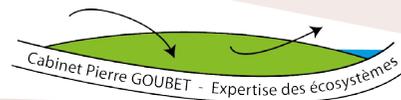


**Compte rendu d'étude commandée par la Direction Régionale de l'Environnement,  
de l'Aménagement et du Logement Auvergne**

Etat des lieux fonctionnel des tourbières  
d'Ayguebonne (Vollere-ville, Puy-de-Dôme)

**Pierre Goubet 2016**



# Table des matières

1 - Introduction .....	1	3.2 - Édifices tourbeux .....	7	4.1 - Rappels théoriques .....	20
2 - Méthodes.....	2	3.3 - Sols et tourbes.....	8	4.2 - Les données ou observations essentielles et leur interprétation fonctionnelle .....	20
2.1 - Caractérisation pédologique de terrain ..	3	3.4 - Variations des niveaux d'eau .....	13	4.2.A - L'apport de l'analyse des tourbes.....	20
2.2 - Analyse des macrorestes préliminaire ..	3	3.4.A - Chroniques annuelles .....	13	4.2.B - L'apport de la caractérisation piézométrique .....	20
2.2.A - Phase de terrain .....	3	3.4.B - Chroniques de novembre 2015 .....	15	4.3 - <i>Modèle fonctionnel global</i> .....	21
2.2.B - Phase de laboratoire.....	4	3.4.C - Chroniques de décembre 2015 .....	16	4.3.A - Modalités fonctionnelles des tourbières originelles.....	21
2.2.C - Analyse des échantillons.....	4	3.4.D - Chroniques hivernales 2016 (janvier, février, mars, avril, mai) .....	16	4.3.B - Fonctionnement actuel.....	24
2.3 - Caractérisation piézométrique .....	4	3.4.E - Chroniques de juin 2016 .....	17	4.3.C - Etats potentiels.....	25
2.4 - Relief, géologie et géomorphologie .....	5	3.4.F - Chroniques de juillet 2016 .....	17	5 - Problématique de conservation ..	25
2.5 - Synthèse fonctionnelle.....	5	3.4.G - Chroniques d'août 2016 .....	18	6 - Conclusion-résumé .....	26
3 - Résultats.....	6	3.4.H - Chroniques de septembre 2016.....	18	7 - Bibliographie .....	28
3.1 - Cadre général .....	6	3.5 - Photographies aériennes anciennes ..	19		
		4 - Synthèse fonctionnelle.....	20		

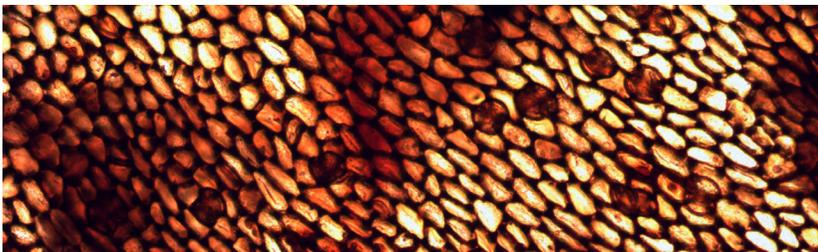


# 1 - Introduction

Ce document correspond au compte rendu d'une étude commandée par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Auvergne. L'objectif de l'étude, dont le contenu formel de la commande est présenté dans l'encart ci-contre, est de réaliser une analyse fonctionnelle des tourbières d'Ayguebonne (Villore-Ville, Puy-de-Dôme).

Après cette introduction, ce document présente les protocoles d'étude, les résultats, puis une discussion sous la forme d'une synthèse fonctionnelle suivie de préconisations d'actions. Il se termine par un résumé-conclusion.

Ce travail a été réalisé avec la collaboration de Christine Goubet et l'aide de terrain de Laure Pelissier (ONF).



## Contenu de la commande

Réalisation d'un état des lieux topographique (MNT), paléocécologique, pédologique et une analyse de photos aériennes afin de comprendre le fonctionnement de cette tourbière notamment d'un point de vue hydrologique  
Proposer des mesures de conservation/restauration des habitats remarquables.

### **VOLET 1 : pédologie et paléocécologie de terrain**

Ce volet consiste à décrire les différents horizons des sols du complexe, sur le terrain, à travers des carottages au carottier russe ou à l'aide de tarières adaptées. L'objectif est de définir les grands types de végétation ayant édifié l'édifice tourbeux (bas-marais à carex, à roseau, bois tourbeux, tourbière haute, etc.) et la présence d'horizons à forte incidence hydrologique (passée argileuse, graveleuse, etc.).

### **VOLET 2 : suivie piézométrique**

Il s'agit d'installer 5 sondes piézométriques (ou plus, si nous le jugeons nécessaire) sur des points clés du complexe. L'objectif est de caractériser les variations des niveaux d'eau dans différents secteurs fonctionnels de la tourbière pour tester des hypothèses quant-àux circulations hydriques qui ont permis ou qui permettent aujourd'hui la tenue de communautés spécifiques, d'intérêt communautaire ou non.

### **VOLET 3 : synthèse et recommandations**

Ce volet correspond à l'interprétation fonctionnelle et l'intégration des données acquises et la prise en compte d'autres types de données disponibles comme le MNT du CRAIG, les photographies aériennes, les données floristiques, etc. Il s'agira d'élaborer un modèle de fonctionnement global à partir duquel des propositions de gestion seront formulées pour les Habitats d'intérêt communautaire et plus généralement pour le bon fonctionnement du complexe.

# 2 - Méthodes

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 écolo-

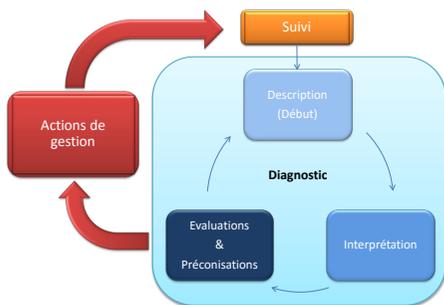


Figure 2-1: la structure du diagnostic.

giques 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 2-1). 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 2-2): 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 acquérir et analyser. Le pôle transferts concerne un ensemble de données propres au pro-

cessus 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

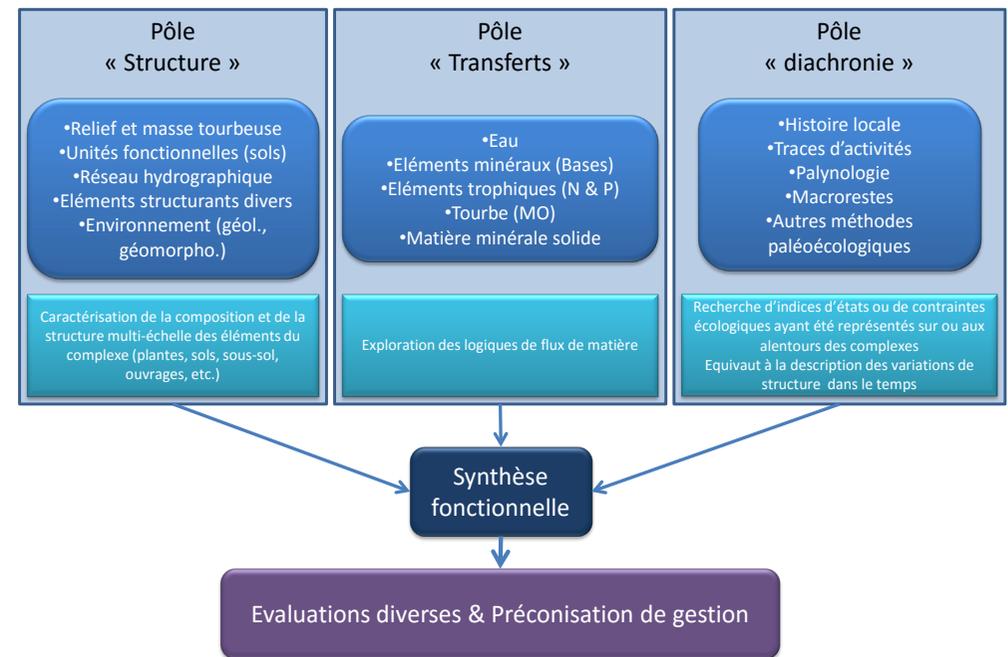


Figure 2-2: les 3 pôles du diagnostic avec les corps de données relatifs à chacun. Chacun des éléments des pôles, fait l'objet de protocoles clairement définis. La synthèse fonctionnelle et les évaluations et préconisations sont sensées faire aussi l'objet de protocoles stricts, mais ceux-ci sont encore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

le plus souvent une variabilité spatiale et temporelle qui rend difficile la collecte et l'analyse des données. 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 l'étude des tourbières d'Ayguebonne, le diagnostic fonctionnel devait traiter du volet «structure», avec une description des sols du site. Les protocoles de collecte et de traitement des données ont donc été ceux relatifs aux sols avec la caractérisation pédologique et paléoécologique de terrain et à l'analyse relief-géomorphologie-géologie. Le volet «Transferts» était représenté par l'analyse hydrologique du complexe en vue de comprendre comment se réalise les écoulements au sein du complexe. En complément, des données du volet «Diachronie» sont venues enrichir la



Figure 2-3 : le carottier russe.

description, elles sont soit relatives aux macrorestes végétaux, soit en lien avec les photographies aériennes anciennes.

## 2.1 - Caractérisation pédologique 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. 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).

La caractérisation vise à la meilleure représentativité des sols d'un complexe, le choix des emplacements de sondage dépend donc de multiples paramètres définis sur le terrain. Pour le complexe d'Ayguebonne, les sondages ont été réalisés dans différents types d'unité fonctionnelles mais en prenant en compte

les épaisseurs de tourbe présentes, certaines unités n'étant pas tourbeuses.

La restitution des résultats se réalise sous forme de colonnes stratigraphiques synthétiques reprenant les éléments caractérisés. La nomenclature pédologique est simplifiée, les termes du langage commun sont préférés aux termes techniques, certaines abréviations consacrées en pédologie sont expliquées dans l'encart sur les sols tourbeux page suivante.

## 2.2 - Analyse des macrorestes préliminaire

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. Dans le cadre des tourbières d'Ayguebonne, il ne s'agissait que d'une première approche d'une part pour évaluer le potentiel des tourbes à renseigner sur le fonctionnement passé et actuel du complexe (non d'une étude détaillée) et, d'autre part, pour parfaire les observations de terrain. Ceci-dit, la différence



Figure 2-4 : l'extraction et l'analyse de terrain de tourbe.

entre les deux réside principalement dans le nombre d'échantillons analysés.

### 2.2.A - Phase de terrain

L'extraction des carottes est réalisée à l'aide du même outil que les sondages pédologiques et paléoécologiques: un carottier russe (figure 2-3).

Une fois extraites, les carottes sont étudiées sur le terrain (figure 2-4). De ces carottes sont prélevés des échantillons stockés dans des sachets plastiques, numérotés et référencés en fonction du sondage et de sa place dans celui-ci. La localisation des sondages est enregistrée au GPS de précision métrique, les photographies des carottes dès leur extraction sont enregistrées également.

## 2.2.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). L'échantillon

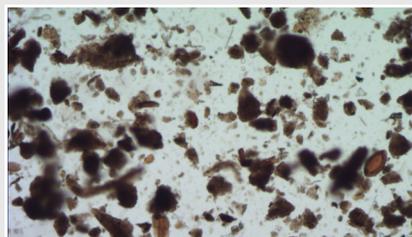
représente un volume de 4,7 cm<sup>3</sup> environ (figure 2-5). Les échantillons sont analysés, en diluant la matière dans une boîte plastique mesurant 9,7x6,5cm (figure 2-5).

### Généralités sur les sols tourbeux

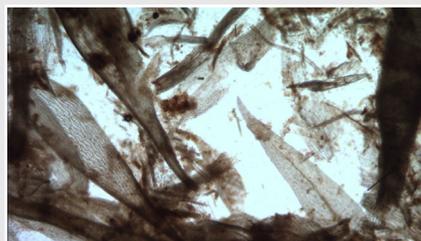
Le terme d'HISTOSOLS est proposé par les pédologues pour désigner les sols tourbeux, les sols constitués de tourbe, la tourbe étant définie comme un matériau contenant une forte part de matière organique d'origine végétale (part variable suivant les classifications).

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).



Microagrégats de matière organique.



Fibres dans la tourbe, ici une mousse.

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

## 2.2.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. 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.

Dans le cadre de cette étude, les macrorestes identifiés ont été indiqués



Figure 2-5 : échantillon de macrorestes brut, à gauche, et prêt à être analysé, à droite.

dans la représentation schématique des sondages.

## 2.3 - Caractérisation piézométrique

Les piézomètres sont des tubes permettant d'accéder depuis la surface à une nappe phréatique. Ils sont équipés de capteurs électroniques de pression et de température de type Diver de Schlumberger.

Chaque sonde piézométrique (figure 2-6) est placée à une dizaine de centimètres du fond d'un piézomètre de diamètre intérieur 51 mm et extérieur 63mm ou 25-33mm en PVC (figure 2-7). Tous les piézomètres sont posés un même jour grâce à un carottier russe de diamètre extérieur de 60 mm ou d'autres tarières pédologiques (Edel-



Figure 2-6 : sonde piézométrique et navette de pose.

man, gouge).

Les profils pédologiques de chaque piézomètre sont généralement relevés ou connus sur la base de travaux antérieurs. Leur composition et leur structure sont notées.

Les sondes sont programmées pour un démarrage simultané et restent en place pour la même durée, générale-

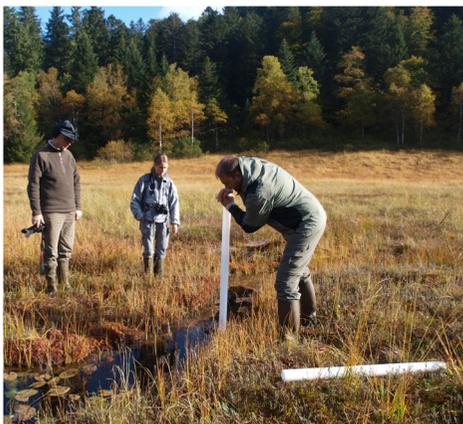


Figure 2-7: pose de tubes piézométriques en bord de lac.

ment une année. La pression de l'ensemble des sondes est mesurée toutes les demi-heures entre les dates de pose et celles de dépose.

Les données brutes sont exprimées en cmH<sub>2</sub>O, disponibles en format CSV. 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. Le rendu final est exprimé suivant différentes modalités, toutes les données sont fournies sur CD en annexe du rapport.

L'étude des enregistrements piézométriques permet de caractériser de manière plus fine les régimes piézométriques à partir de périodes choisies pour leur intérêt particulier. Généralement seuls les éléments majeurs seront

présentés pour chaque piézomètre.

## 2.4 - Relief, géologie et géomorphologie

Les données de relief utilisées pour l'étude sont celles du MNT Géodis à 10m du Centre Régional Auvergnat d'Information Géographique (CRAIG).

Les données géologiques sont celles de la banque du sous-sol du BRGM, de la carte géologique et de diverses recherches bibliographiques.

## 2.5 - Synthèse fonctionnelle

La démarche de synthèse fonctionnelle se base en premier lieu sur les données collectées lors de l'étude. Il s'agit, en dehors de toute considération théorique, d'établir des corrélations entre les différents types de données, collectées de manière indépendante,

dans les limites du possible. Par exemple, la répartition spatiale d'une unité fonctionnelle peut être plus ou moins bien corrélée avec un élément géomorphologique ou avec un élément d'origine anthropique. Cette corrélation peut éventuellement s'expliquer par des processus simples, évidents sans faire appel à des notions très pointues. Le terme de corrélation n'est pas utilisé ici dans sa définition des mathématiques statistiques, mais dans le cadre du langage commun.

Une fois cette première étape réalisée, la prise en compte de notions théoriques permet d'expliquer d'autres corrélations, d'expliquer en détail celles établies précédemment, de proposer une dynamique du système ou de ses sous-unités. La synthèse correspond donc à la construction d'un modèle de fonctionnement à l'échelle de la zone d'étude, qui constitue une base commune d'évaluation et de définition des stratégies de conservation.



# 3 - Résultats

Les tourbières d'Ayguebonne ont fait l'objet d'une démarche de diagnostic en 2005 (Goubet, 2005). A cette époque, les techniques utilisées restaient rudimentaires et seules certaines thématiques du volet structure ont été traitées: le relief et les végétations. Nous nous appuyerons sur ces données, sachant que pour ce qui est des végétations, la physionomie a changé avec la pousse importante de bouleaux, mais que le fond floristique est encore comparable.

