mais les mêmes structures se rencontrent dans des contextes sédimentaires comme en Puisaye. Par exemple, les systèmes à point de

concentration et terre diffusif sont présents à Chassin et Guédelon sud. Aux Comailles, le terre diffusif est particulièrement grand et les points d'émergence concentrée sont présents plutôt à l'aval du terre, un peu au-dessus du lit du Branlin. La couverture végétale arborée des sites de Puisaye ne permet pas d'observer de manière évidente la structure des émergences.

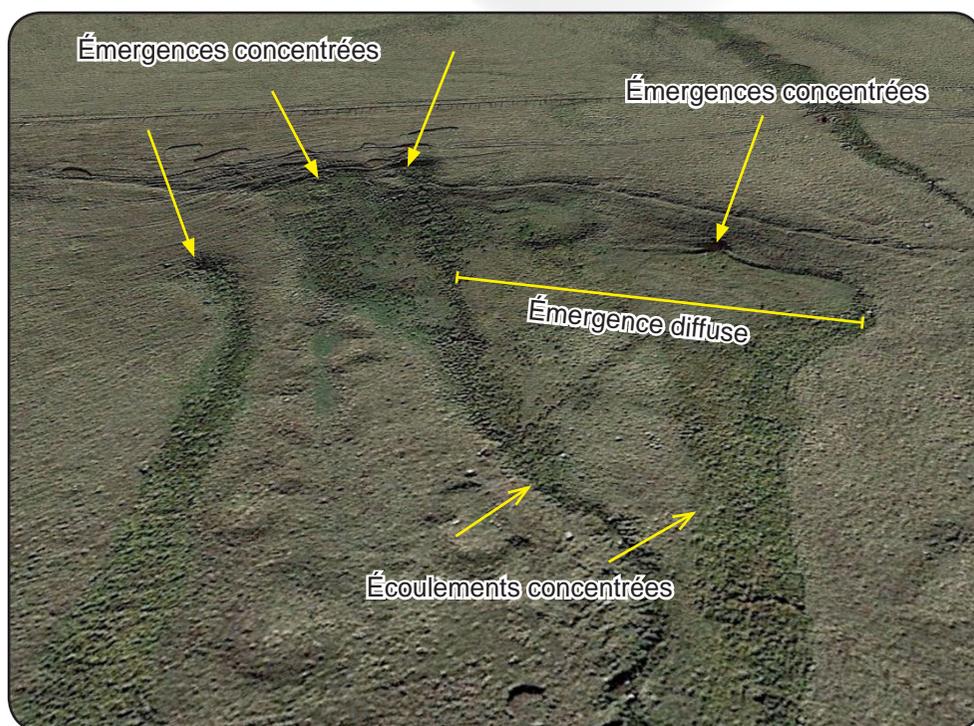


Figure XII-1-6: exemple de système d'émergence d'intercolée basaltique avec ses émergences concentrées de l'amont, le terre de diffusion (à droite seulement) et les écoulements concentrés à l'aval. L'émergence de gauche montre la structure en l'absence de formation diffuse. La largeur de la photo couvre 150 m.

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

XII.1.B - La pédogenèse des tourbes de Puisaye

La tourbière est définie par la production de tourbe, ce processus est donc logiquement fondamental dans le fonctionnement des écosystèmes tourbeux et en particulier dans ceux qui ne sont pas sujets aux usages anthropiques. Mais pour les autres, les modalités d'altération du sol vont jouer un rôle tout aussi fondamental, souvent négligé, voire «oublié» des ouvrages sur les tourbières.

Lorsqu'on s'intéresse à la conservation des tourbières, il faut donc tout aussi bien s'intéresser à la formation de la tourbe qu'à sa dégradation. Nous n'aborderons pas ici dans le détail ces deux notions dites de pédogenèse, de formation du sol, mais exposerons quelques notions essentielles.

La tourbe est définie comme un «matériau formé par l'accumulation en conditions hydromorphes anoxiques, de matière organique plus ou moins décomposée» (Gobat *et al.*, 2003). Cette approche décrivant le processus de formation de la tourbe se complète d'autres définitions basées sur la composition et la structure, comme celle de Joostens et Clarke (2002) qui proposent que la tourbe est un matériau de dépôt autochtone qui contient au moins 30% de matière organique morte en poids sec.

La nature tourbeuse d'un dépôt est, dans la plupart des cas, simple à définir, même sur le terrain. Cependant, il existe des situations délicates, lorsque la tourbe est peu épaisse, en bordure de complexe, ou pour des dépôts organiques de surface comme les litières épaisses de bois humide.

La production de tourbe se conçoit comme la conservation, pour le temps long, d'une partie de la biomasse produite par les plantes et, en moindre quantité, de quelques autres types d'organismes comme des arthropodes et des champignons. La capacité de conservation de la matière organique est principalement liée à la saturation en eau du substrat, en lien avec le régime piézométrique, et à la nature biochimique des matières végétales des espèces turfifères, en particulier les sphaignes.

Les auteurs s'accordent pour différencier un compartiment de production, biologiquement actif, une sorte de sol, et un compartiment de «stockage», peu actif du point de vue biologique, qui est la «vraie» tourbe, que l'on peut considérer comme un support pour le sol «vivant». Par exemple, dans les tourbières ombrotrophes, le compartiment actif est nommé l'acrotelme et l'autre le catotelme.

Ce modèle bi-couche est une simplification pratique de la réalité, mais

il doit être considéré avec prudence. D'abord, la matière organique «fraîche» n'est pas exclusivement produite dans le compartiment «actif», mais aussi directement dans la tourbe à travers les racines des plantes vasculaires et surtout les graminoides (graminées, cypéracées). Ensuite, les processus d'altération des sols tourbeux comme le pâturage ne permettent pas l'expression d'une structure acrotelme-catotelme. L'utilisation de ce modèle est donc difficile en France, où de nombreuses tourbières ont fait l'objet de pâturage ou d'extraction.

Les sols tourbeux se forment suivant trois modalités principales: (1) à travers la croissance des sphaignes dans les tourbières ombrotrophes; (2) sur et dans l'eau des lacs et des mares; (3) sous forme de litière dans des secteurs d'émergence de nappes souterraines.

En Puisaye, c'est le processus d'émergence qui domine la turfigenèse, avec quelques possibles éléments ombrotrophes secondaires aux Pâtures Pourries et aux Comailles.

Dans les tourbières ombrotrophes, la tourbe est constituée d'un mélange de sphaignes, de racines d'éricacées, canneberges (*Vaccinium* gr.

oxyccocos), andromède (*Andromeda polifolia*), callune (*Calluna vulgaris*), et de racines de graminoides, principalement la linaigrette engainante (*Eriophorum vaginatum*).

Dans les tourbes de France, la plus commune des sphaignes est la sphaigne «intermédiaire» (*Sphagnum medium* et *S. divinum*), autrefois regroupée dans une seule espèce dite de Magellan (*S. magellanicum*), nom que nous continuerons à utiliser dans le document. *Sphagnum rubellum*, *S. capillifolium* ou *S. angustifolium* participent parfois à la turfigenèse, souvent en accompagnant la première.

La construction de la tourbe dans les tourbières ombrotrophes se réalise par la simple croissance verticale des sphaignes et de la linaigrette engainante, les autres espèces accompagnent le processus, mais n'en sont pas à l'origine. Sphaignes et linaigrette sont dites espèces ingénieuses. La structure des tourbes montrent que la stabilisation de la matière organique est souvent rapide: les sphaignes sont quasi complètes, sans altération. Ce sont les plantes fraîchement mortes, intègres, et même en partie vivantes qui forment ainsi la tourbe.

Dans ce mode de formation

ombrotrophe, «l'épaississement» de la tourbière ne modifie pas l'engorgement: le niveau d'eau accompagne l'élévation car ce type de tourbe montre une forte capacité de rétention, la vitesse d'écoulement de l'eau est «plus faible» que la fréquence des pluies. Il suffit donc que les précipitations soient suffisamment régulières pour limiter la baisse de niveau à quelques centimètres en profondeur. De plus, le microrelief peut s'auto-organiser pour générer des dépressions qui stockent l'eau libre, créant ainsi une ambiance humide peu propice à l'évapotranspiration. D'ailleurs, l'analyse des chroniques piézométriques des tourbières ombrotrophes turfigènes à sphaignes met en évidence l'absence d'effet de l'évapotranspiration sur les niveaux d'eau. Il est peu probable que la turfigenèse ombrotrophe soit réalisée en Puisaye. Nous pensons plutôt que les communautés proches observées aux Pâtures Pourries et aux Comailles ne sont que des unités opportunistes qui profitent de l'oligotrophie du lieu, induite par le pastoralisme passé. La nature «profonde» des tourbières y étant minérotrophe, induite par des émergences.

Ce dernier mode commun de formation de tourbe est celui qui se réalise sous forme d'une boucle de rétroaction présentée précédemment qui

commence par le dépôt d'une litière constituant le substrat d'une végétation à fort renouvellement de biomasse annuelle comme le roseau (*Phragmites australis*) ou des carex (*Carex rostrata*, *C. echinata*, *C. canescens*). Cette litière est rapidement envahie par les systèmes racinaires des plantes citées, qui en retour renouvellent la litière les années suivantes, et ainsi de suite. L'accumulation de tourbe est permise là où de l'eau peut s'élever à travers le sol, là où un transfert de charge hydraulique se réalise au niveau d'émergences de nappes hydrogéologiques.

En Puisaye, les tourbes montrent parfaitement les caractéristiques des tourbes d'émergence avec des éléments typiques comme le roseau (*Phragmites australis*), les carex (*Carex echinata*, *C. canescens*, *C. paniculata*; *C. rostrata*), des ligneux comme les bouleaux et les saules (*Betula* sp.; *Salix* sp.), des sphaignes vertes (*Sphagnum palustre*, *S. flexuosum*) des joncs (*Juncus* sp.), indiquant l'application d'un pastoralisme compatible avec la turfigenèse. La présence régulière de racines à structure arbusculaire indiquent une alimentation en eau irrégulière, probablement en lien avec une hauteur variable des nappes qui alimentent les émergences.

Sur la base de l'existence de cette turfigenèse de litière, la notion de «décomposition» de la tourbe est à manipuler avec prudence. Il est toujours difficile de déterminer la part de la décomposition de la matière organique avant qu'elle ne devienne tourbe, de la décomposition de la tourbe constituée. Dans le cas de ces tourbières d'émergence, cela est particulièrement flagrant, la tourbe semble décomposée, certains diraient «évoluée», mais en fait, l'évolution de la tourbe est nulle, la matière est parfaitement bien conservée dès qu'elle intègre la tourbe. Il s'agit d'une litière «fossilisée». De ce fait, les parties racinaires qui perforent cette tourbe sont le plus souvent parfaitement bien conservées, et à peine plus jeunes que la litière qui en forme la matrice.