La logique de présentation des résultats s'appuie sur une présentation de la composition et de la structure de l'environnement des complexes, puis de celles des deux complexes, pour terminer par la présentation des résultats du suivi piézométrique.

## 3.1 - Cadre général

Les tourbières d'Ayguebonne correspondent à deux complexes distincts,

un petit édifice [1], au sud-ouest, et un grand édifice [2], au nord-est (figure 3-1). Ces deux entités s'insèrent dans un fond de vallon orienté vers l'ouest, à une altitude de 950 m NGF [3]. Les sommets environnants culminent entre 1001 et 1091 m [4].

Un ensemble de captages d'eau potable est présent à l'est et au nord des tourbières [5].

Le secteur a fait l'objet d'un drai-

nage drastique à vocation sylvicole et les deux édifices ont été plantés en épicéas au cours des années 1960-1970. Dès les années 1990, une politique de conservation a induit les coupes des arbres plantés sur les édifices, la coupe de bouleaux et la mise en place de seuils dans les drains. Si on prend en compte l'origine pastorale du secteur, avant la conversion en forêt, le moins qu'on puisse dire est que les tourbières d'Ayguebonne ont subi de nombreuses perturbations.

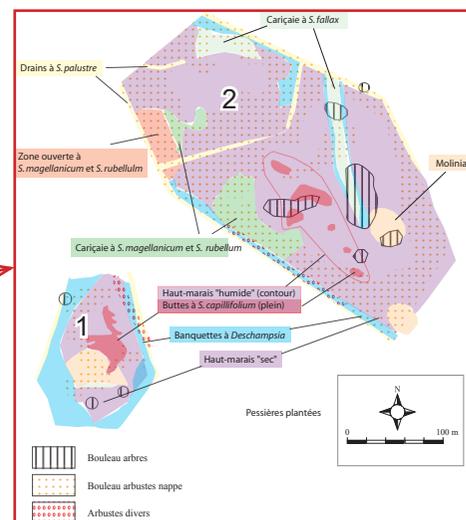
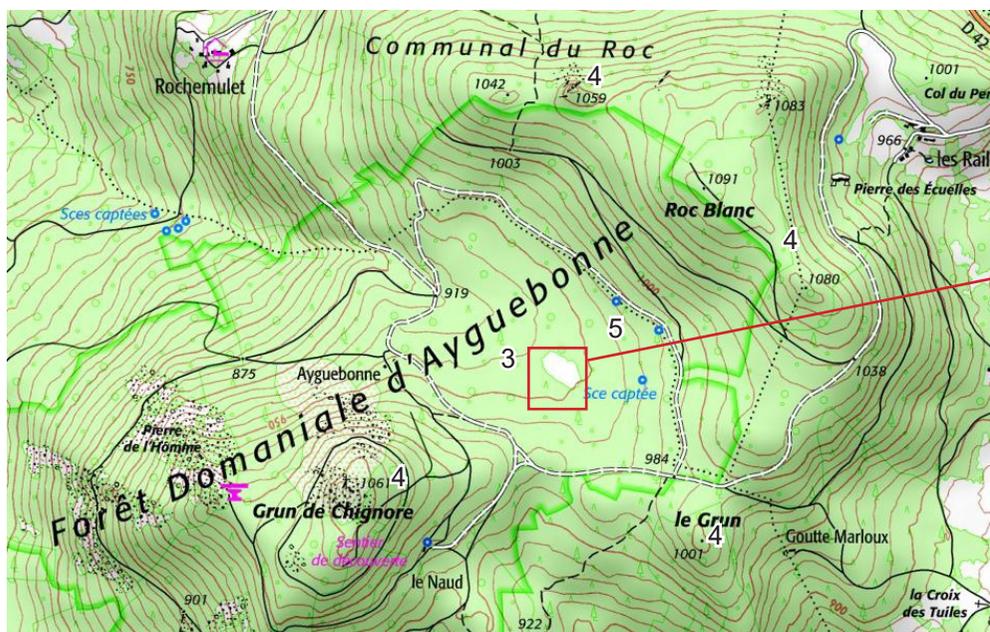


Figure 3-1: contexte de la zone d'étude sur fond cartographique IGN au 1/50000, cartographie d'unités écologiques de 2005 (Goubet, 2005) et photographie aérienne (CRAIG).



La géologie du secteur est dominée par des roches granitiques (figure 3-2) et en particulier par un leucogranite («granite à muscovite») sous une forme typique et sous une forme aplitique de bordure (les cristaux sont plus petits que dans la forme typique à cause

d'une cristallisation plus rapide induite par la proximité de la bordure du pluton). Ce faciès aplitique se tient à l'aval des complexes.

La fracturation rocheuse est représentée par trois familles de failles [1, 2,

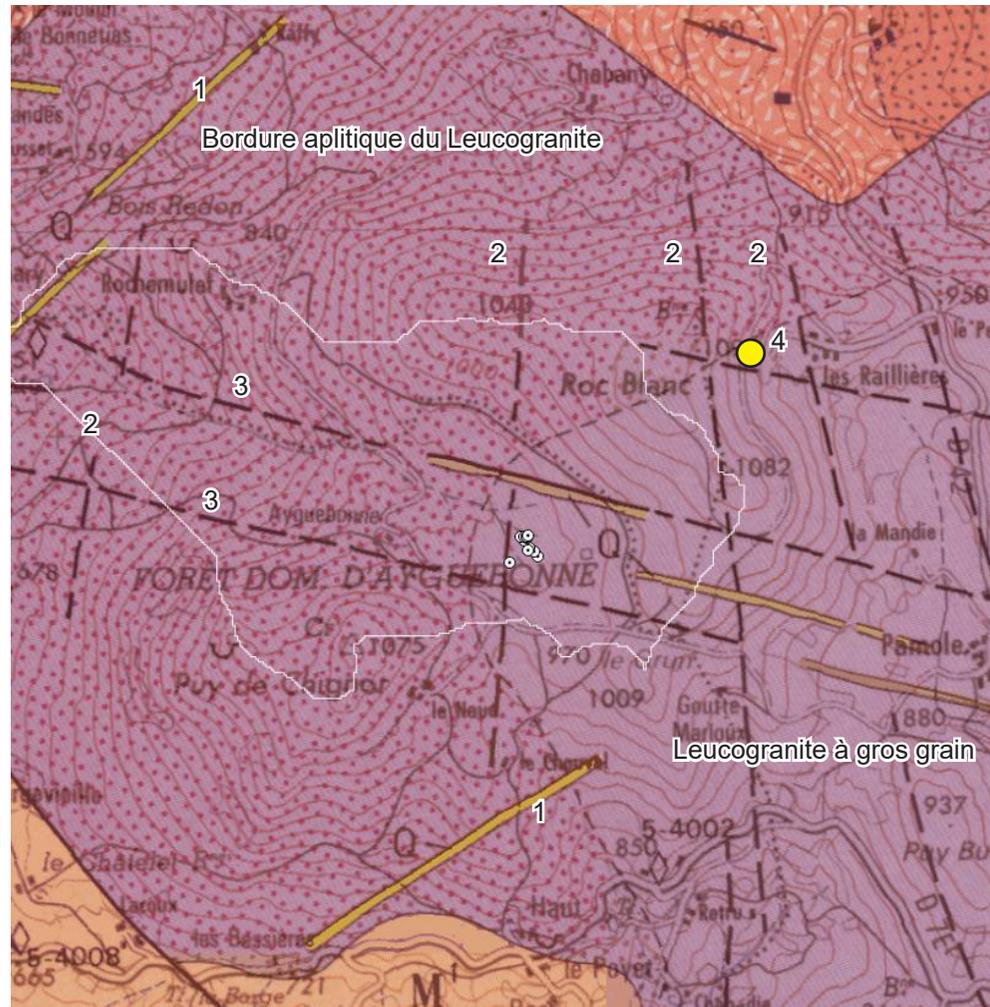


Figure 3-2: extrait de la carte géologique de Noirétable (Source BRGM). Les complexes sont indiqués par les points de sondages pédologiques et le bassin versant par un trait blanc. Le point jaune indique le sondage numéro 06995D0030/F/RC de la banque du sous-sol.

3] dont certaines ont été minéralisées en quartz. L'orientation du vallon correspond à un des groupes [3].

La banque du sous-sol recèle d'un unique document intéressant dans le cadre de l'étude, relatif à un sondage de 30 m dans le secteur de Roc-Blanc [4]. Ce sondage n'a rencontré que des formations superficielles sablo-argileuses plus ou moins riches en blocs. Ces formations superficielles correspondent à des altérites du granite; elles sont formées d'un multicouche complexe de lits plus ou moins poreux et perméables mais qui constituent pour une part d'entre eux un aquifère.

### 3.2 - Édifices tourbeux

Les épaisseurs de tourbe sont au maximum de 2,20 m, au niveau du petit édifice, et de 1,75 m pour le grand (figure 3-3).

Les profils topographiques réalisés en 2005 à la lunette de chantier restent plus précis que les données du MNT produit par photogrammétrie. Ils montrent la nature bombée du petit édifice et la forme en crête du grand édifice, allongé dans le sens de la pente (figure 3-4).

Cette configuration implique une lo-

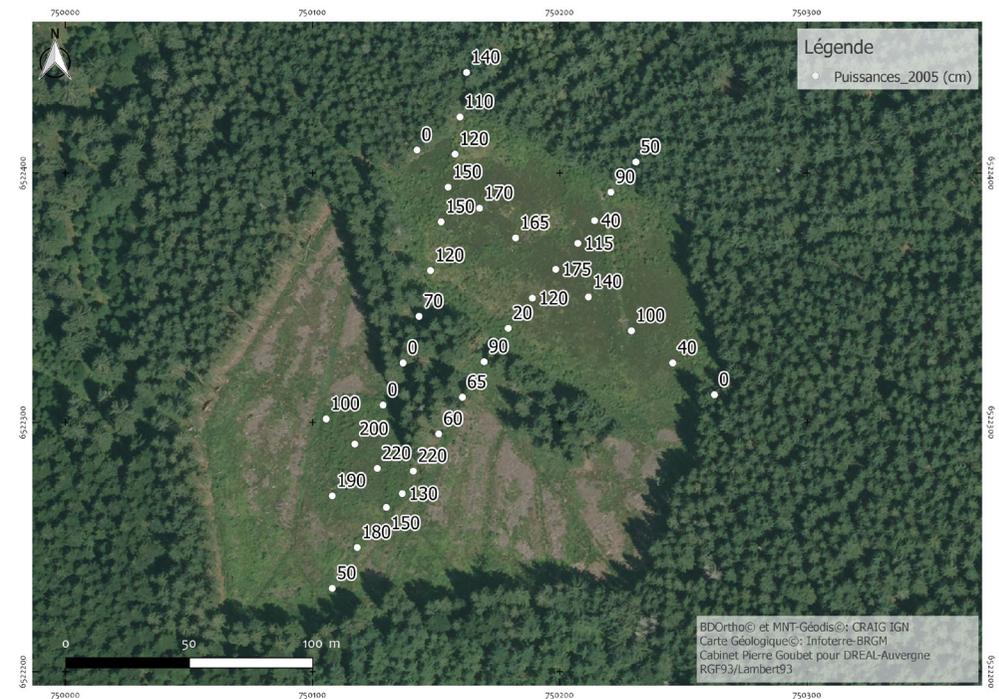


Figure 3-3: épaisseurs (puissances) de tourbe mesurées à la perche (Goubet, 2005).

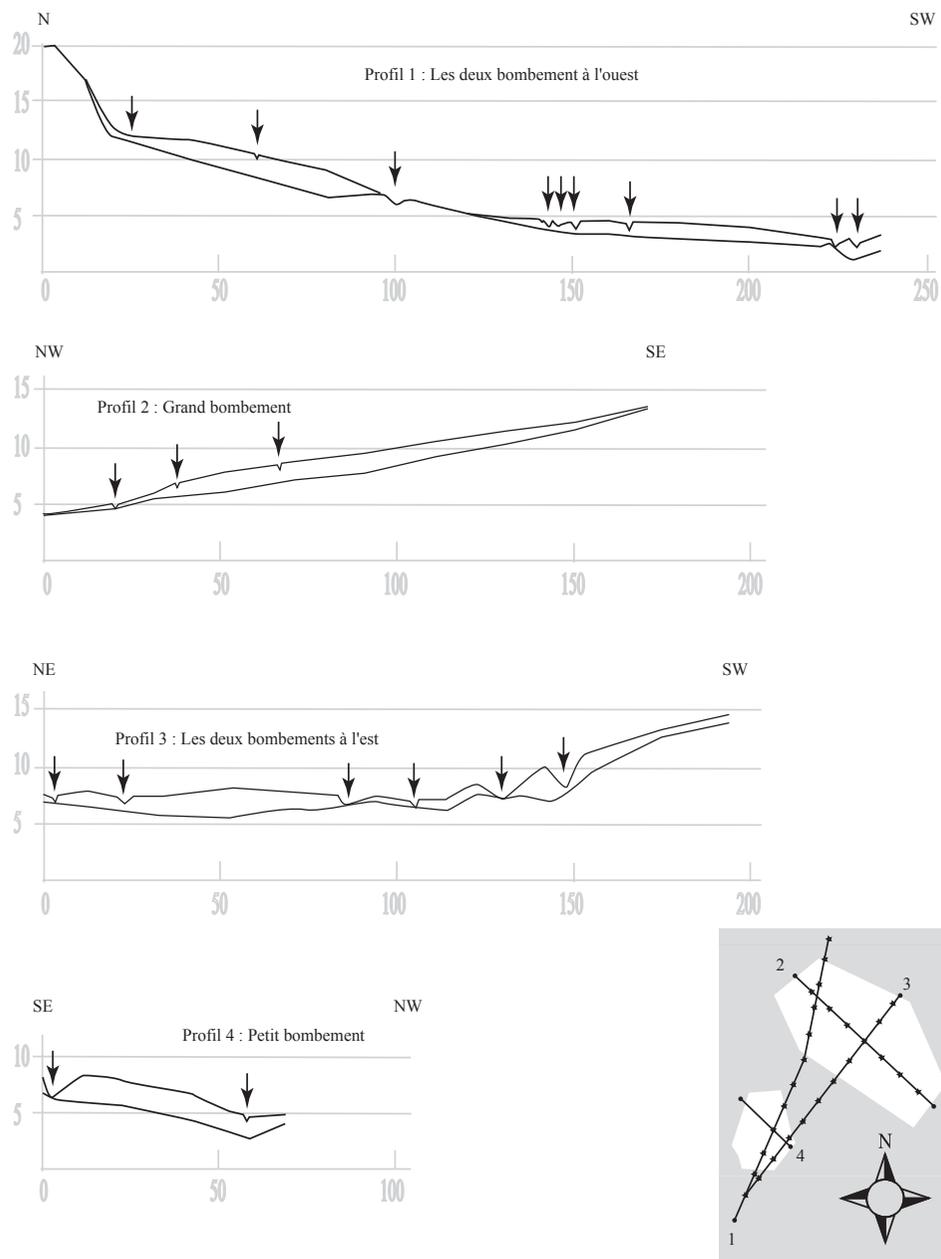


Figure 3-4: profils de surface et de subsurface des tourbières de la forêt domaniale d'Ayguebonne (Vollre-Ville, 63). Échelles en mètres. Noter que les échelles verticales et horizontales diffèrent d'un rapport de 10. Chaque flèche représente un drain (Goubet, 2005).

gique d'écoulement radiale centrifuge du petit édifice et une logique équivalente mais à partir d'un axe central allongé pour le grand édifice.

Ce relief n'est donc pas restitué par le MNT à 10 m. Au contraire, la cartographie des aires contributives topographiques présentée dans la figure 3-5 montre que le grand édifice correspond à une dépression linéaire qui collecte les écoulements alors que le petit édifice est à l'abri de toute concentration de ruissellements. Le MNT montre de manière fiable la situation en tête de bassin des deux complexes mais il n'est pas possible d'aller plus loin dans l'inter-

prétation des résultats, le mode d'acquisition des données du MNT n'étant pas précis en contexte forestier.

### 3.3 - Sols et tourbes

Douze sondages pédologiques et paléocéologiques ont été réalisés sur le site (figure 3-6), en particulier sur le grand édifice. La plupart des sondages ont été réalisés jusqu'au blocage du carottier. La zone nord du grand édifice a particulièrement été étudiée pour résoudre un problème de répartition inhabituelle d'un certain type de tourbe.

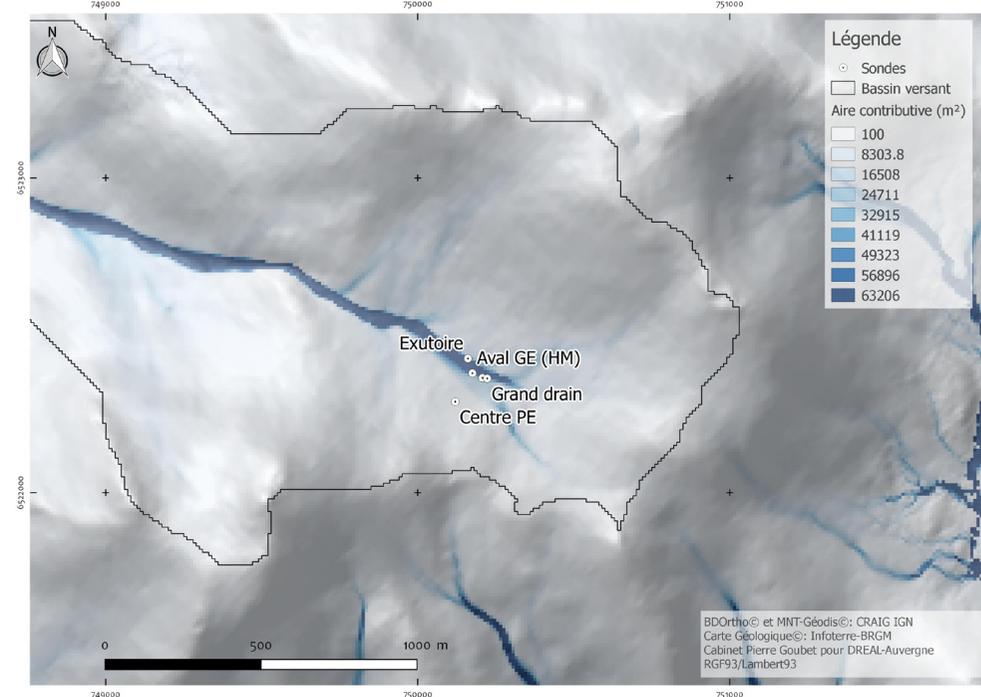


Figure 3-5: cartographie des aires contributives topographiques dérivées du MNT Géodis de CRAIG. Cette cartographie représente en m<sup>2</sup> la surface drainée par toute cellule de 10 m de côté. La localisation des sondes piézométrique et du bassin versant est aussi précisée.

Les sondages schématiquement représentés dans les figures 3-7 à 3-10 montrent la prédominance de 3 types de tourbe caractérisée: des tourbes à carex (*Carex* spp.); des tourbes à phragmite (*Phragmites australis*); des tourbes à linaigrette engainante (*Eriophorum vaginatum*). A celles-ci s'ajoutent des tourbes mal caractérisées et des

tourbes de surface de type kultureller Trockenhorizont (KTH) (voir l'encart page 24 pour une description du KTH).

Les tourbes à carex sont majoritaires à la base ou dans les secteurs les moins épais du grand édifice. La tourbe à phragmite est présente à la base du petit édifice et indiquée dans un des sondages du grand édifice. La tourbe à linaigrette est présente dans le petit édifice et dans un secteur nord-est du grand édifice, de manière localisée.

Les sols sont caractérisés par une trilogie KTH, mor sur tourbe ou KTH, tourbe brute. Une partie des sondages montrent également un couvert de

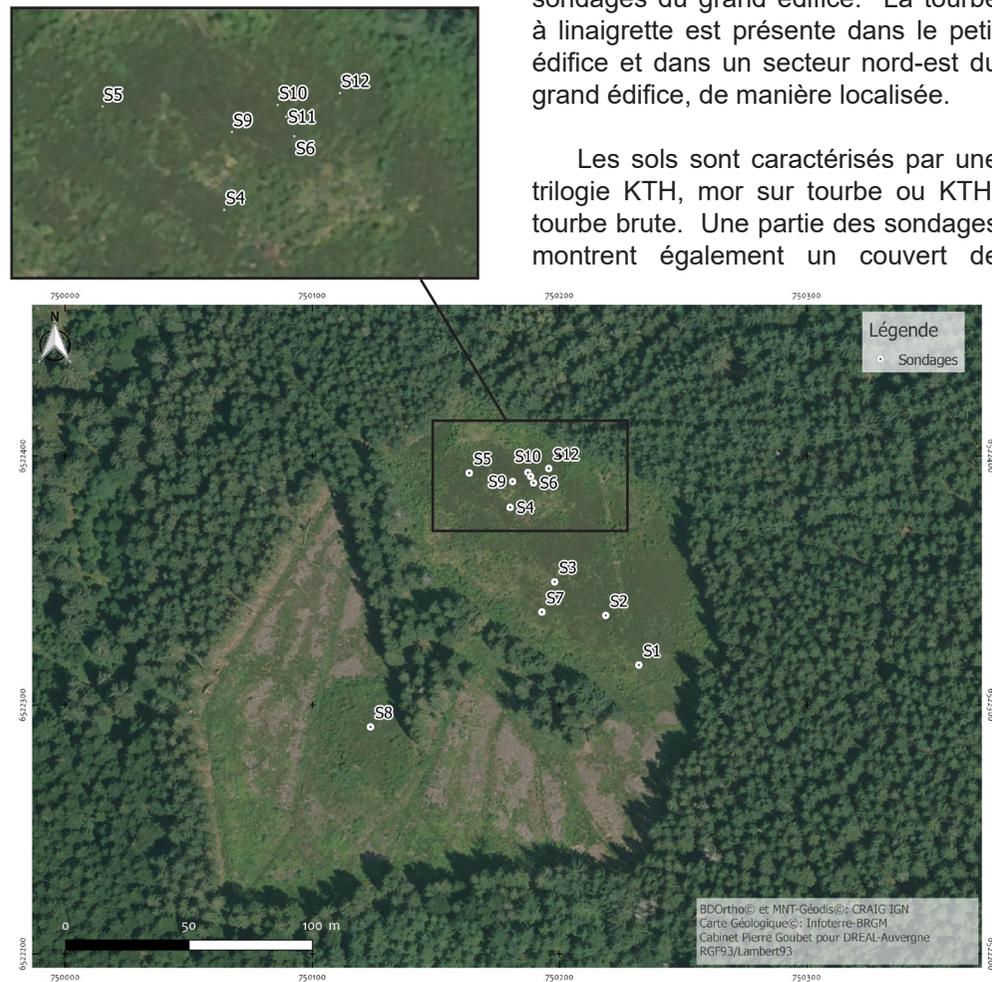


Figure 3-6: localisation des sondages pédologiques et paléocéologiques sur fond orthophotographique CRAIG.

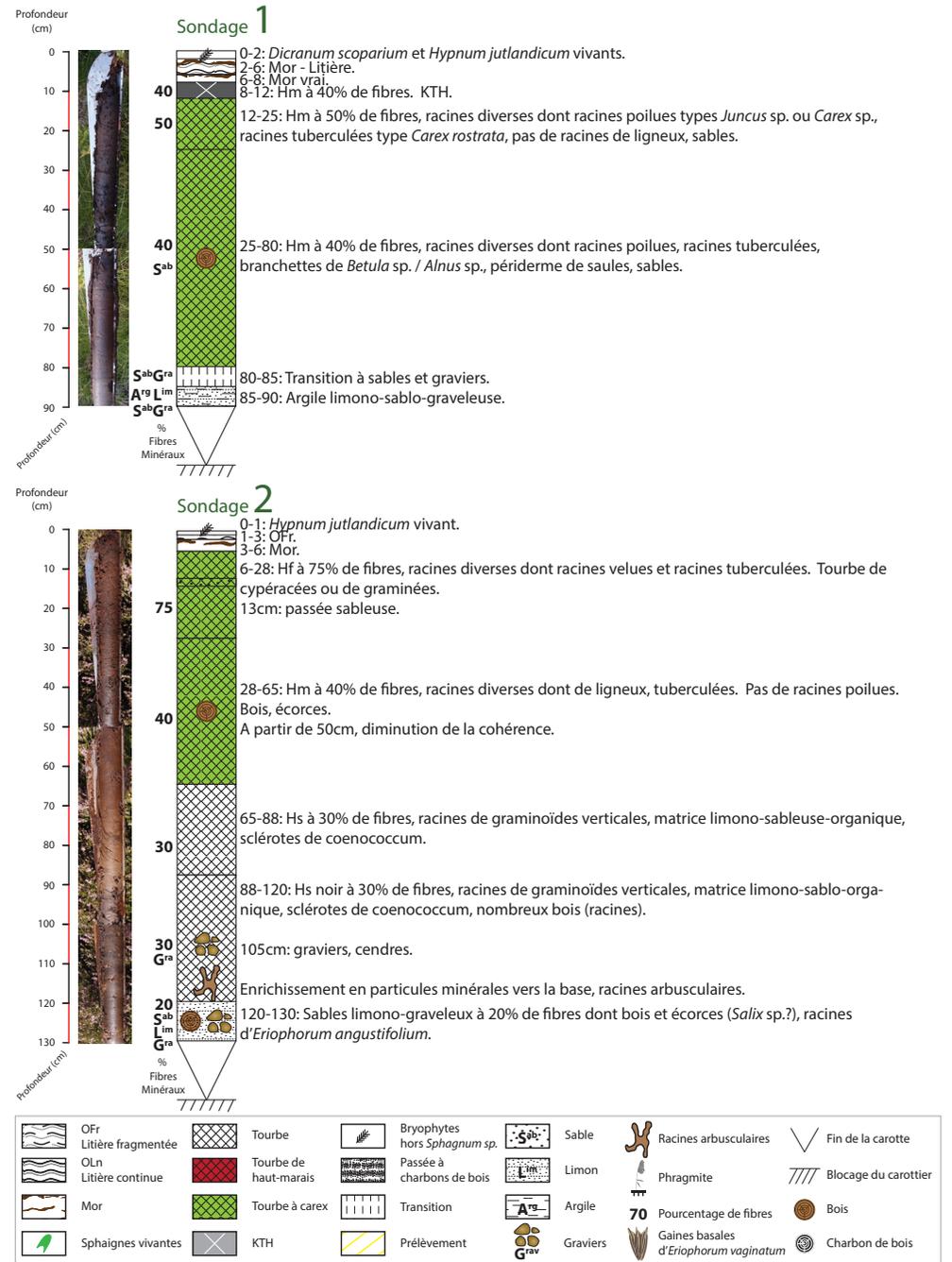
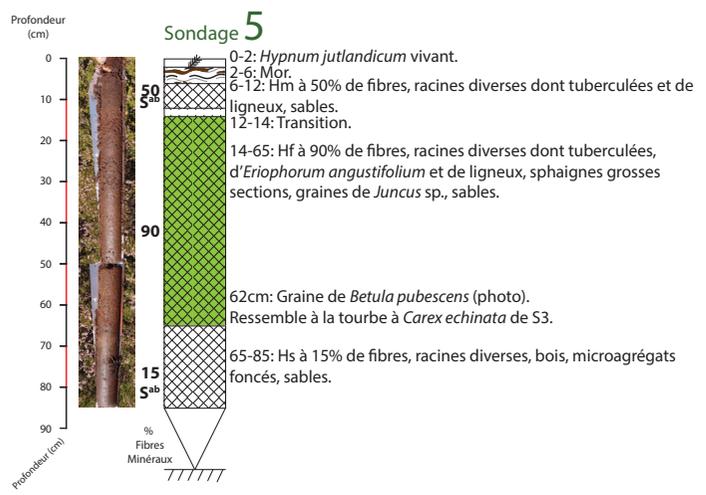
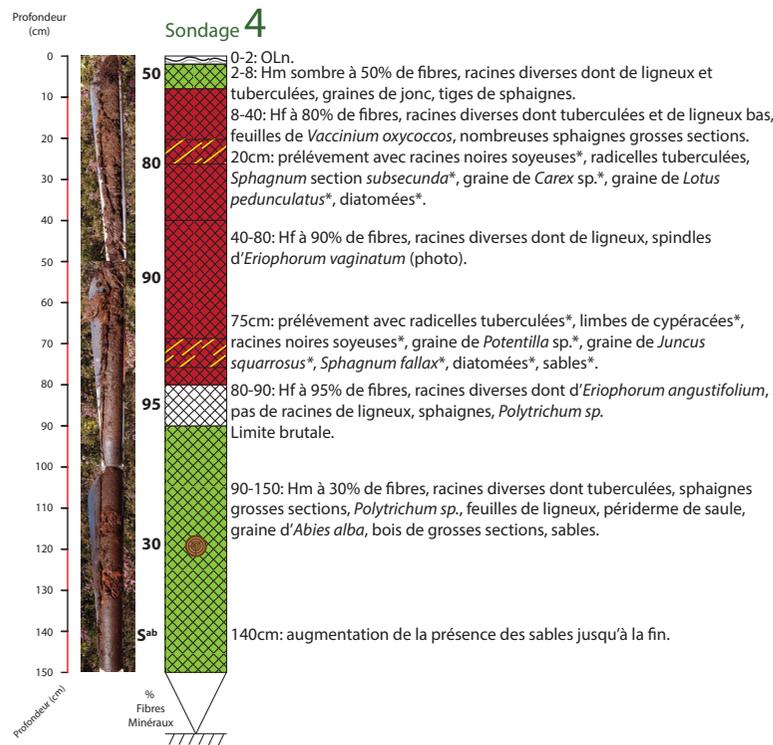
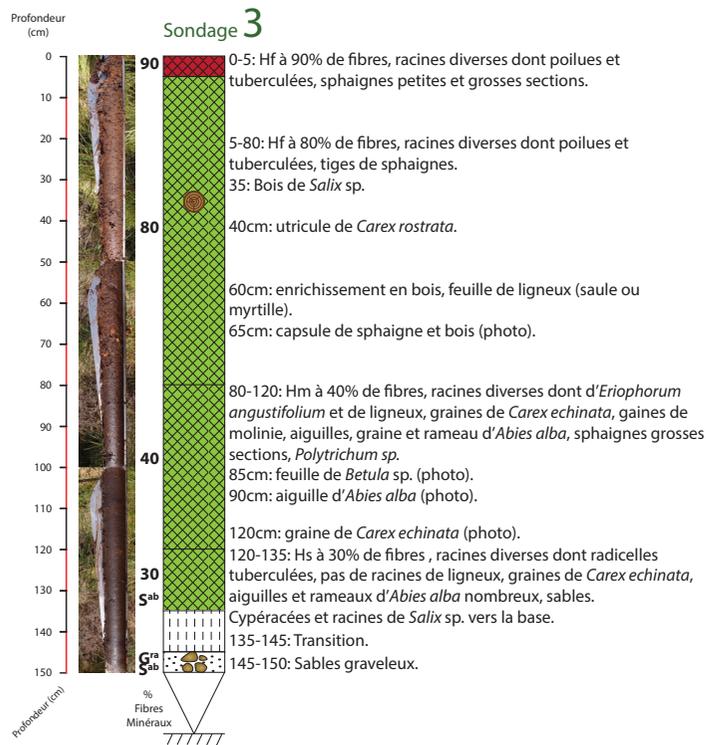