La turfigenèse est un processus pédologique fondateur en tourbière, mais il est loin d'être le seul à jouer un rôle majeur: la dégradation «pédologique» de la tourbe constituée en est un autre.

Il faut imaginer que dans certaines conditions, la turfigenèse n'est plus réalisée et la tourbe devient un matériau originel qui subit une pédogenèse classique, comme toute roche mise à l'air. Ici, les modifications structurales sont rapides en rapport avec la fragilité du matériau. Par exemple, en tourbière ombrotrophe, un piétinement même peu intense suffit à éliminer les plantes

turfigènes et à compacter la tourbe en surface. Ceci provoque des modifications des propriétés hydro-physiques irréversibles (par exemple l'effondrement des macropores).

La fragilité de la tourbe par rapport au piétinement, combinée aux décennies, voire aux siècles de pâturage réalisé en tourbière, ont mené à la création d'un horizon de surface spécifique nommé kultureller Trockenhorizont (KTH) (traduction littérale: horizon sec d'origine «culturelle»).

La notion de KTH est récente (Sjögren *et al.*, 2007), mais elle s'avère d'une grande pertinence, car les KTH sont fréquents en France et d'importance majeure pour l'étude et la conservation des tourbières de tous types. Le KTH est un horizon de surface ou de subsurface généralement sombre, dense (par compaction de la matière organique et enrichissement en argile), riche en particules minérales, souvent aussi en charbons. Lors des sondages au carottier russe, la présence d'un KTH est la plupart du temps mise en évidence par la difficulté de pénétration d'un des horizons présents, difficulté qui disparaît dès le KTH dépassé.

L'épaisseur du KTH varie entre 5-10 cm et 40-50 cm. Le passage entre le KTH et les termes inférieurs des sondages est progressif, impossible à matérialiser de manière précise. C'est une

des caractéristiques diagnostiques de cet horizon.

Les KTH sont présents sur de nombreuses tourbières de France, il s'agit d'une règle générale et non d'une exception, même si certains secteurs sont relativement épargnés (Haut-Forez, Bois-Noirs).

En France, souvent, le KTH se rencontre en surface, entre les buttes à sphaignes ou à pleurocarpes, il se poursuit latéralement sous ces buttes. Dans certaines tourbières, exceptionnelles, le KTH se rencontre à des profondeurs plus importantes (c'est le cas aux Comailles). Localement, on trouve aussi des zones à KTH double, où deux horizons densifiés, sombres, à passage inférieur progressif se superposent, séparés par une tourbe fibrique, peu dense et plus claire.

L'origine du KTH est une perturbation des couches superficielles de tourbe par un piétinement suffisamment long et intense pour compacter la tourbe, la dégrader en partie. La perturbation est supposée induite le plus souvent par un usage agropastoral.

Le KTH isole la partie inférieure de la tourbe de la surface au point de parfois permettre à des communautés acides oligotrophes de croître sur des tourbes alcalines (Goubet, 2011a; 2011b).

Bien-évidemment, le modèle pédologique à KTH n'est pas compatible avec celui d'acrotelme-catotelme souvent évoqué et issu d'études dans des contextes non pastoraux ou du moins très favorables à la turfigenèse avec un impact limité du pastoralisme quand il a eu lieu. On parle d'un modèle «nordique» qui ne s'applique que rarement aux tourbières de France.

Bien-sûr, la Puisaye n'échappe pas à la règle générale et la plupart des sols tourbeux observés montrent des KTH.

Ils sont rencontrés en surface, comme aux Bergeries, sous une couche de sphaignes fraîches, comme à Chassin, ou sous une couche de tourbe constituée comme aux Comailles. Dans l'absolu, on peut y voir un gradient en lien avec l'âge de l'abandon pastoral ou la nature fonctionnelle du processus d'émergence. Les données piézométriques nous indiquent plutôt que c'est la première hypothèse qui est valable en Puisaye.

XII.1.C - Etats et transferts nutritionnels dans les tourbières de Puisaye

Les naturalistes ont depuis longtemps classé les végétations de tourbière en fonction de la richesse en bases (calcium, magnésium), d'une part, et en fonction de la disponibilité en

azote ou en phosphore, d'autre part.

Spécificité des zones humides, la richesse en nutriments s'organise suivant deux gradients distincts qu'il est impératif de dissocier: celui de l'alcalinité et celui de la trophie stricte. Les végétations vont se répartir sur un système de gradient complexe, allant de deux pôles pauvres en nutriments distincts, l'un alcalin, l'autre acide, vers un pôle riche en nutriments, neutre.

La disponibilité en phosphore joue un rôle majeur parmi les processus de cette structuration. Dans la sphère basique, le phosphore est capté par des carbonates de calcium précipités et, dans la sphère acide, il est rendu indisponible par un ensemble de combinaison avec le fer, le soufre et l'aluminium. Il s'agit d'un régime alternatif dont le seuil se situe vers un pH de 5,5 ; les communautés des pôles pauvres en éléments trophiques s'établissent donc dans un milieu soit franchement acide, soit franchement alcalin, les intermédiaires étant rares, mais de grande valeur patrimoniale.

L'eau, dans cette logique d'organisation des communautés, joue un rôle déterminant car c'est elle qui constitue le facteur majeur de diffusion des éléments minéraux et trophiques. Ce sont donc les écoulements, au final, à travers leur charge ionique, qui structurent les écosystèmes de zone humide. La spécificité des tourbières est, qu'en

fonction de la production de tourbe et du changement de topographie induit, les écoulements sont modifiés.