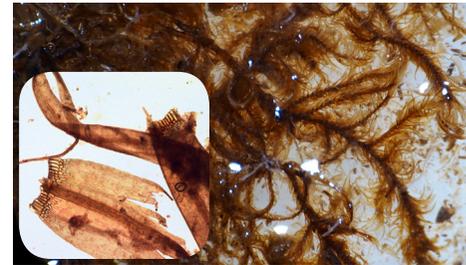
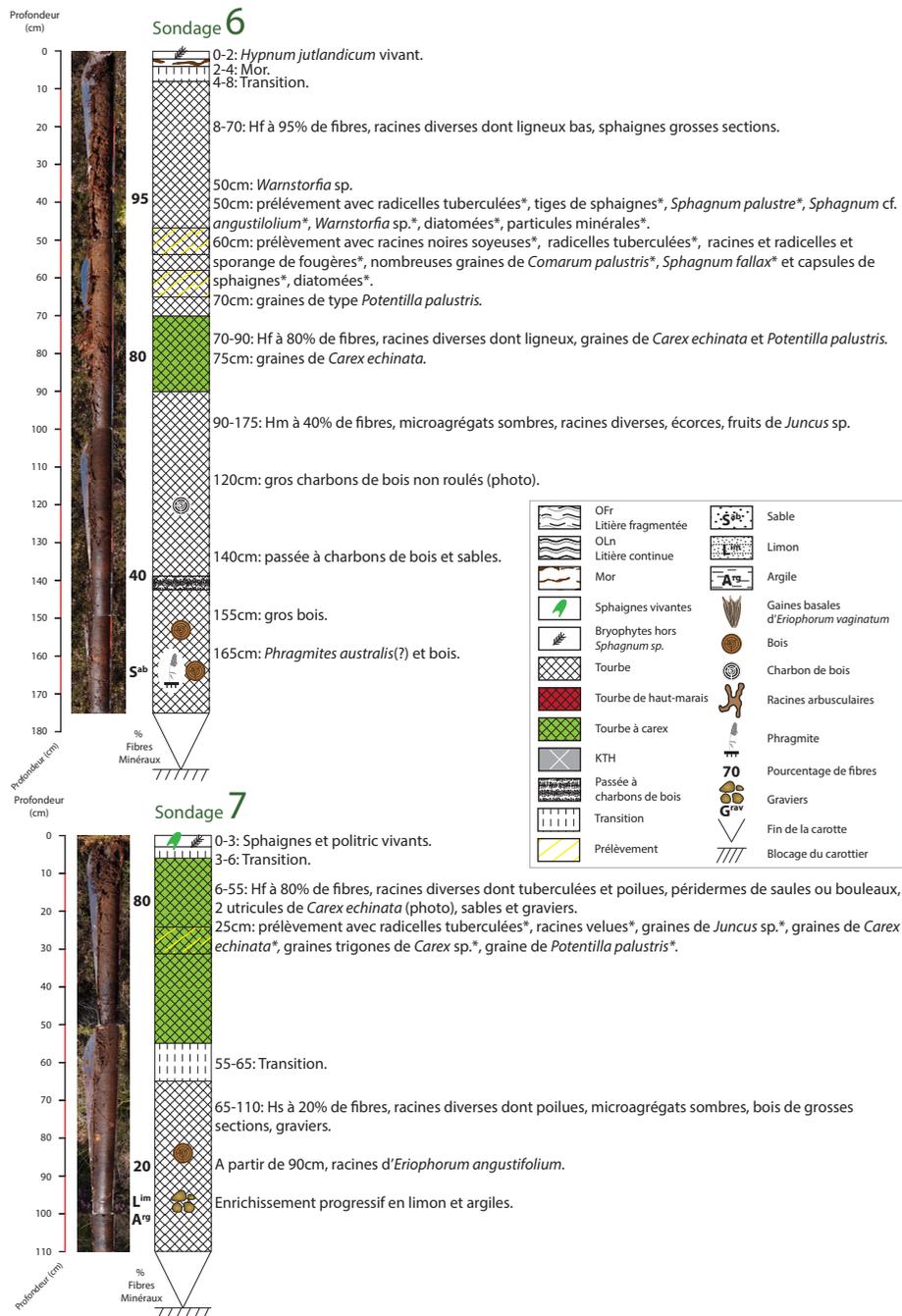
Figure 3-7: représentation schématique des sondages pédologiques et paléocéologiques 1 et 2.



OFr	Tourbe	Transition
Litière fragmentée	Tourbe de haut-marais	Prélèvement
Litière continue	Tourbe à carex	Sable
Mor	KTH	Limon
Sphaignes vivantes	Passée à charbons de bois	Argile
Bryophytes hors <i>Sphagnum</i> sp.	Gaines basales d' <i>Eriophorum vaginatum</i>	Graviers
Racines arbusculaires	Bois	Fin de la carotte
Phragmite	Charbon de bois	Blocage du carottier
70		



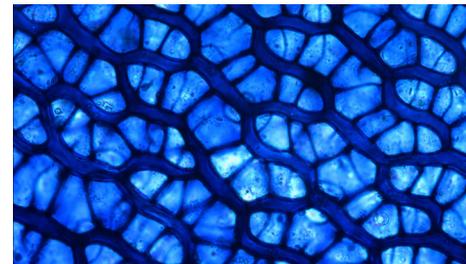
Figure 3-8: représentation schématique des sondages pédologiques et paléoécologiques 3, 4 et 5.



S6 à 50cm, le fond avec *Warnstorfia* sp.



S6 à 165cm, *Phragmites australis* et bois.



S6 à 50cm, *Sphagnum palustre*.



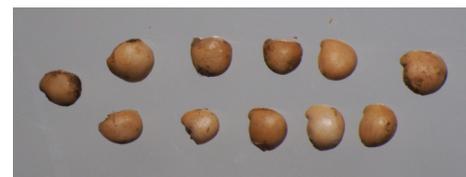
S7 à 25cm, le fond.



S6 à 50cm (fond) et 60cm (médaille), capsules de sphaigne.



S7 à 25cm, graine de *Juncus* sp. (gauche) et entre 6 et 55cm, utricules de *Carex echinata* (droite).



S6 à 60cm, graines de *Comarum palustris*.

mousses comme des sphaignes, du polytrich ou des pleurocarpes comme *Pleurozium schreberi*, etc.



S6 à 120cm, charbons de bois non roulés.

Les tourbes observées représentent trois grandes modalités de fonctionnement: celles de tourbières minérotophiques de type bas-marais à carex ou roseau, celles des tourbières hautes à linaigrette et celles des tourbières pâturées à KTH.

Figure 3-9: représentation schématique des sondages pédologiques et paléoécologiques 6 et 7.

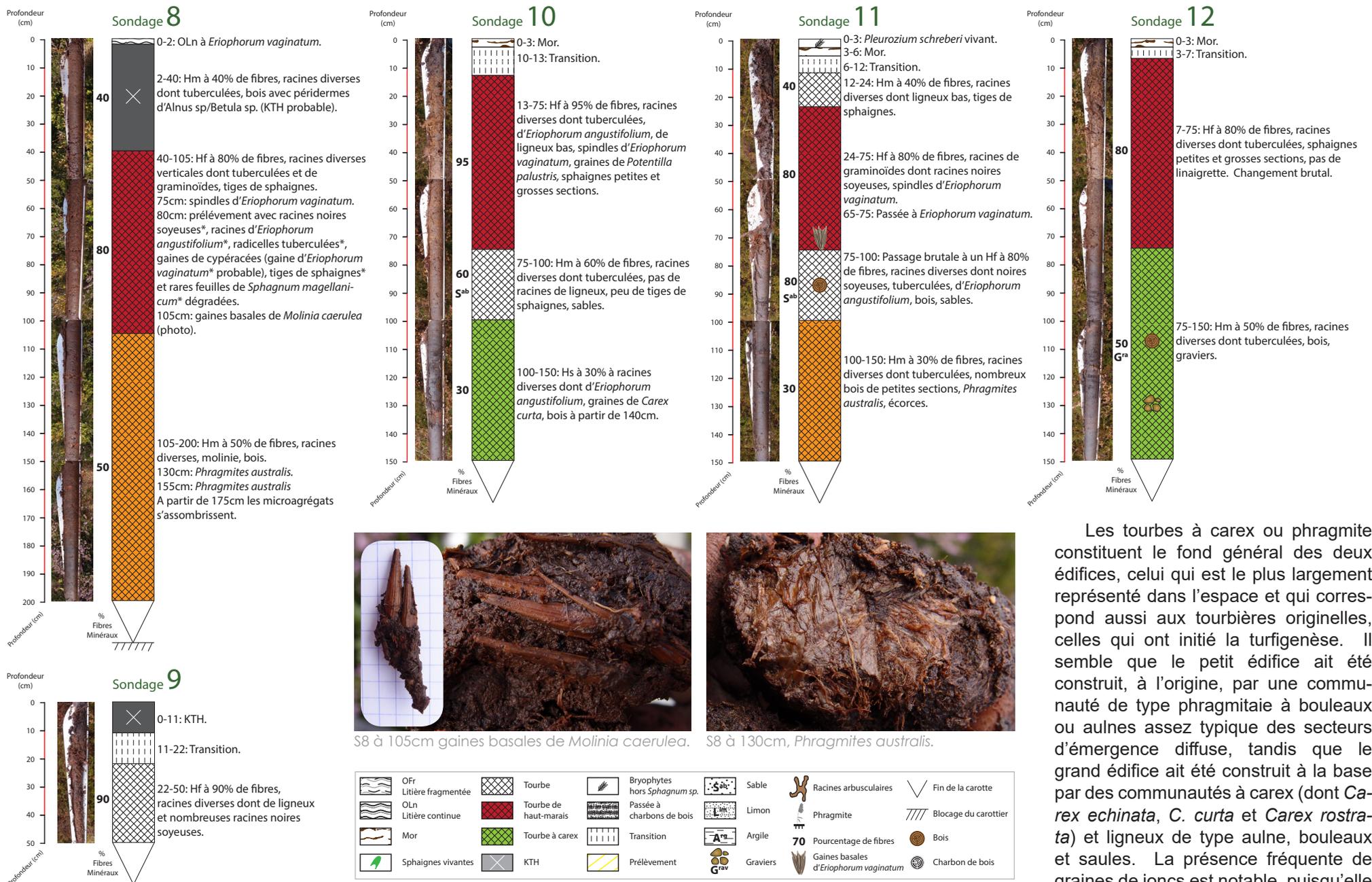


Figure 3-10: représentation schématique des sondages pédologiques et paléocéologiques 8,9,10,11,et 12.

Les tourbes à carex ou phragmite constituent le fond général des deux édifices, celui qui est le plus largement représenté dans l'espace et qui correspond aussi aux tourbières originelles, celles qui ont initié la turfigenèse. Il semble que le petit édifice ait été construit, à l'origine, par une communauté de type phragmitaie à bouleaux ou aulnes assez typique des secteurs d'émergence diffuse, tandis que le grand édifice ait été construit à la base par des communautés à carex (dont *Carex echinata*, *C. curta* et *Carex rostrata*) et ligneux de type aulne, bouleaux et saules. La présence fréquente de graines de joncs est notable, puisqu'elle indique une possible origine pastorale

des communautés.

Les tourbes à linaigrettes sont originales dans leur composition globale avec l'absence, la rareté dans le meilleur des cas, des sphaignes rouges comme *Sphagnum magellanicum*, *S. rubellum*, *S. capillifolium* ou marron comme *S. fuscum*. Si des sphaignes ont été notées dans les couches à linaigrette, leur vérification au microscope a le plus souvent mené à la détermination d'espèces de bas-marais ou ubiquistes comme *Sphagnum palustre*, *S. fallax*, *S. angustifolium*, *S. sect. Subsecunda*. Les tourbes à linaigrette engainante d'Ayguebonne sont donc difficiles à classer, entre bas-marais et tourbière haute. Si la question de l'existence d'une tourbière haute au sommet de la colonne du petit édifice peut s'expliquer en terme de dynamique naturelle, celle d'une tourbière haute sur le grand édifice est à discuter, car la possibilité qu'il ne s'agisse que du remplissage d'une ancienne fosse de tourbage existe.

Les KTH sont la résultante du piétinement des tourbes de toutes origines, piétinement le plus souvent induit par le pâturage. Leur présence non généralisée sur les complexes correspond probablement à des processus d'ablation par des travaux ultérieurs, lors de la création des drains ou des plantations. La forte présence de mor de lande (débris d'éricacées et de mousses pleurocarpes) ou forestier (aiguilles et rameaux d'épicéa et mousses) correspond probablement aux conséquences des plantations des années 1960-1970.

### 3.4 - Variations des niveaux d'eau

Quatre secteurs tourbeux et un ruisseau ont été équipé de sondes automatiques de mesure de niveau d'eau (figure 3-11).

Les piézomètres «centre petit édifice» (centre PE), «centre grand édifice» (centre GE) et «aval grand édifice» (aval GE (HM)) sont implantés dans des secteurs de communautés de tourbière haute; dans les secteurs de tourbe les plus épais; soit dans des tourbes de haut-marais, soit des tourbes à carex (centre GE). Le piézomètre grand drain est implanté au fond du principal drain du grand édifice.

Les données seront présentées et analysées en deux temps, d'abord sur la base de la durée totale du suivi (du 01/11/2015 au 10/10/2016), ensuite sur des durées spécifiques, en fonction des renseignements apportés par divers éléments.

#### 3.4.A - Chroniques annuelles

Les chroniques piézométriques annuelles (figure 3-12) montrent l'existence de deux grands types de régimes correspondants, d'une part, aux tourbières et, d'autre part, à l'exutoire. Les courbes de tourbières se déclinent en deux sous groupes, celui du drain et celui des autres lieux.

Les chroniques de tourbières montrent des courbes assez classiques

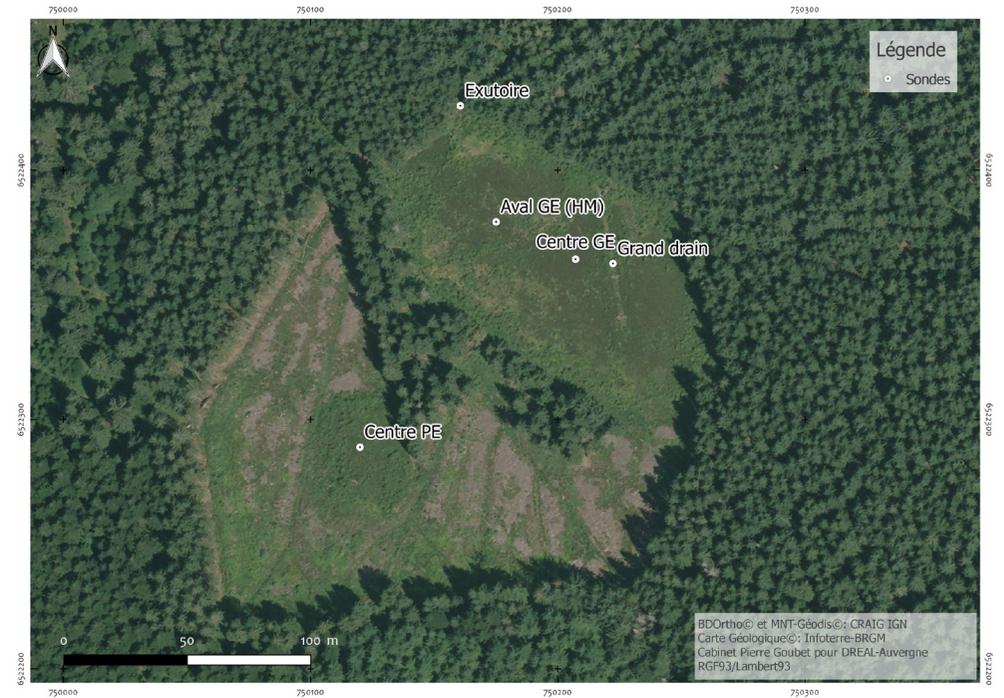


Figure 3-11: localisation des piézomètres sur fond orthophotographique CRAIG.

pour des zones humides de ce type. Ainsi, le régime hivernal (hiver hydrologique) est caractérisé par un niveau de base modifié à la hausse par des événements pluvieux ou neigeux ponctuels [1]. La chronique du grand drain montre ce fait de manière exemplaire, avec un niveau de base au niveau du sol (0 cm). En l'occurrence, l'eau circule entre les sphaignes (*Sphagnum fallax*), le niveau du sol étant choisi au niveau des capitulum des sphaignes. L'été hydrologique est quant-à lui caractérisé par des chutes de niveau importantes, compensées en partie ou totalement par des remontées liées à des précipitations. L'été 2016 est caractérisé par une sécheresse à faible taux de récur-

rence ce qui donne un étiage sévère en septembre [2]. Le passage de l'hiver à l'été est marqué par une transition relativement classique caractérisée par l'alternance de hausses et de baisses sans étiage, mais aussi originale par une remontée des niveaux de base, comme indiqué par la chroniques du grand drain [3].