Le rôle fonctionnel de l'eau en tourbière doit donc être appréhendé dans un jeu d'interactions permanent avec le sol et les plantes, bien au-delà du simple concept d'engorgement et des processus d'oxydo-réduction qui lui sont associés. Cependant, si l'eau joue un rôle majeur, c'est bien la charge nutritionnelle qui est la clé de voûte fonctionnelle des tourbières, et elle doit être considérée dans toute démarche conservatoire.

Pour la Puisaye, les logiques nutritionnelles jouent un rôle majeur en dissociant des systèmes relativement oligotrophes, d'émergence, turfigènes, et des systèmes mésotrophes à eutrophes, sujets aux apports issus de concentration des eaux de surface. Les premiers correspondent aux boulaies tourbeuses à sphaignes, les seconds aux aulnaies. La contribution des apports de surface n'a pas un caractère permanent, quelques périodes d'apports annuels suffisent, comme les données piézométriques le mettent en évidence. Ces données mettent aussi en évidence l'existence de processus d'émergence dans les aulnaies, avec des niveaux de nappe souvent plus bas que pour les boulaies, en conjonction avec des tourbes moins épaisses quand elles existent.

XII.1.D - Le rôle des usages

Les tourbières de Puisaye étudiées ne présentent pas d'usage actuel; elles apparaissent en libre évolution.

Les témoins d'usages passés sont bien présents, à travers des drains comme aux Carrières ou au Bergeries, l'usage pastoral déduit des photographies aériennes anciennes ou des sols, aux Bergeries, aux Pâtures Pourries.

Il semble que les systèmes fonctionnent aujourd'hui en s'affranchissant de ces héritages, avec un contrôle principalement réalisé par les logiques hydrologiques d'émergence. C'est donc en particulier à travers les usages de l'eau et des flux nutritionnels au sein des bassins hydro(géo)logiques que les grandes lignes de la conservation des Habitats doivent être définies, une fois acquis le principe de base de la non intervention directe, garante de l'absence de toute perturbation.

XII.2 - Origine et état des complexes

L'origine des complexes tourbeux découle de processus d'émergence, d'apports de nappe, celle des Sables de la Puisaye pour tous les complexes étudiés à l'exception des Bergeries.

La nature sableuse, acide, des Sables de la Puisaye permet l'expression des boulaies à sphaignes, carex, molinie, aussi bien dans le passé que dans l'actuel. Les eaux les moins pauvres en nutriments permettent l'expression du roseau et de la laîche paniculée là où l'eau se concentre en ruisselets ou dans des drains.

Le pastoralisme marque les tourbes, avec la présence de restes de joncs, de molinie, lorsque l'intensité du piétinement n'arrête pas la turfigenèse, et à travers les kultureller Trockenhorizonts

quand il devient intense, probablement aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles, voire une partie du XIX^{ème}.

Ces systèmes d'émergence sont turfigènes, grâce à l'existence d'une charge hydraulique ascendante qui permet la réalisation d'un tertre tourbeux saturé en permanence ou presque, d'une eau suffisamment pourvue en nutriments pour permettre aux ligneux de croître, mais trop faiblement pour permettre un recyclage effectif de la litière, même sous conditions d'engorgement.

Il faut ainsi imaginer un volume de turfigenèse potentielle délimité par la géométrie du toit d'une nappe théorique, représenté par une charge hydraulique. Ce volume de turfigenèse potentielle varie de manière complexe

dans l'espace, en fonction du relief, de la perméabilité des roches ou des formations superficielles; et dans le temps, suivant l'altitude du niveau des nappes hydrogéologiques qui contrôlent les émergences, celles qui imposent la charge hydraulique. Sur le terrain, la variation de la charge dans l'espace est matérialisée par la forme du terre tourbeux existant ou le niveau piézométrique mesuré. La variation dans le temps du niveau de charge hydraulique est indiquée par la présence de racines à structure arbusculaire ou la géométrie du terre tourbeux actuel comparée à la répartition des communautés turfigènes, du moins celle des communautés qui témoignent d'un engorgement. Autrement dit, pour cette dernière assertion, la structure tri-dimensionnelle de la tourbe indique le niveau de charge hydraulique minimum qui a été réalisé jusqu'à aujourd'hui. De plus, la caractérisation des processus actuels, comparée à la géométrie de la tourbe, met en évidence un éventuel décalage sous la forme d'une possible «rétraction» de la capacité turfigène.

Cette rétraction a été mise en évidence à Chassin, avec la présence d'une boulaie «sèche» sur tourbe témoignant d'une zone autrefois humide et turfigène.

Cependant, il faut rappeler que la charge hydraulique a varié dans le temps et qu'il n'est pas possible de définir si la rétraction de Chassin est pérenne ou conjoncturelle.

Pour les autres complexes, le processus d'émergence a été parfaitement validé par la piézométrie, ce qui confère un état hydrologique favorable, en adéquation avec l'état fonctionnel, intégrant donc les processus floristiques et pédologiques, qui lui aussi apparait favorable.

Les exceptions sont localisées à des parties de complexe cartographiées sur les Comailles (boulaie à ronces), les Bergeries et les Pâtures Pourries. Pour les Bergeries, l'altitude de la charge hydraulique est basse comparée au sol, les sphaignes semblent indépendantes de la nappe et l'oligotrophie résiduelle, pastorale. Pour les Pâtures Pourries, la dynamique est logiquement celle d'une colonisation ligneuse post-pastorale menant à la boulaie à sphaignes sur tourbe si les conditions hydrologiques sont favorables à cet Habitat (le suivi des niveaux d'eau dans le sol n'a pas pu être réalisé sur ce site).

La figure XII-2-1 présente de manière synthétique la logique fonctionnelle générale des tourbières étudiées.

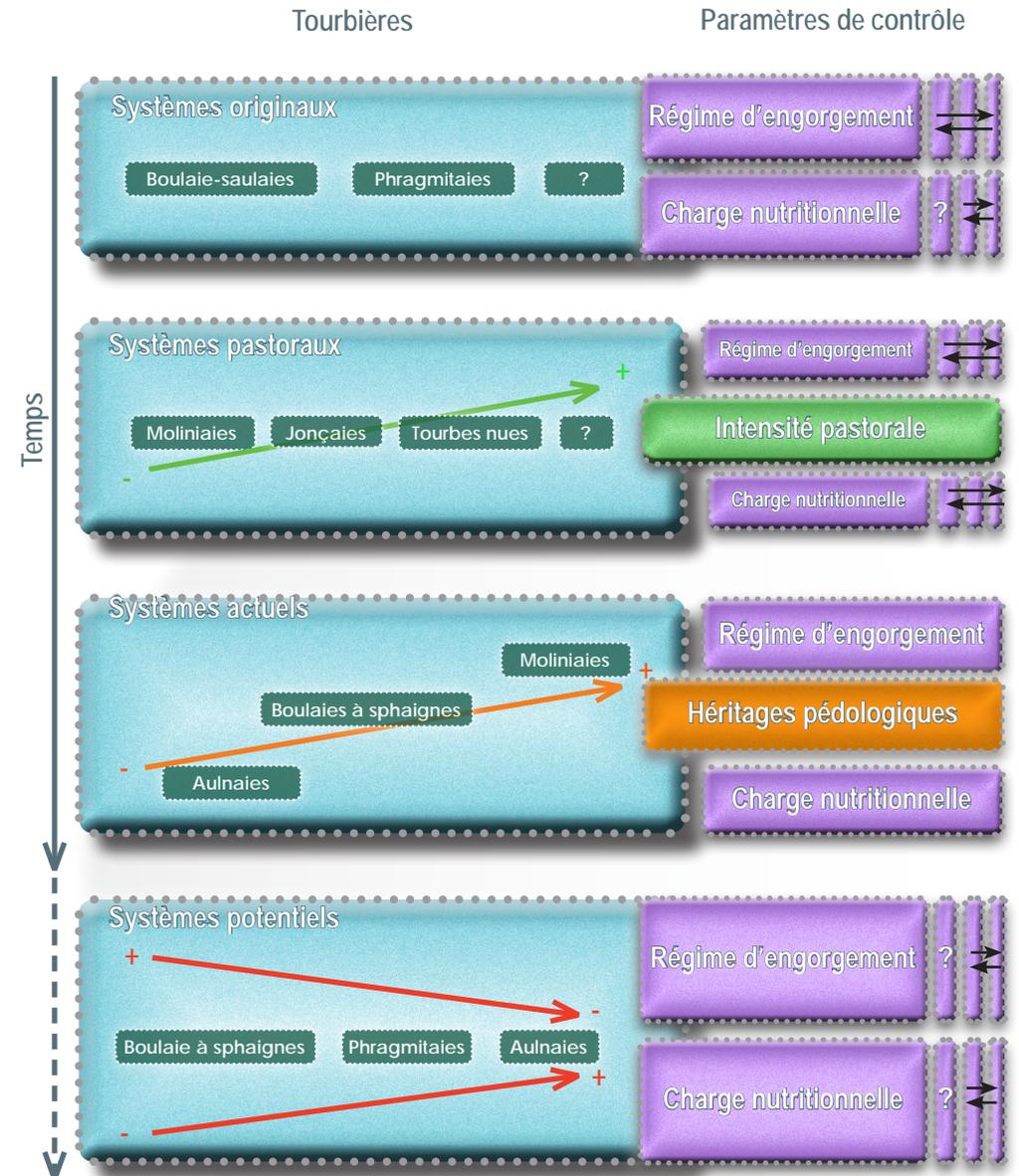


Figure XII-2-1 : schéma récapitulatif de l'origine de l'état actuel et des états potentiels des tourbières à bouleaux de Puisaye en rapport avec les principaux paramètres écologiques qui les contrôlent.

XII.3 - Etats futurs potentiels

La dynamique des Habitats de boulaie est conditionnée par la capacité d'alimentation de la nappe (régime d'engorgement), et par le contenu en nutriments de l'eau de cette nappe. Il faut donc suffisamment d'eau, et de l'eau de qualité.

A régime d'engorgement constant et à qualité de l'eau constante, les systèmes d'émergence ont capacité à se maintenir sur le long terme (plusieurs milliers d'années si on se réfère à des sites connus comme celui des Co-mailles).

Si la capacité des émergences à engorger les sols baissait, un phénomène de rétraction des Habitats est à prévoir, sans que cela ne puisse être compensé par une action de gestion directe.

Si l'eau venait à s'enrichir en nutriments, les sphaignes disparaîtraient probablement, remplacées par des mousses comme *Calliergonella cuspidata*, *Climacium dendroides*; la ronce deviendrait plus couvrante, la laîche des marais (*Carex acutiformis*) aussi; et l'aulne occuperait une place plus importante, évinçant possiblement le bouleau.