La courbe du ruisseau montre un comportement différent et original. Si les mois de novembre et décembre 2015 correspondent à la courbe classique hivernale avec un niveau de base modifié par des pics de crue lors de précipitations majeures [4], les autres mois de l'année montre un comporte-

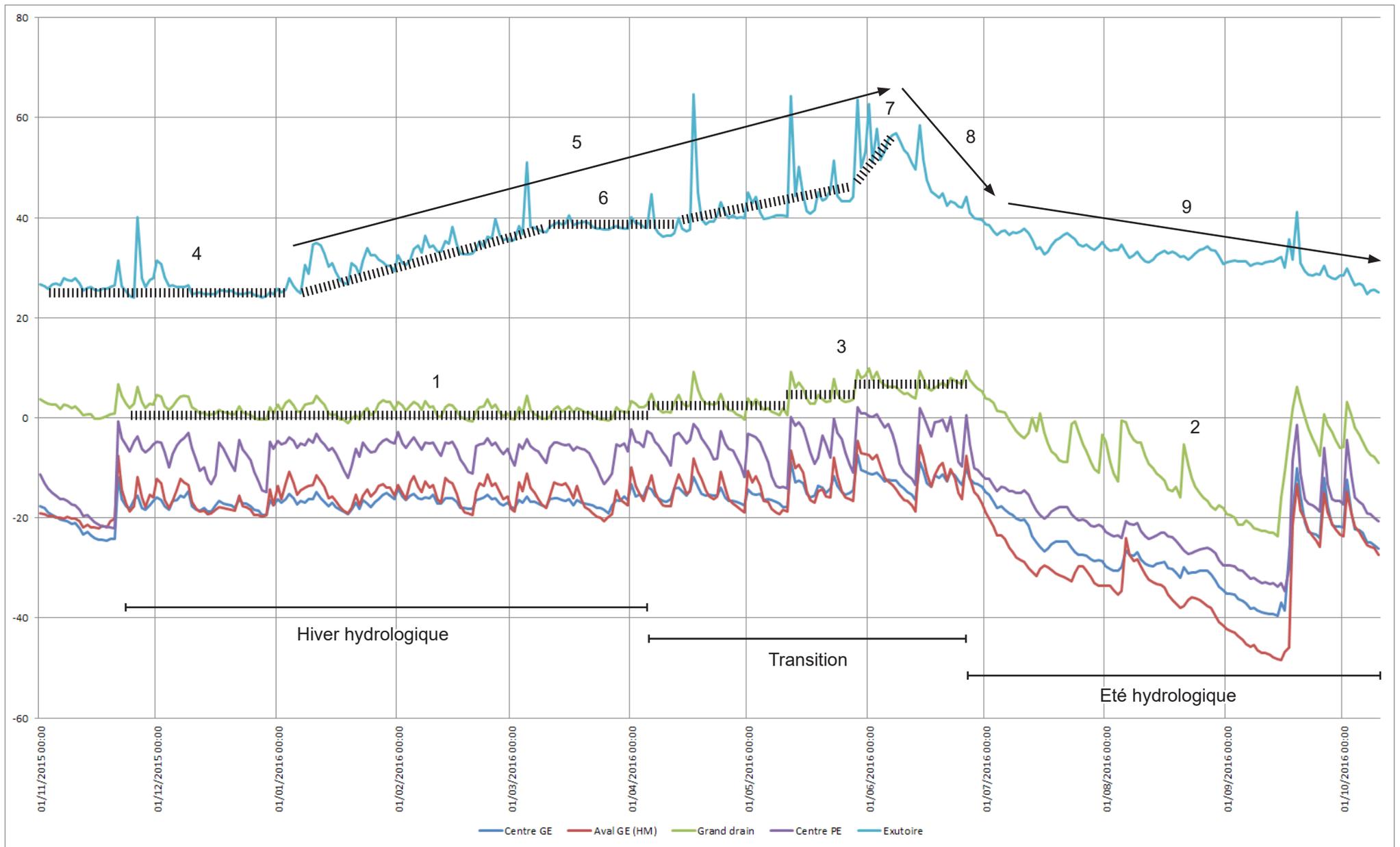


Figure 3-12: chroniques piézométriques quotidiennes de novembre 2015 au 10 octobre 2016. Échelle à gauche en cm/sol. Étalonage sur la mesure directe de la nappe au 10/10/2016.

ment différent. Le ruisseau n'est donc pas seulement un classique réceptacle des eaux de ruissellement ou hypodermique, il est aussi un lieu de transfert d'eaux provenant d'autres compartiments. On voit ainsi une remontée des niveaux à partir du début de l'année et jusqu'au 8 juin [5]. La remontée montre une pause de début mars à mi-avril [6] et se termine en forme de pointe probablement induite par une série pluvieuse importante. Au total, le niveau passe de 24 cm à 57 cm du début de l'année au 8 juin. A partir de cette date, le niveau baisse d'abord rapidement, jusqu'à début juillet [8], puis de manière moins importante pendant les trois mois suivants [9]. La courbe atteint au final le niveau de base de l'hiver 2015-2016, avec 25 cm. Cette baisse est déconnectée des pluies, même si celles-ci provoquent des pics de crue réguliers de plus ou moins grande importance.

Cette chronique est importante pour la compréhension du fonctionnement passé et actuel de la tourbière, son interprétation détaillée sera réalisée dans un chapitre ultérieur.

### 3.4.B - Chroniques de novembre 2015

Les chroniques de novembre 2015 permettent d'analyser les différents comportements des niveaux suivant les lieux en fonction d'un événement

de précipitation en période hivernale (et en régime de base pour l'exutoire) (figure 3-13). La précipitation du 25 novembre montre de manière nette le transfert des eaux de ruissellement à travers l'exutoire [1]. Le processus démarre quelques heures après le début de la pluie marqué sur les chroniques des piézomètres [2]. La pluie est continue au vu de remontées du niveau dans la tourbe. La somme des précipitations est suffisante pour générer un pic de crue dans l'exutoire, ce qui n'est pas le cas pour la précipitation du 20-21 qui semble de courte durée. La courbe de l'exutoire est différente de la précipitation du 25; seul un effet de concentration local semble contribuer à la hausse du niveau, de même ampleur que celui ayant lieu dans le grand drain. La hausse des niveaux dans la tourbe est beaucoup plus importante, en valeur absolue, que dans le ruisseau et le drain; ceci s'explique par le fait que le niveau d'eau étant sous le niveau du sol, la hausse est beaucoup plus importante car seul l'espace correspondant à la porosité du matériau accueille l'eau de la pluie. A conditions égales par ailleurs, un aquifère ayant une porosité de 50% verra logiquement une hausse de niveau deux fois plus grande qu'un système aérien. Les variations de chroniques du grand édifice, au centre et à l'aval, apparaissent synchrones mais d'amplitudes différentes, avec un effet probable de la porosité.

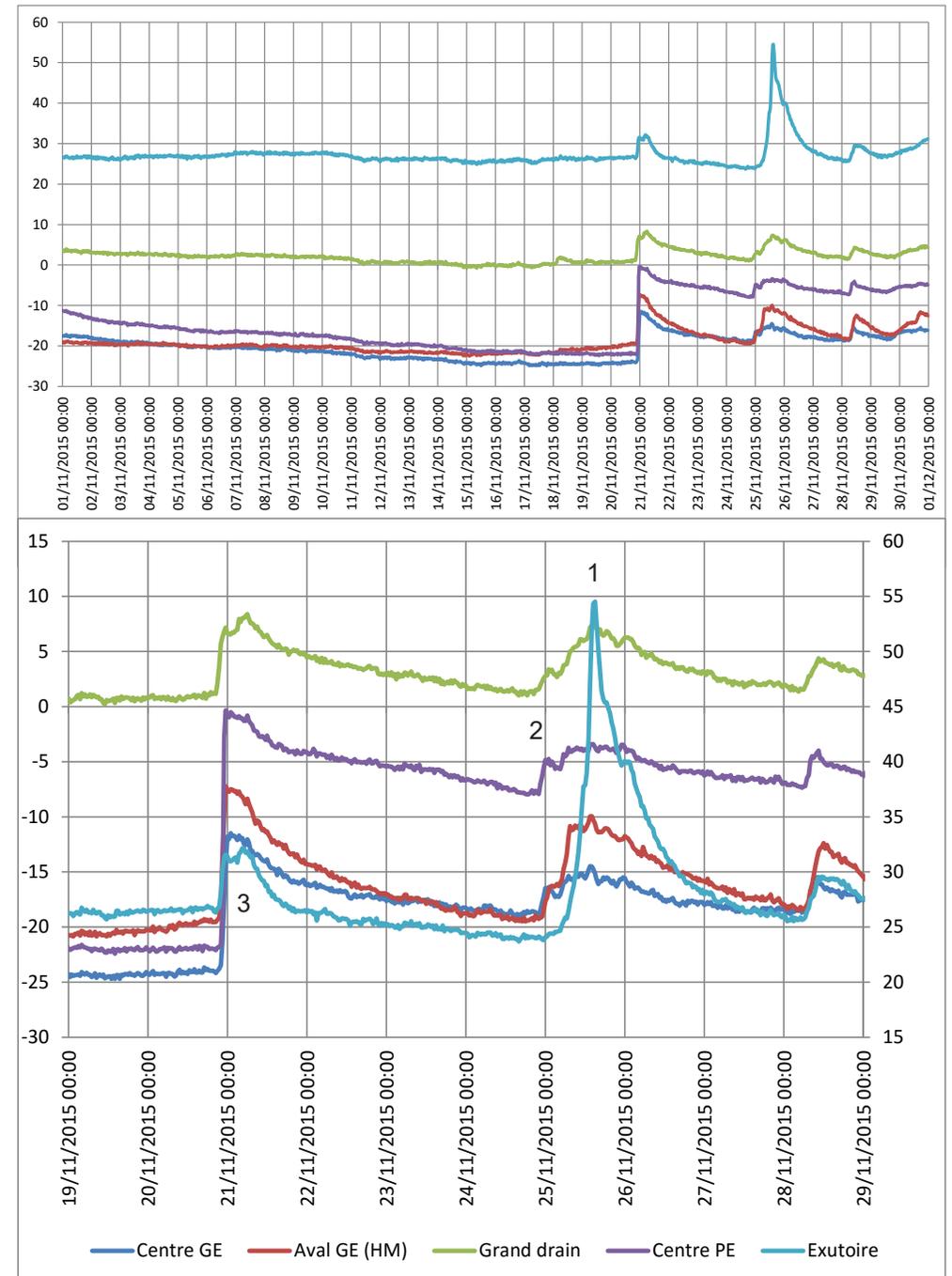


Figure 3-13: en haut, chroniques piézométriques bi-horaires de novembre 2015. Échelle en cm/sol. Étalonnage sur la mesure directe de la nappe au 10/10/2016. En bas, chroniques du 19 au 28 novembre. Échelle de droite spécifique au ruisseau exutoire.

### 3.4.C - Chroniques de décembre 2015

Les chroniques de décembre 2015 montrent des phénomènes complexes de précipitations neigeuses et de fonte (figure 3-14). Le 16, une probable chute de neige marque une hausse générale des niveaux pour les sondes de tourbières hors drain [1] sans grand changement des niveaux de l'exutoire et du drain [2]. Les variations de niveau dans les tourbières du 5 au 9 décembre sont également probablement induites par de la neige et sa fonte [3]. La fonte diurne de la neige couvrant la tourbe provoque une hausse du niveau d'eau qui s'arrête

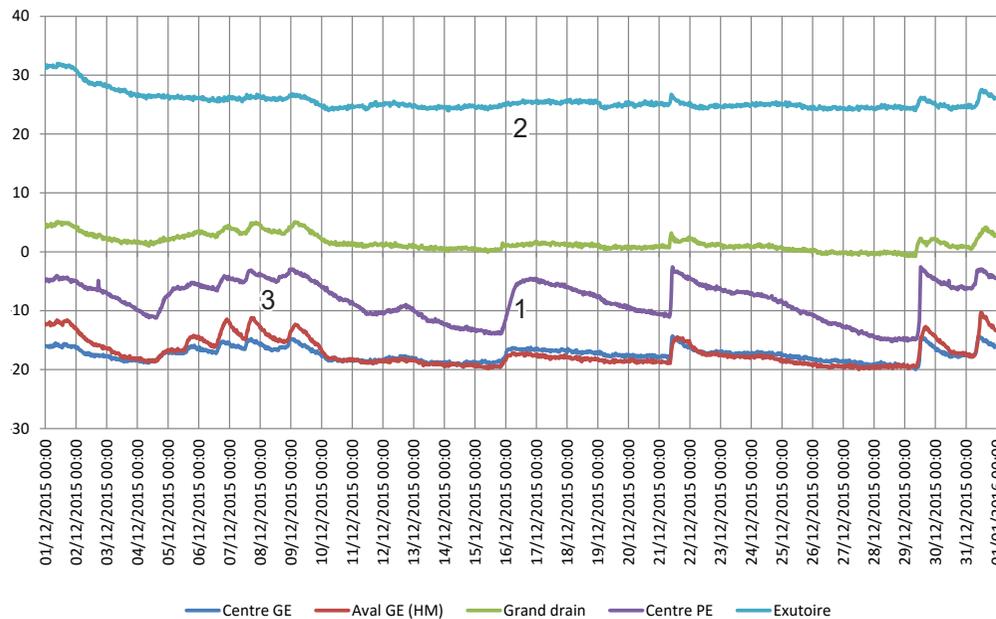


Figure 3-14: chroniques piézométriques bi-horaires de décembre 2015. Échelle en cm/sol. Éta-lonnage sur la mesure directe de la nappe au 10/10/2016.

le soir avec le refroidissement, mais qui reprend le lendemain suivant les mêmes modalités. Le processus est limité aux zones ouvertes, là où la neige se concentre; aucun effet n'est donc observable à l'exutoire, en milieu couvert et drainant un bassin versant forestier.

### 3.4.D - Chroniques hivernales 2016 (janvier, février, mars, avril, mai)

Les chroniques de janvier à mai 2016 (figure 3-15) ne présentent pas d'éléments nouveaux mais confirment les observations de novembre et de décembre.

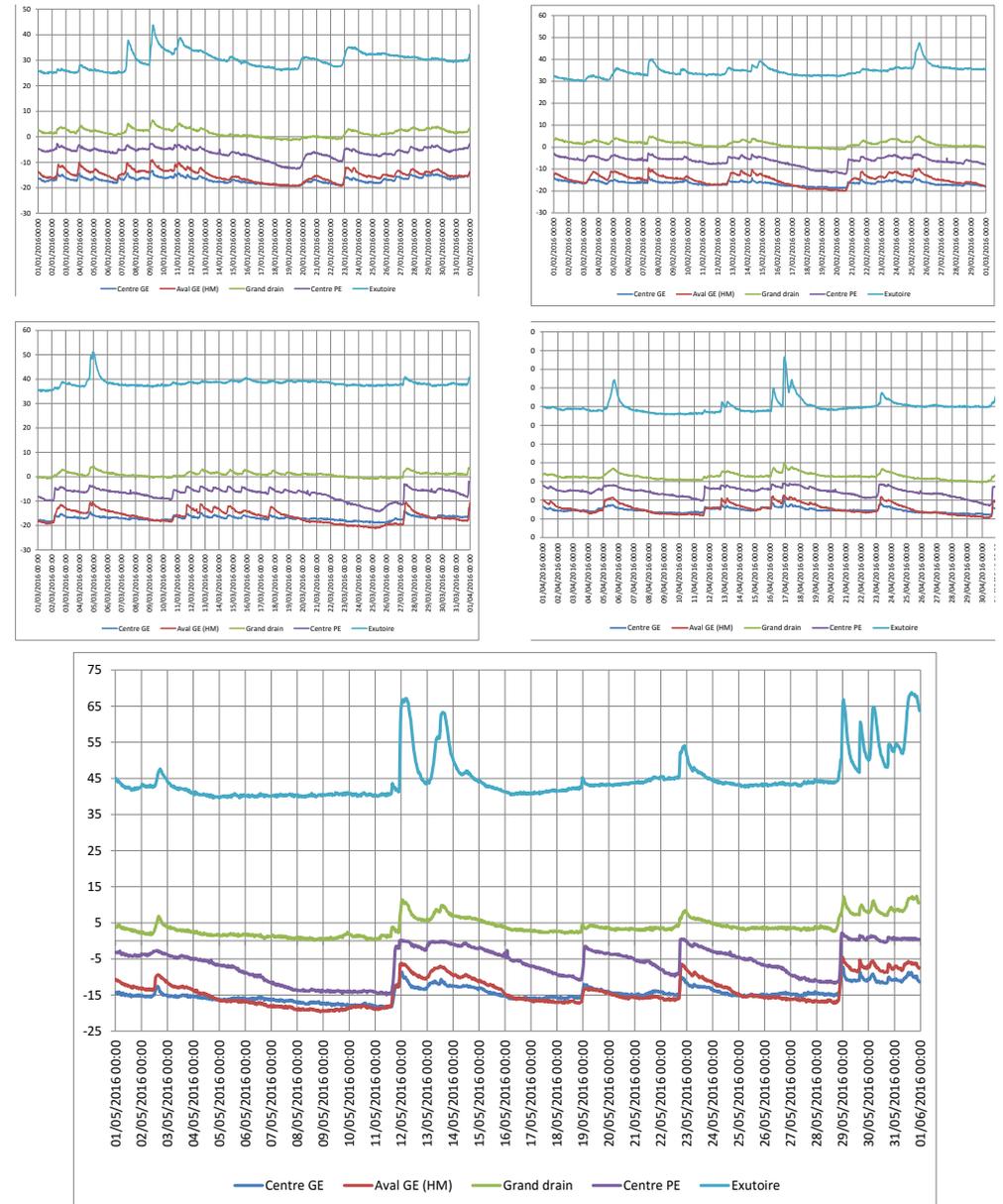


Figure 3-15: chroniques piézométriques bi-horaires de janvier à mai 2016. Échelle en cm/sol. Éta-lonnage sur la mesure directe de la nappe au 10/10/2016.

### 3.4.E - Chroniques de juin 2016

La chronique du ruisseau exutoire de juin 2016 (figure 3-16) montre le pic de décharge annuel le 7 juin autour de 57 cm [1]. Il ne s'agit pas de la hauteur maximale atteinte mais de la hauteur maximale du ruisseau en dehors de pics de crue induit par une précipitation [2]. Ce pic annuel est ainsi situé entre deux pics de crue.

Il est intéressant de constater que le pic annuel est synchrone d'une re-

hausse de la chronique du grand drain et de celle du centre du grand édifice. Le décalage entre un pic de crue et une rehausse progressive ultérieure est de 4 jours [4] et 3,5 jours [5].

### 3.4.F - Chroniques de juillet 2016

Les chroniques de juillet 2016 (figure 3-17) montrent un processus de décharge différée du ruisseau comparable [6], qui est encore plus marqué qu'en juin pour les centres des deux édifices [7]. Le délai entre une précipita-

tion et un maximum de hausse est de 7 jours [8]. Le grand drain et la partie aval du grand édifice fonctionnent de manière différente: le grand drain répond rapidement à une précipitation [9] et la partie aval du grand édifice y répond de manière plus progressive mais dans un délai de quelques heures à deux jours [10].

Les différentes profondeurs de nappe n'expliquent pas ce phénomène de délai, les niveaux ne sont qu'à 10-20 cm de profondeur.

De plus, la courbe du drain montre l'effet nouveau de l'évapotranspiration avec une baisse diurne quasi constante sur la durée du mois [11], à l'exception des jours de pluie [9]. Il apparaît que le niveau remonte la nuit, en compensant partiellement la baisse du jour d'avant. La remontée nocturne semble moindre vers la fin du mois [12]. Ce phénomène d'évapotranspiration n'est pas visible sur les autres courbes. Cela ne veut pas dire qu'il n'existe pas, mais que, potentiellement, la nappe est suffisamment approvisionnée pour ne pas descendre le jour.

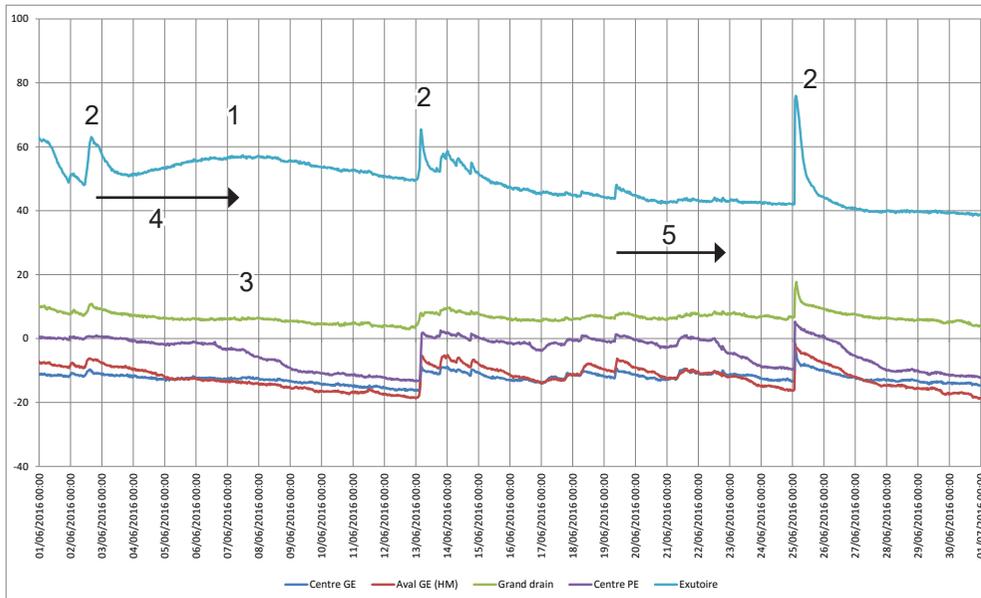


Figure 3-16: chroniques piézométriques bi-horaires de juin 2016. Échelle en cm/sol. Étalonnage sur la mesure directe de la nappe au 10/10/2016.

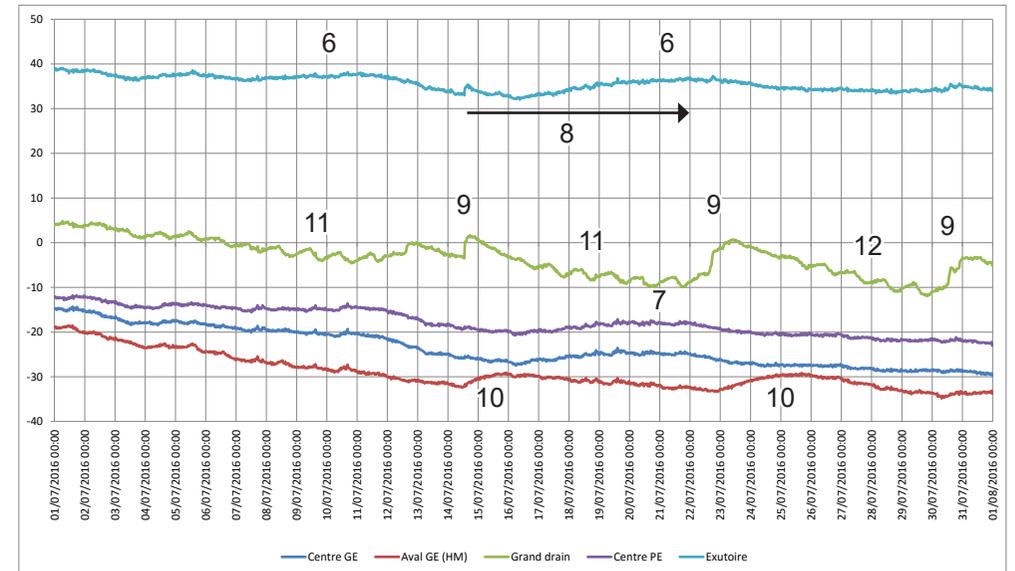


Figure 3-17: chroniques piézométriques bi-horaires de juillet 2016. Échelle en cm/sol. Étalonnage sur la mesure directe de la nappe au 10/10/2016.

### 3.4.G - Chroniques d'août 2016

Les chroniques d'août 2016 (figure 3-18) montrent les mêmes processus de recharge différée avec des temps de réponse de 3,5 [1] et 5 jours [2]. Il est

surprenant de constater des hausses en dehors d'événement de précipitation [3], ce qui pourrait correspondre à des modalités de délai complexe à caractériser à travers une étude statistique spécifique.

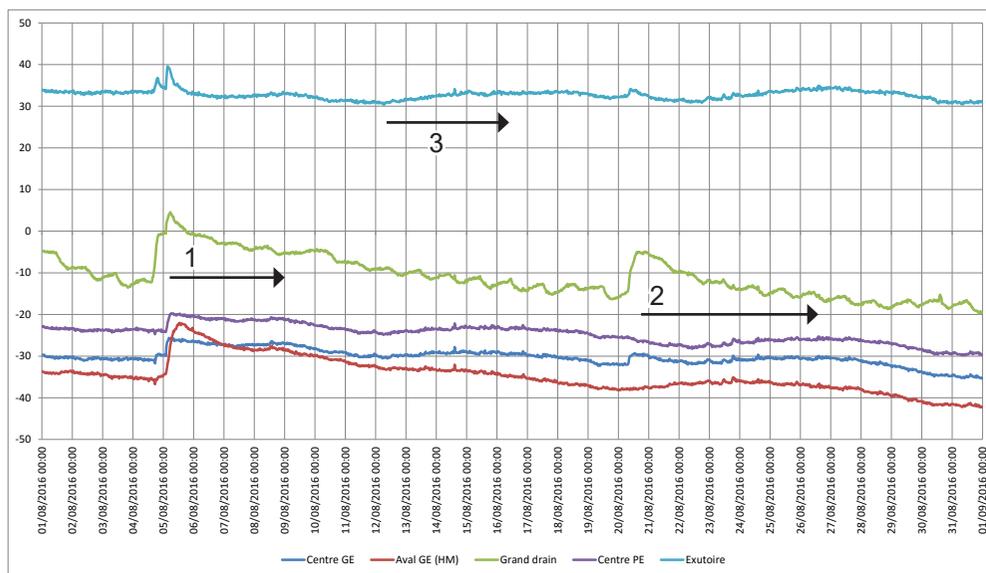


Figure 3-18: chroniques piézométriques bi-horaires d'août 2016. Échelle en cm/sol. Étalonnage sur la mesure directe de la nappe au 10/10/2016.

### 3.4.H - Chroniques de septembre 2016

Les variations de la courbe de l'aval du grand édifice se rapprochent de celles du centre des deux édifices avec des délais de recharge post précipitations comparables.

Le seul élément nouveau apporté par les chroniques de septembre (figure 3-19) est le tarissement de la recharge nocturne du drain [4].

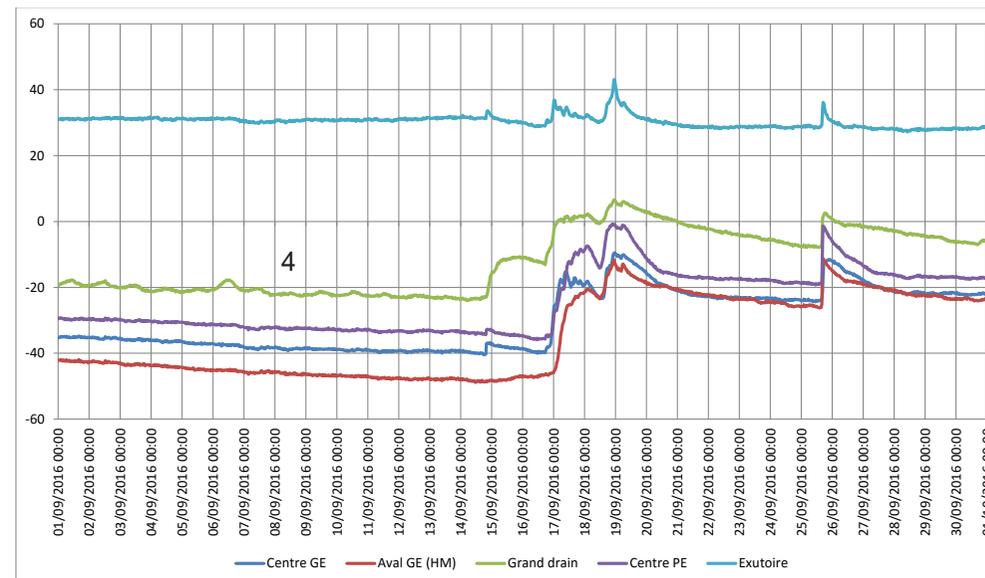


Figure 3-19: chroniques piézométriques bi-horaires de septembre 2016. Échelle en cm/sol. Étalonnage sur la mesure directe de la nappe au 10/10/2016.

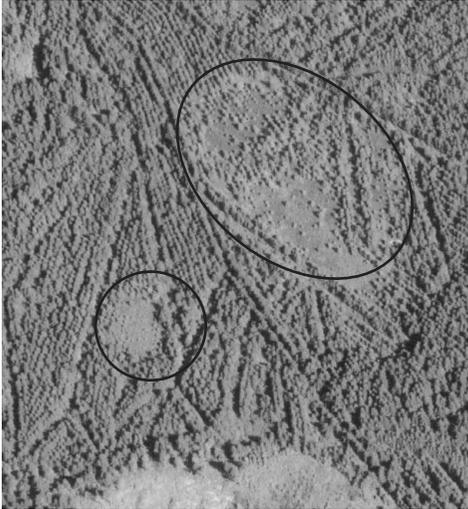


Figure 3-21: photographie aérienne de 1985 avec la délimitation des deux édifices (source IGN).

### 3.5 - Photographies aériennes anciennes

La plupart des photographies aériennes anciennes consultables sur le géoportail ont été analysées: 1946, 1954, 1960, mai 1964, juin 1964, 1974, 1974 infrarouge, 1983, 1984, 1985, 1985 infrarouge, 1987, 1992, 1999, 2000 infrarouge. Parmi elles, seuls les clichés de 1964 et de 1985 sont présentés ici.

Le cliché de 1964 (figure 3-20) montre la nature ouverte, agropastorale, mais déjà fortement drainée des complexes ou plus précisément des secteurs en amont du grand édifice. Le cliché de 1985 montre l'effet des plantations (figure 3-21).



Figure 3-20: photographie aérienne de 1964 avec la délimitation des deux édifices (source IGN).

# 4 - Synthèse fonctionnelle

## 4.1 - Rappels théoriques

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

Les hauts-marais sont des systèmes majoritairement dépendants des précipitations, pouvant fonctionner comme un bas-marais dans des contextes de pauvreté en nutriments des substrats géologiques (sables, grès). Dans tous les cas, ils sont oligotrophes et l'apport de nutriments contribue soit à détruire directement les plantes présentes, soit à rendre ces dernières moins compétitives que celles des bas-marais.

En première approche, pour simplifier, la biomasse aérienne restitue assez bien la richesse trophique d'un milieu. Les tourbières oligotrophes, acides ou alcalines, sont caractérisées par des mousses et des plantes basses graminoides ou ligneuses sempervirentes. Les tourbières plus riches en

nutriments sont caractérisées par des graminoides hautes (formant des «magnocariçales» ou des «roselières») ou des ligneux souvent caduques (saules, bouleaux, aulnes). Dans tous les cas, les arbres indiquent des disponibilités en nutriments accrues, sans pour autant signaler des processus d'assèchement.

Enfin, pour compléter les quelques données théoriques essentielles, il faut indiquer que certaines communautés de tourbières hautes sont indépendantes de toute nappe phréatique: elles sont dites aérohygrophiles. Elles peuvent donc croître sur des substrats étanches comme des rochers ou des tourbes sèches. Ces communautés sont celles rencontrées dans plusieurs secteurs des édifices d'Ayguebonne (secteurs à *S. capillifolium*).

## 4.2 - Les données ou observations essentielles et leur interprétation fonctionnelle

### 4.2.A - L'apport de l'analyse des tourbes

L'analyse des tourbes met en évidence l'existence généralisée de tourbes de bas-marais et localement,

les surmontant, de tourbes de haut-marais. C'est le cas dans la partie aval du grand édifice ou au centre du petit édifice. Il n'y a aucun lien entre le type de tourbe et le type de communauté végétale actuel; autrement dit les communautés d'aujourd'hui ne permettent pas de prédire le type de tourbe sous-jacent. De plus, un horizon de type kultureller Trockenhorizont (KTH) a été observé en divers point du complexe.

Deux données fonctionnelles majeures peuvent être déduites de ces observations: d'une part, les tourbières originelles étaient probablement diversifiées, avec des bas-marais et des hauts-marais, la répartition de chaque type ayant varié au cours de l'histoire et, d'autre part, des usages postérieurs ont profondément modifié ces divers tourbières originelles, des usages dont certains ont permis la mise en place du KTH.

A l'origine, il existe donc deux types fonctionnels majeurs qui traduisent deux fonctionnements hydrologiques distincts. Le premier est celui des bas-marais, avec une alimentation dépendante d'émergences de nappes souterraines, soit directement, soit indirectement, dans ce dernier cas à travers un réseau de ruisselets alimentés par des émergences. Le second est celui des

hauts-marais, alimentés par les précipitations, là encore directement ou indirectement, dans ce dernier cas à travers un réseau de dépressions sur un édifice tourbeux bombé.

### 4.2.B - L'apport de la caractérisation piézométrique

Les données piézométriques mettent en évidence plusieurs types d'apports hydriques qui varient en fonction des lieux et des saisons. Elles mettent aussi en évidence des phénomènes de collecte et de concentration des écoulements, en particulier dans le ruisseau exutoire.