Si les deux processus se cumulaient, la dynamique serait la même, mais largement accélérée, avec la mise en place d'une probable aulnaie à ronce, unité à déterminisme nutritionnel (cf. encart ci-contre).

La plupart des complexes se situent dans des contextes apparaissant stables du point de vue des apports en eau, une fois exclus de la problématique climatique et les constructions de stations de pompage toujours possibles.

L'état futur des différents complexes est donc leur état actuel. Les deux exceptions à ce schéma sont les Pâtures Pourries, en dynamique post-pastorale, qui s'orientent vers la boulaie à sphaignes sur tourbe, et les Bergeries, dont la boulaie à sphaignes pourrait s'enrichir du point de vue trophique et permettre l'installation de l'aulnaie qui occupe déjà la plus grande partie du site. Dans ce complexe, le niveau de charge hydraulique semble faible et l'oligotrophie issue du pastoralisme ne résistera pas à l'amélioration de la litière réalisée par les bouleaux et les aulnes.

Ronces et aulnaies

Les «ronces» (*Rubus* sp.) constituent un groupe diversifié dont il paraît hasardeux de proposer une écologie globale. Cependant, si on exclut le framboisier (*Rubus idaeus*) et quelques autres espèces à la fois morphologiquement et écologiquement assez bien caractérisées, il est difficile de raisonner d'un point de vue taxonomique précis sur des éléments d'écologie fonctionnelle. Par exemple, même si une espèce ou un groupe d'espèces étaient identifiés comme représentatifs des populations sur un complexe donné, il apparaît illusoire de s'attacher à une analyse bibliographique portant sur cette espèce ou sur ce groupe précis, tant les publications sont rares et peu détaillées du point de vue taxonomique. Il est donc encore pratique, et à vrai dire seulement possible, de considérer les ronces du groupe *Rubus fruticosus* aggr. comme un grand groupe à l'écologie «principale» unique.

gardant à l'esprit cette réserve, pour la problématique spécifique de la présence des «ronces» en tourbière, il semble que les paramètres écologiques qui contrôlent la capacité de ces plantes à croître en masse sont la charge en azote et la lumière (Balandier *et al.*, 2013; Walter *et al.*, 2016; Guillian *et al.*, 2016).

Leur présence en aulnaie est possiblement liée à l'existence d'une bonne disponibilité en azote induite par la capacité de l'aulne à s'associer avec des bactéries du genre *Frankia* sp. qui peuvent capter l'azote atmosphérique pour le rendre disponible aux plantes. L'association entre l'arbre et la bactérie permet à l'aulne de prospérer dans des contextes peu approvisionnés en azote, mais cette capacité est limitée par le phosphore. La présence de l'aulne indique donc surtout une disponibilité satisfaisante du phosphore, le plus souvent par un effet d'apports (et non d'une mise en disponibilité autochtone). Cependant, la capacité des bactéries à proliférer est limitée par l'acidité et l'engorgement (Mäkinen, 2018).

Il existe donc des relations écologiques complexes dans le domaine trophique entre les bactéries, l'aulne et les «ronces» qui donnent à ces organismes un fort potentiel bio-indicateur des processus de flux et de stocks nutritionnels. Ces phénomènes étant associés à l'engorgement et l'acidité, leur compréhension offre encore plus de perspectives en termes de modèles fonctionnels et capacité à gérer ou restaurer les aulnaies et leurs unités connexes telles que les boulaies à sphaignes.

Cependant, à cause de leur abord difficile et de la nécessaire prise en compte de nombreux facteurs locaux et du contexte général, la typologie structurale (floristique et pédoécologique) des aulnaies est encore peu établie, ce qui rend encore plus difficile l'établissement d'une typologie fonctionnelle.

XIII. Synthèse des propositions d'action



Sites	Éléments fonctionnels		Propositions d'action		
	Types	Etats de conservation ⁽¹⁾	Connaissance	Gestion	Suivi
L'étang de Guédelon	Boulaie d'émergence de versant, à sphaignes, sur tourbe (91DO*).	Favorable	-	Pas de gestion directe mais étude d'incidence pour tout projet de pompage sur l'impluvium (peu probable au vu de la configuration).	Recouvrement des sphaignes et du polytric (5-10 ans).
Les Carrières	Aulnaie à ronces, d'altération d'émergence?	-	-	-	-
Chassin	Boulaie d'émergence de versant, à sphaignes, sur tourbe (91DO*).	Favorable	Possible analyse complémentaire de la variation de charge hydraulique au cours du temps, nécessitant la disponibilité d'une description topographique fine (lidar). Analyse de l'effet de l'étang de Chassin sur le complexe lors d'une vidange de la pièce d'eau.	Pas de gestion directe mais étude d'incidence pour tout projet de pompage sur l'impluvium (peu probable au vu de la configuration).	Recouvrement des sphaignes et du polytric (5-10 ans).
Guédelon sud	Boulaie d'émergence de versant, à sphaignes, sur tourbe (91DO*).	Favorable	-	Pas de gestion directe mais étude d'incidence pour tout projet de pompage sur l'impluvium et de conversion prairie/culture.	Recouvrement des sphaignes et du polytric (5-10 ans).
Les Pâtures Pourries	Tourbière ombrotrophe post-pastorale, en probable phase de colonisation ligneuse. Boulaie d'émergence, post-pastorale, à sphaignes, sur tourbe (91DO*).	Favorable?	Caractérisation des régimes d'engorgement des sols pour une validation fonctionnelle (prioritaire).	Pas de proposition de gestion possible avant validation hydrologique.	Cartographie des unités écologiques (5 ans)
Les Comailles	Boulaie d'émergence de bas de versant, à sphaignes, à phragmites, sur tourbe (91DO*).	Optimum	Caractérisation topographique fine (lidar), puis analyse hydrologique complémentaire pour une meilleure définition des logiques d'écoulement, la caractérisation de la zone de dépendance fonctionnelle et la délimitation de l'impluvium.	Pas de gestion directe mais étude d'incidence pour tout projet de pompage sur l'impluvium et de conversion prairie/culture. A réévaluer en fonction de la meilleure connaissance du complexe issue d'une analyse prenant en compte la topographie fine.	Cartographie des unités écologiques (5 ans). Réalisation de profils de structure et de suivi sur 150 m au minimum.
Les Bergeries	Boulaie d'émergence de fond de vallon, post-pastorale, à sphaignes, sur tourbe (91DO*).		-	-	Recouvrement des sphaignes et du polytric (5-10 ans).