Les chroniques montrent un phénomène typique de montée en charge d'une nappe, voire plusieurs nappes. Ces nappes d'eau se tiennent dans des compartiments rocheux qui communiquent avec la tourbe, l'édifice tourbeux constituant une forme de relais superficiel. Ceci explique pourquoi les chroniques des deux édifices tourbeux montrent des montées du niveau d'eau en dehors de toute pluie et de manière progressive à la hausse comme à la baisse. A ces montées aux formes adoucies, s'ajoutent des hausses subites aux formes abruptes, induites par les précipitations.

Les courbes montrent deux types de hausses correspondant à des décharges de nappes, un type « annuel », parfaitement marqué sur la courbe du ruisseau exutoire qui correspond à une recharge de nappe saisonnière, et un type lié aux précipitations, correspondant à une rehausse de nappe plus rapide de l'ordre de quelques jours à quelques semaines (une analyse statistique sur des périodes longues avec des données pluviométriques locales permettrait de répondre à la question).

La présence d'une nappe alimentant certaines parties des tourbières est également attestée par les chroniques du grand drain, avec des courbes circadiennes typiques.

### 4.3 - Modèle fonctionnel global

Le plus souvent, la restitution de l'analyse fonctionnelle des écosystèmes tourbeux peut se concevoir suivant trois axes: (1) le passé des complexes ou les modalités fonctionnelles fondamentales; (2) l'état actuel, le plus souvent en lien avec les effets de perturbations anthropiques plus ou moins récentes à l'échelle de la durée d'une tourbière et; (3) les états futurs possibles (états potentiels), en fonction des options de gestion « raisonnables » et en particulier celle du laisser-faire qui constitue le potentiel de base.

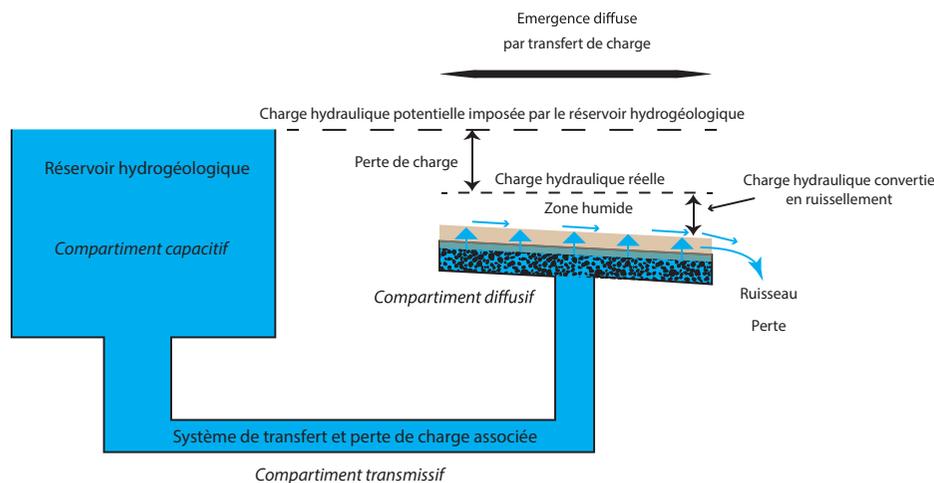


Figure 4-1: modèle théorique d'une zone humide fonctionnant sur le principe d'une émergence diffuse induite par le transfert de charge d'une réserve hydrogéologique locale ou éloignée. Le rôle du compartiment diffusif est essentiel. En son absence, la décharge locale se réalise sous forme concentrée, un système de sources est présent mais pas de zone humide.

#### 4.3.A - Modalités fonctionnelles des tourbières originelles

Les paramètres écologiques qui ont contrôlé la mise en place des tourbières originelles sont déterminants en termes de potentiel. On peut les assimiler aux paramètres de fond, naturels, souvent masqués par des paramètres anthropiques. Ils ont parfois disparus. A ce jour, aucune datation absolue (radio-carbone) n'ayant été réalisée sur le site, l'âge des différents états de la tourbière reste inconnu.

Les données hydrologiques et paléoécologiques convergent vers un modèle assez classique de tourbières basses sur émergence diffuse induite par transfert de charge. Le modèle tient dans la conjonction locale de l'existence d'un dépôt dit diffusif (ici probablement une arène plus ou moins colluvionnée) et d'une nappe d'eau souterraine plus ou moins éloignée (nommé compartiment capacitif). Compartiment diffusif et compartiment capacitif sont connectés par système dit transmissif (figure 4-1). Le compartiment diffusif est à l'origine une formation superficielle dite minérale, au regard d'une formation superficielle dite organique qu'est la tourbe. L'existence de cette formation superficielle minérale est nécessaire, car en son absence, les systèmes d'émergence sont concentrés (il s'agit de sources « classiques », sous forme de filet d'eau sortant du substrat).

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

située plus bas. L'eau émerge de la céramique de manière diffuse et s'écoule suivant la pente. A porosité constante, l'arrêt de l'émergence ne dépend pas de l'épaisseur de la céramique, mais surtout de sa hauteur relative par rapport au réservoir. Il s'agit d'une forme de vase communiquant. 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.

Dans ce modèle, la mise en place d'un tertre tourbeux se réalise à l'endroit de l'émergence diffuse, en constituant une sorte de second compartiment diffusif, en continuité hydrologique avec celui des formations minérales. 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'un ingénierie pédogénétique qu'on peut dénommer litière-rhizome-engorgement (figure 4-2). Contrairement à des systèmes de type hauts-marais où la matière produite est peu décomposable, le sol relativement stable mais peu riche en nutriments disponibles, le système litière-rhizome-engorgement 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.

C'est, dans le cas de ces bas-marais, la productivité alliée à l'engorge-

ment qui constitue la force motrice de la turfigenèse, alors que c'est la résistance à la décomposition qui est celle du haut-marais. Le phragmite et les carex de ce type de bas-marais excluent les compétiteurs par un probable effet de masse, les privant de lumière en période de végétation, et les «enterant» à la chute automnale des parties aériennes. A nouveau, à l'opposé des hauts-marais, la conservation de la biomasse aérienne est faible, la fragmentation et la conversion des fibres en microagrégats est rapide (quelques saisons). C'est pour cela que la tourbe est

en générale équilibrée, avec une moitié de microagrégats et une moitié de fibres issues des systèmes racinaires: rhizomes, racines et radicelles. On note pour ces contextes une présence plus ou moins affirmée de ligneux tels que les bouleaux, les saules ou l'aulne, principalement dans les phragmitaies.

Le modèle présenté ci-dessus s'applique à de nombreux contextes géologiques et géomorphologiques. Dans les contextes granitiques, il se rattache à un autre modèle, celui de référence, proposé par P. Lachassagne, R. Wyns

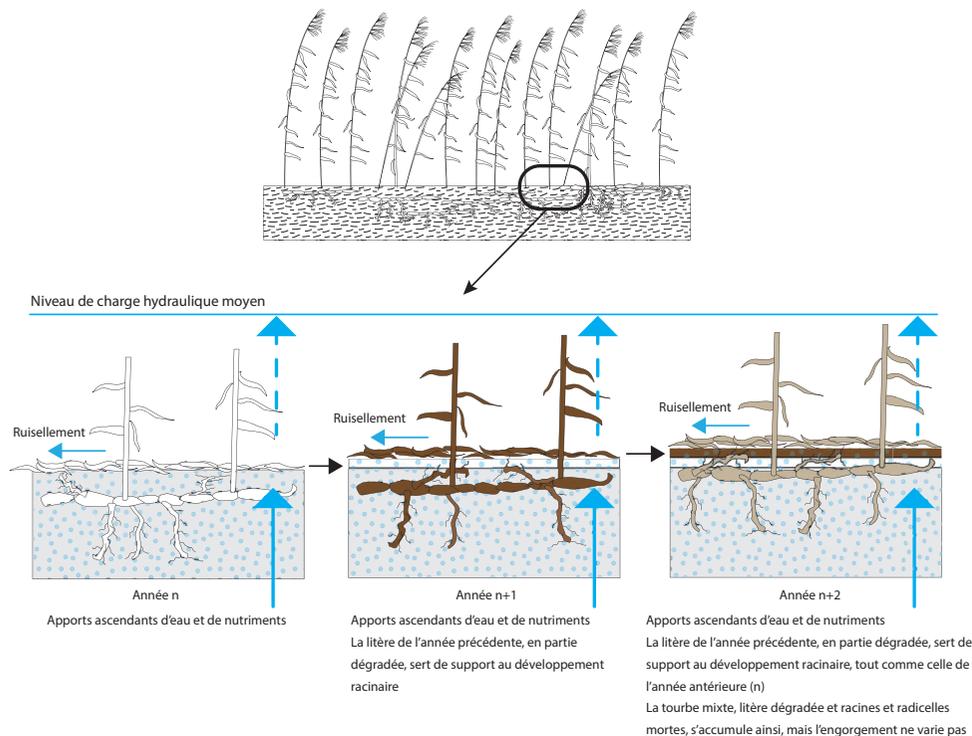


Figure 4-2: processus de construction d'un terre tourbeux par le roseau sous forme de litière-rhizome-engorgement. Le principe est le même pour certains carex.

et leurs collaborateurs (Lachassagne *et al.*, 2001). Ce modèle s'appuie sur une structure composée de trois compartiments géologiques (figure 4-3):

- un compartiment de fond, constitué de roche saine traversée de zones de fractures majeures (roche saine);
- un compartiment de surface constitué des matériaux d'altération de la roche sous-jacente, des arènes dans la majorité des cas de moyenne montagne en France (altérites);
- un compartiment intermédiaire fracturé et en partie altéré (zone fissurée-altérée).

Les propriétés de stockage et de circulation de l'eau au sein de chacun des compartiments sont différentes. La roche saine ne constitue pas un réservoir d'eau notable mais les zones

de fracture permettent une circulation rapide de l'eau. A cause de ces fractures, ce compartiment correspond au compartiment transmissif, il «transfère» l'eau d'un compartiment à un autre. Les altérites constituent un compartiment de stockage important, en particulier lorsqu'il s'agit d'arènes riches en sables (c'est le cas lorsque les argiles ont migré vers le fond de vallon). Les altérites forment ainsi un compartiment dit «capacitif», une réserve hydrogéologique. Le volume de cette réserve hydrogéologique va dépendre de sa porosité et de son épaisseur. Le compartiment intermédiaire se caractérise par la présence d'un système de fissures horizontales provoquées par une altération des micas. Ce compartiment est donc fortement lié aux processus de formation des arènes et suit la géométrie du front d'altération. Il possède à la fois les propriétés de stockage des altérites (porosité) et les propriétés de

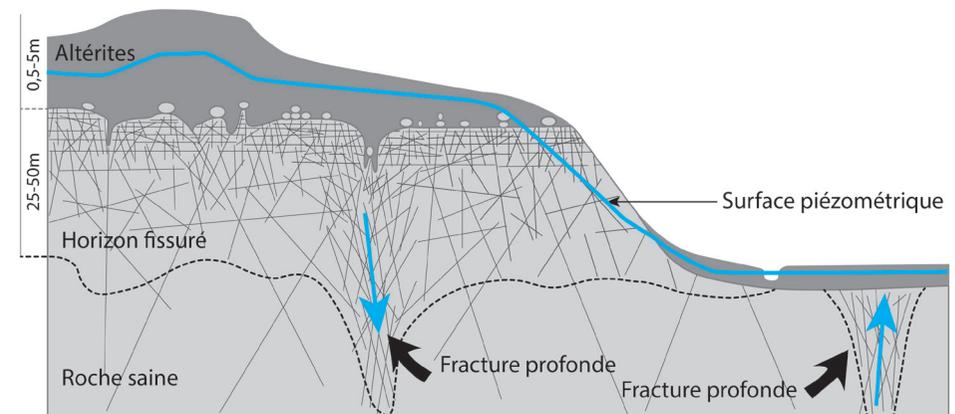


Figure 4-3: représentation schématique des différents compartiments d'un système hydrogéologique en contexte cristallin (granites et roches associées). Modifié de Maréchal *et al.*, 2003.

transfert de la roche saine à travers son réseau de fissures majoritairement horizontales, mais avec suffisamment de fractures verticales pour transférer l'eau des altérites aux fractures de la roche saine. Il constitue souvent la couche la plus riche en eau.

Le socle cristallin et son altérite constituent donc un aquifère composite au sein duquel la géométrie des circulations d'eau va dépendre en premier lieu de la structure tridimensionnelle du manteau d'altération et du réseau de fractures du socle sain. Cette géométrie sera à mettre en relation avec les zones d'émergences, objets déterminants pour les zones humides.

L'application de ces modèles aux tourbières d'Ayguebonne est relativement simple. Ainsi, il apparaît fort probable que les leucogranites du bassin versant jouent un rôle capacitif important. Le système de failles supposées important indiqué sur la carte géologique est organisé suivant une logique très favorable à la transmission des écoulements à partir du stock des leucogranite vers le fond de vallon, dans le secteur des tourbières. Enfin, l'axe du Forez est assez couramment le lieu de dépôt d'arènes ou d'autres formations superficielles favorables à la diffusion des écoulements.

Les données paléocologiques sont en accord avec ces modèles. Les tourbes de bas-marais constituent à la fois le produit de la turfigenèse et un compartiment diffusif qui s'ajoute aux formations superficielles minérales.

Les données piézométriques sont elles aussi conformes à un modèle d'émergence diffuse par transfert de charge. On peut penser des données que le compartiment capacitif (ou un des compartiments de ce type) se recharge à partir de début janvier et jusque début juin. Son niveau de charge hydraulique augmentant, la quantité d'eau qui émerge augmente elle aussi, de manière d'autant plus marquée qu'elle se concentre dans le lit du ruisseau exutoire. La plupart des pluies contribuent également de manière ponctuelle au débit, en particulier en hiver où les interceptions forestières sont moins importantes. Le niveau de charge de l'aquifère mère (le compartiment capacitif) n'atteint l'altitude équivalente du sol de la tourbière (qui est bombée) qu'à partir du mois de mai. Les rehausses douces, de durée de quelques jours, et qui semble suivre des précipitations sont plus difficiles à expliquer, bien qu'elles dépendent du même processus de remplissage d'un compartiment capacitif et de transfert de charge. La question qui se pose est celle de la diversité des aquifères mères et du délai réel entre une pluie de recharge et une restitution à l'émergence. En réalité, il s'agit du délai entre la pluie et l'infiltration de la lame d'eau jusqu'à la nappe mère, et non du transit de l'eau du sol à l'émergence. C'est en fait la pression appliquée par la lame d'eau de la précipitation qui va transmettre une pression à l'émergence et provoquer ainsi une hausse de niveau. Cette vitesse de transmission de la pression est théoriquement celle du son dans l'eau, soit 1500 m/s.

Sur ces principes de transmission instantanée de la pression et si on considère le fonctionnement le plus simple, le délai entre une pluie et son intégration à la nappe mère est systématiquement de deux jours pour le premier effet et dure entre 3,5 et 7 jours.

L'alimentation en eau de la zone humide initiale apparaît particulièrement pérenne au cours de l'année, à l'exception d'un étiage à la fin du mois d'août et en septembre. Ce sont bien-sûr des conditions idéales pour la mise en place d'une tourbière, et l'eau provenant de nappes, il est logique que les communautés originelles soient riches en carex, phragmite et ligneux de type aulne ou bouleaux et saules.

Cependant, les tourbières basses ne constituent qu'une part des tourbières présentes à Ayguebonne, une partie des tourbes provenant de communautés proches de celles des tourbières hautes. La question qui se pose est donc celle de l'origine de ces communautés. Une première remarque importante est le caractère atypique du contenu en macrorestes, puisque c'est la linaigrette engainante seule qui imprime le caractère oligotrophe ombrotrophe des communautés; les sphaignes rouges ou marrons typiques étant absentes. Il est donc certain que les conditions à l'époque du dépôt ne sont pas celles typiques des hauts-marais. Plusieurs hypothèses peuvent être proposées. Il est ainsi possible que la tourbe à linaigrette engainante du grand édifice résulte du remplissage d'une fosse de tourbage. Cependant, aucun

horizon typique de fosse de tourbage n'a été détecté malgré une recherche spécifique, et la présence des mêmes tourbes sur le petit édifice, lieu peu propice à la réalisation d'une fosse, n'est pas favorable à cette hypothèse. L'autre possibilité est celle d'un changement dans le bilan des apports météoriques et des apports de nappes dans les secteurs les moins propices au transfert de la charge hydrique de la nappe mère. On peut ainsi imaginer qu'à partir d'une certaine épaisseur de tourbe, qui varie suivant les lieux pour des raisons de variation dans la structure du compartiment diffusif, les apports de nappes ne sont plus possibles, car l'équilibre des charges est atteint. Les apports météoriques deviennent donc prédominants, ce qui provoque une baisse dans les apports en nutriments qui va profiter à la linaigrette, spécialiste de l'oligotrophie, en particulier en phosphore. Vu l'absence de sphaignes rouges ou marron, il est probable que le basculement ne soit pas total, mais qu'il s'agisse d'une forme de prédominance des eaux de pluie dans le bilan global. La linaigrette est probablement adaptée pour s'établir dans des secteurs où les apports de nappes sont présents mais en quantité insuffisante pour les plantes de bas-marais. Ainsi, on la trouve souvent en horizon de transition entre des tourbes de bas-marais et des tourbes de hauts-marais.