Tableau XIII-1: synthèse de l'état et des actions à réaliser sur l'ensemble des entités étudiées.

(1) L'évaluation de l'état de conservation des Habitats est proposée sur une base experte s'appuyant sur l'écart entre l'état actuel et l'état des paramètres de contrôle, essentiellement le niveau de charge hydraulique et la charge trophique attendue des eaux de nappe.

XIV. **R**ésumé-Conclusion



La Puisaye, définie par son substrat géologique de sables et d'argiles, héberge, au sein du site Natura 2000 «Milieux humides et habitats à Chauves-souris de Puisaye-Forterre» (FR2601011) des communautés de tourbière d'intérêt communautaire prioritaire de type «Boulaies pubescentes tourbeuses de plaine», codées 91 DO*-1.1.

Pour mieux conserver ces Habitats, la Communauté de communes Puisaye-Forterre a commandé un diagnostic fonctionnel avec une forte composante hydrologique. Les données acquises lors de ce travail ont trait à la structure des sols et des complexes tourbeux, à l'engorgement des sols et au niveau d'eau dans les ruisseaux, à la paléoécologie à travers la nature des tourbes et autres sédiments. Les caractéristiques géologiques et le relief ont aussi été pris en compte.

L'analyse de ces données mène à la conclusion que les boulaies de Puisaye résultent de processus d'émergence de la nappe des Sables de la Puisaye à son contact avec les Argiles de Myennes sous-jacentes. Bien que de type comparable, le site des Bergeries fait exception à ce modèle car il se situe sur d'autres formations géologiques.

Les complexes des Pâtures Pourries et des Bergeries résultent d'un abandon pastoral relativement récent et leur dynamique n'est pas encore stabilisée, contrairement aux autres complexes. Le maintien d'Habitats de boulaie dans ces contextes n'est pas garanti, pour des raisons propres aux paramètres écologiques locaux, incertains pour les Bergeries, et inconnus pour les Pâtures Pourries qui n'ont pas pu faire l'objet d'une caractérisation hydrologique.

Pour les autres sites, les Habitats de boulaies tourbeuses, à sphaignes, résultent d'un processus d'émergence de nappe et dépendent ainsi de l'effectivité de l'apport en eau et de la charge nutritionnelle de l'eau, le tout dans un contexte non pastoral, boisé.

Les données montrent que la plupart des sites sont dans un état favorable, voire optimal pour le complexe des Comailles, en lien avec la nature forestière ou pastorale des impluviums et des nappes qui ne sont pas exploitées.

Les modalités fonctionnelles des boulaies tourbeuses d'émergence correspondent à une logique dénuée d'intervention humaine, rendant peu pertinente les actions de gestion directes.

La conservation de Habitats s'appuie donc d'abord sur de la prévention, avec l'absence de toute intervention directe (coupe, modification du relief, etc.) et un suivi des projets de pompage dans les impluviums ou de la mise en place de pratiques agricoles basées sur des apports nutritionnels importants (lisier, engrais minéraux, amendements, etc.).

Outre un suivi des projets hydrauliques et des pratiques agricoles dans les impluviums, les Habitats de boulaies pubescente et les écosystèmes qui les hébergent méritent de faire l'objet d'un suivi concernant la couverture des sphaignes et du polytric commun, pour la plupart des sites, de cartographies des unités écologiques pour les complexes des Pâtures Pourries et des Comailles, et d'un suivi fin par profil de structure et de suivi pour le site exceptionnel des Comailles.

Ce complexe tourbeux apparaît comme le plus important en surface et en épaisseur de tourbe. Il est aussi dans un état apparemment optimal. Il peut être considéré comme un exemple typique de tourbière d'émergence de longue continuité écologique (7000 ans), ayant probablement subi un pastoralisme perturbant, mais démontrant aussi une forte résilience.



XV. Bibliographie



Allard, P. (2018). Acquisition and Circulation of Flint Materials in the Linear Pottery Culture of the Seine Basin. Between History and Archaeology. Papers in honour of Jacek Lech, 165-172.

Balandier, P., Marquier, A., Casella, E., Kiewitt, A., Coll, L., Wehrlen, L., & Harmer, R. (2013). Architecture, cover and light interception by bramble (*Rubus fruticosus*): a common understorey weed in temperate forests. *Forestry*, 86(1), 39-46. <https://doi.org/10.1093/forestry/cps066>

Bostyn, F., Ilett M., & Meunier, K. Tendances évolutives de l'organisation des habitats au Néolithique ancien (Rubané/B-VSG) dans le bassin de la Seine. Habitations et habitat du Néolithique à l'âge du Bronze en France et ses marges. Actes des II e rencontres Nord-Sud de Préhistoire récente, Dijon, 19-21 novembre 2015.

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

Gilliam, F. S., Welch, N. T., Phillips, A. H., Billmyer, J. H., Peterjohn, W. T., Fowler, Z. K., ... & Adams, M. B. (2016). Twenty-five-year response of the herbaceous layer of a temperate hardwood forest to elevated nitrogen deposition. *Ecosphere*, 7(4), e01250.

Gobat, J. M., Aragno, M., & Matthey, W. (2003). *Le sol vivant*, 2e édition revue et complétée. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 319 p.

Goubet P. (2011a). Compte rendu d'expertise commandée par le Conservatoire Régionale d'Espaces Naturels Rhône-Alpes. Caractérisation paléoécologique du complexe tourbeux de La Bérroude (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.

Goubet P. (2015) - Compte rendu d'expertise commandée par le Parc naturel régional Scarpe-Escaut. Diagnostic fonctionnel du complexe tourbeux de la Réserve naturelle régionale de la Tourbière de Vred (Nord). Phase 2. Cabinet Pierre Goubet, Ardes, 71 p.

Josten, H., & Clarke, D. (2002). Wise use of mires and peatlands: Background and principles including a framework for decision making. International Mire Conservation Group. *International Peat Society*, Jyväskylä, 304, 304.

Mäkinen, A. (2018). Vegetation and ecology of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) dominated swamps and mesic forest sites in Finland. *Suo*, 69(2/3), 47-132.

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(5), 1-14.

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

Walter, C. A., Raiff, D. T., Burnham, M. B., Gilliam, F. S., Adams, M. B., & Peterjohn, W. T. (2016). Nitrogen fertilization interacts with light to increase *Rubus* spp. cover in a temperate forest. *Plant Ecology*, 217(4), 421-430.

Pour résumer...

La Puisaye, définie par son substrat géologique de sables et d'argiles, héberge, au sein du site Natura 2000 «Milieux humides et habitats à Chauves-souris de Puisaye-Forterre» (FR2601011) des communautés de tourbière d'intérêt communautaire prioritaire de type «Boulaies pubescentes tourbeuses de plaine», codées 91 DO*-1.1.

Pour mieux conserver ces Habitats, la Communauté de communes Puisaye-Forterre a commandé un diagnostic fonctionnel avec une forte composante hydrologique. Les données acquises lors de ce travail ont trait à la structure des sols et des complexes tourbeux, à l'engorgement des sols et au niveau d'eau dans les ruisseaux, à la paléoécologie à travers la nature des tourbes et autres sédiments. Les caractéristiques géologiques et le relief ont aussi été pris en compte.

L'analyse de ces données mène à la conclusion que les boulaies de Puisaye résultent de processus d'émergence de la nappe des Sables de la Puisaye à son contact avec les Argiles de Myennes sous-jacentes. Bien que de type comparable, le site des Bergeries fait exception à ce modèle car il se situe sur d'autres formations géologiques.

Les complexes des Pâtures Pourries et des Bergeries résultent d'un abandon pastoral relativement récent et leur dynamique n'est pas encore stabilisée, contrairement aux autres complexes. Le maintien d'Habitats de boulaie dans ces contextes n'est pas garanti, pour des raisons propres aux paramètres écologiques locaux, incertains pour les Bergeries, et inconnus pour les Pâtures Pourries qui n'ont pas pu faire l'objet d'une caractérisation hydrologique.

Pour les autres sites, les Habitats de boulaies tourbeuses, à sphaignes, résultent d'un processus d'émergence de nappe et dépendent ainsi de l'effectivité de l'apport en eau et de la charge nutritionnelle de l'eau, le tout dans un contexte non pastoral, boisé.

Les données montrent que la plupart des sites sont dans un état favorable, voire optimal pour le complexe des Comailles, en lien avec la nature forestière ou pastorale des impluviums et des nappes qui ne sont pas exploitées.

Les modalités fonctionnelles des boulaies tourbeuses d'émergence correspondent à une logique dénuée d'intervention humaine, rendant peu pertinente les actions de gestion directes. La conservation de Habitats s'appuie donc d'abord sur de la prévention, avec l'absence de toute intervention directe (coupe, modification du relief, etc.) et un suivi des projets de pompage dans les impluviums ou de la mise en place de pratiques agricoles basées sur des apports nutritionnels importants (lisier, engrais minéraux, amendements, etc.).

Outre un suivi des projets hydrauliques et des pratiques agricoles dans les impluviums, les Habitats de boulaies pubescente et les écosystèmes qui les hébergent méritent de faire l'objet d'un suivi concernant la couverture des sphaignes et du polytrich commun, pour la plupart des sites, de cartographies des unités écologiques pour les complexes des Pâtures Pourries et des Comailles, et d'un suivi fin par profil de structure et de suivi pour le site exceptionnel des Comailles.

Ce complexe tourbeux apparaît comme le plus important en surface et en épaisseur de tourbe. Il est aussi dans un état apparemment optimal. Il peut être considéré comme un exemple typique de tourbière d'émergence de longue continuité écologique (7000 ans), ayant probablement subi un pastoralisme perturbant, mais démontrant aussi une forte résilience.

Goubet P. (2021). Compte rendu d'étude commandée par la communauté de communes de Puisaye-Forterre. Diagnostic fonctionnel des tourbières des sites Natura 2000 de Puisaye. Cabinet Pierre Goubet, Ardes-sur-Couze, 121 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