On peut ainsi penser que les tourbes à linaigrette d'Ayguebonne correspondent à des secteurs limités en eau de nappe, mais qui n'en sont pas totalement dépourvus.

### 4.3.B - Fonctionnement actuel

Les tourbières d'Ayguebonne fonctionnent aujourd'hui sur des modalités différenciées suivant les lieux, mais majoritairement comme des communautés de tourbières ou de landes sur KTH (voir l'encart ci-dessous pour une description du KTH) et tourbe d'origine diverses. Ainsi, les données pédo-logiques, paléoécologiques et piézo-métriques convergent vers un modèle classique de perturbation profonde du fonctionnement originel, décrit juste avant, à travers la mise en place d'un horizon de surface d'altération et d'une baisse du niveau de charge potentiel.

Les communautés les plus répandues aujourd'hui sont caractéristiques de milieux oligotrophes et la topographie permet de dire qu'ils sont ombrotrophes. L'analyse des chroniques piézométriques permet d'affirmer que les plantes présentes ne dépendent pas de la nappe, aucune influence de l'évapotranspiration n'a été détectée, au contraire du grand drain où cela était

évident. Ce comportement piézométrique est caractéristique des secteurs de tourbières hautes à éricacées et sphaignes. Il correspond à la stratégie de conservation de la nappe nécessaire dans des secteurs de faible disponibilité hydrique. Les sphaignes et les autres mousses n'ont pas capacité à extraire l'eau en profondeur car elles n'ont pas de systèmes vasculaires. Les éricacées ne montrent pas de système racinaire profond, elles privilégient les niveaux les mieux aérés du sol, en surface; elles n'épuisent pas la nappe comme le font les graminoides telles que la molinie.

Cette indépendance des plantes par rapport à la nappe est en accord avec la nature aérohygrophiles des sphaignes présentes.

D'autres secteurs sont occupés par des communautés plus exigeantes en eau, en particulier au niveau du drain et à la périphérie aval du grand édifice. Ces communautés puisent l'eau de la nappe qui émerge à cet endroit.

La colonisation ligneuse ne semble en rien liée à des processus hydrologiques purs, car les ligneux sont présents quel que soit le type hydrique: tourbière haute ou drain. Le déterminisme des ligneux est certainement relatif à divers processus qui font appel à la disponibilité en nutriments et à l'impact des produits phytotoxiques (allélopathie) des éricacées plus ou moins efficace suivant les lieux. Si on se réfère à des sites comparables non drainés et non plantés, il est possible d'attribuer les causes de colonisation ligneuse à des processus de pédogenèse. Ainsi, on peut penser que les ligneux profitent d'un arrêt du pâturage et d'un horizon de type KTH en partie modifié par les plantations d'épicéas des années 1960-1970.

Si de l'eau est encore présente à faible profondeur, on ne peut pas non plus exclure un changement plus ou moins ancien du niveau d'équilibre de transfert de charge hydrique entre le cœur des tourbières et la nappe mère. Les chroniques piézométriques

montrent nettement que les transferts de charges sont actifs, mais qu'ils ne permettent pas, au moins en été, de monter la nappe à moins de 20-40 cm de la surface. Est-ce un effet lié au niveau atteint par la nappe mère ou un effet des drains? D'après les données scientifiques sur les vitesses d'écoulement dans les tourbes, il semblerait que le niveau de la nappe mère soit en cause. On constate, par exemple, que les niveaux d'eau près du grand drain au centre du grand édifice, sont plus hauts que ceux du secteur plus éloigné de ce grand drain à l'aval. Ceci ne signifie pas que le système de drainage n'a pas d'effet sur l'ensemble du secteur d'émergence (tourbeux ou non tourbeux), mais que cet effet est moindre dans les secteurs de tourbe épaisse, là où les enjeux de conservation des habitats sont grands. Malheureusement, il est difficile de définir plus précisément le rôle du niveau de la nappe mère sur les communautés actuelles, car d'autres paramètres écologiques entrent en jeu, comme les héritages pédologiques mentionnés antérieurement.

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 de bois. 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. Le plus souvent, il 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. Localement, on trouve aussi des zones à KTH double, où deux horizons densifiés, sombres, à passage inférieur progressifs 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 permettre à des communautés acides oligotrophes de croître sur des tourbes alcalines (Goubet, 2011a; 2011b).

### 4.3.C - Etats potentiels

L'état actuel de la tourbière est fortement lié à un héritage fonctionnel. La détermination des états potentiels en fonction de diverses options de gestion se heurte à la faible connaissance scientifique des processus induits par ces héritages et à l'absence d'évaluation d'expériences de gestion prenant en compte le concept.

Si on se réfère à l'état passé antérieur à la mise en place d'usages agro-

pastoraux perturbateurs et en dehors de l'hypothèse de fosses de tourbage, la tourbière devait être occupée par des bas-marais boisés laissant ponctuellement la place à des ériophorales à linaigrette engainante. On peut voir dans l'état actuel de la tourbière une forme de réminiscence de la tourbière ancienne, même si aucune continuité écologique n'est possible: il s'agit juste de circonstances favorables au retour des communautés. Sans intervention, l'état futur qui semble se profiler est donc celui d'une tourbière majoritairement occupée par

des boulaies, localement à sphaignes, éventuellement parsemées de secteurs de type haut-marais à linaigrette engainante et sphaignes rouges. Cependant, rien n'indique que les secteurs à linaigrette et sphaignes rouges ne seront pas, au final, colonisés eux-aussi par les ligneux hauts. Malheureusement, nous ne connaissons pas de moyen sûr pour éviter cette colonisation et les tentatives de neutralisation des ligneux sur le site n'ont pas montré d'efficacité à long terme.

Un autre état potentiel est celui correspondant à la période agropastorale avec des végétations ouvertes, probablement riches en espèces de prairie à joncs dans les parties les plus humides et peut-être de tourbières hautes pâturées dans les parties ombrotrophes. Cet état découle d'un pâturage bovin ou équin dont les modalités fines resteraient à déterminer et à adapter en fonction des premiers résultats.

## 5 - Problématique de conservation

Les tourbières d'Ayguebonne sont particulièrement perturbées; l'héritage pédologique est grand, à la fois à travers des perturbations topographiques comme des drains et des modifications de la structure des sols. La dynamique originelle, centrée sur le fonctionnement de bas-marais à carex alimentés par des émergences diffuses issues de transferts de charge d'une nappe mère non identifiée n'est plus de mise. Les données piézométriques indiquent que les transferts d'eau de la nappe vers la surface sont encore effectifs mais qu'ils n'atteignent plus la surface, sauf en dehors des secteurs de tourbières hautes (ce qui est tout à fait logique). Même si les tourbières originelles étaient choisies comme état cible d'une stratégie de conservation, toute restauration resterait expérimentale, avec un travail de rattrapage altimétrique de la cote du ni-

veau imposée par la charge de la nappe mère (décapage d'une trentaine de centimètres).

L'origine des communautés de tourbières hautes actuellement présentes et considérées comme de valeur patrimoniale (Habitat d'intérêt communautaire prioritaire 7110\* et 7120) est la destruction par les usages pastoraux et sylvicoles des communautés de bas-marais originelles. Il est possible que, localement, des communautés de tourbières hautes atypiques, à linaigrette engainante aient prospéré au sein des bas-marais, mais ceci reste flou.

La stratégie de conservation montre donc un certain paradoxe d'avoir à conserver ou restaurer des communautés patrimoniales qui découlent d'une forme de perturbation de communautés

non patrimoniales, mais d'intérêt fonctionnel non négligeable (zone humide tourbeuse). A ce paradoxe, s'ajoute une difficulté supplémentaire induite par les fortes perturbations récentes à vocation sylvicoles (drainage et plantation). Il s'agit donc de restaurer de perturbations récentes des communautés induites par des perturbations anciennes; le tout dans un contexte scientifique encore peu fiable.

Nous proposons donc une stratégie sur deux échelles temporelles. A court terme, le laissez-faire, dans l'optique de permettre au système un réajustement fonctionnel après la perturbation sylvicole. Il s'agit d'attendre la mise en place d'unités en équilibre avec la colonisation ligneuse actuelle et le potentiel minerotrophe comme des saulaies-boulaies, tout en laissant la possibilité de

s'installer durablement à des communautés de tourbière haute à linaigrette engainante et sphaignes rouges sur les tourbes anciennes à linaigrette ou sur les KTH les plus épais. On peut rappeler que les boulaies à sphaignes sont d'intérêt communautaire prioritaire et possèdent donc le même statut patrimonial que les tourbières hautes. Dans ce cadre de gestion, la coupe systématique des épicéas encore jeune est à réaliser. Sur le moyen terme (15-20 ans), dans le cas d'un échec de la première option et en fonction des résultats de la recherche sur le sujet, nous proposons une action de restauration globale à travers des coupes et des profilages topographiques visant à égaliser le niveau du sol avec la charge hydraulique imposée par la nappe mère. Les communautés potentielles dans ce cas sont les boulaies à sphaignes.

## 6 - Conclusion-résumé

La plupart des données nécessaires au diagnostic fonctionnel des tourbières d'Ayguebonne sont maintenant acquises (topographie, unités fonctionnelles, sols, paléoécologie, logiques de transferts hydriques). L'origine des complexes peut être déterminée, les paramètres écologiques qui contrôlent l'état actuel également.

Le site se décompose en deux édifices distincts nommés grand (0,9 ha) et petit (0.18 ha) édifices.

L'état actuel de la tourbière correspond majoritairement à une mosaïque de vaccinaies ou callunaies à pleurocarpes et de callunaies à *Sphagnum capillifolium*. Les bouleaux sont présents sous forme de perchis plus ou moins denses. Dans des secteurs déprimés se tiennent des replats à *S. magellanicum*. *Eriophorum vaginatum* est localement présent, mais pas toujours dans les secteurs à sphaignes rouges.

Un grand drain occupé par une cariçaie à *Carex rostrata* et *Sphagnum fallax* coupe le grand édifice. De plus petits drains sont présents, occupés par *S. papillosum*.

L'édifice tourbeux de 2 m d'épaisseur au maximum est constitué des tourbes à carex, contenant localement du phragmite. Au centre du petit édifice et au tiers aval du grand, des tourbes atypiques à *Eriophorum vaginatum* sans sphaignes rouges sont présentes en surface.

Le complexe a été récemment fortement perturbé par des plantations d'épicéas (1970-1980), et plus anciennement perturbé par le pâturage. L'héritage pédologique n'est pourtant pas aussi marqué que pour certaines tourbières de ce type; le KTH n'est pas partout présent sous une forme caractéristique.

Les données piézométriques et pa-

léoécologiques indiquent une alimentation hydrique originelle par transfert de charge d'une ou de nappes non identifiées mais encore actives dans certains secteurs. Cependant, la topographie, le sol et le niveau de charge hydraulique semblent trop perturbés pour permettre la remise en place des communautés des bas-marais d'origine. L'état actuel semble plus favorable aux communautés de tourbières hautes sur KTH, landes ou boisements.

La dynamique actuelle présume de la mise en place de saulaies-boulaies à sphaignes éventuellement ponctuées de secteur à *Eriophorum vaginatum* et sphaignes rouges.

Nous préconisons, dans un premier temps, de laisser faire en visant la mise en place d'une mosaïque de boulaies à sphaignes sur les tourbes de bas-marais et de communautés de tourbière haute sur les tourbes à linai-

grette engainante. L'action de gestion directe principale dans ce cas serait la coupe systématique des épicéas avant qu'il n'atteignent 1 m. Dans le cas où cette stratégie de laisser-faire ne permettrait pas l'installation durable des communautés ciblées, une restauration globale de la topographie sur le niveau de charge hydraulique imposée par les nappes mère pourrait être tentée. Dans ce cas, les communautés attendues seraient des bas-marais à saules et bouleaux assimilables aux boulaies à sphaignes de la directive (91DO\*).

La réalisation de trois ou quatre datations au radiocarbone (<sup>14</sup>C) permettraient de caler le modèle paléoécologique et définir l'âge des tourbières et des différents états qui s'y sont succédé.

La page suivante présente les résultats du diagnostic fonctionnel sous forme de fiche synthétique.

# Fiche synthétique de diagnostic fonctionnel d'écosystème tourbeux

Version 1.0

<b>Nom du complexe:</b> <b>Nom du site/métacomplexe:</b> <b>Gestionnaire du site:</b> <b>Statut du site:</b> <b>Lien INPN:</b>	Ayguebonne grand et petit édifices Ayguebonne Office national des forêts N2000 FR8301051 <a href="https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/FR8301051">https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/FR8301051</a>	<b>Etat:</b>  Le site se décompose en deux édifices distincts nommés grand (0,9 ha) et petit (0.18 ha) édifices. L'état actuel de la tourbière correspond majoritairement à une mosaïque de vaccinaies ou callunaies à pleurocarpes et de callunaies à <i>Sphagnum capillifolium</i> . Les bouleaux sont présents sous forme de perchis plus ou moins denses. Dans des secteurs déprimés se tiennent des replats à <i>S. magellanicum</i> . <i>Eriophorum vaginatum</i> est localement présent, mais pas toujours dans les secteurs à sphaignes rouges. Un grand drain occupé par une cariçaie à <i>Carex rostrata</i> et <i>Sphagnum fallax</i> coupe le grand édifice. De plus petits drains sont présents, occupés par <i>S. papillosum</i> .	<b>Modèle de fonctionnement:</b>  Le complexe a été récemment fortement perturbé par des plantations d'épicéas (1970-1980), et plus anciennement perturbé par le pâturage. L'héritage pédologique n'est pourtant pas aussi marqué que pour certaines tourbières de ce type; le KTH n'est pas partout présent sous une forme caractéristique. Les données piézométriques et paléoécologiques indiquent une alimentation hydrique originelle par transfert de charge d'une ou de nappes non identifiées mais encore actives dans certains secteurs. Cependant, la topographie, le sol et le niveau de charge hydraulique semblent trop perturbés pour permettre la remise en place des communautés des bas-marais d'origine. L'état actuel semble plus favorable aux communautés de tourbières hautes sur KTH, landes ou boisements.
<b>Auteur(s) du diagnostic:</b>  <b>Dates de la fiche:</b>	Pierre Goubet (version 1.0)  Novembre 2016 (version 1.0)	<b>Etats passés:</b>  L'édifice tourbeux de 2 m d'épaisseur au maximum est constitué des tourbes à carex, contenant localement du phragmite. Au centre du petit édifice et au tiers aval du grand, des tourbes atypiques à <i>Eriophorum vaginatum</i> sans sphaignes rouges sont présentes en surface.	<b>Type fonctionnel:</b>  Les diagnostics fonctionnels des tourbières du Forez sont trop rares pour permettre l'élaboration d'une typologie fonctionnelle du secteur et le rattachement des tourbières d'Ayguebonne à un type.
<b>Outils du diagnostic utilisés - données disponibles</b>  <b>- Volet structure</b>  - Topographie de surface et de subsurface: profils à la lunette de chantier (Goubet, 2005), MNT à 10 m du CRAIG (Goubet, 2016), sondages à la perche (Goubet, 2005). - Description et cartographie des UF (Goubet, 2005). - Caractérisation pédologique de terrain (Goubet, 2016).  <b>- Volet diachronie</b>  - Paléoécologie de terrain avec analyse des macrorestes ponctuelles (Goubet, 2016). - Analyse des photographies aériennes anciennes (Goubet, 2016).	<b>- Volet transferts</b>  - Suivi piézométrique (30'-1 an) sur 5 points (Goubet, 2016).  <b>Données manquantes</b>  - Datations radiocarbones du démarrage de la turfigenèse initiale et de celle de l'ériophoraie à <i>Eriophorum vaginatum</i> .	<b>Etats potentiels:</b>  La dynamique actuelle présume de la mise en place de saulaies-boulaies à sphaignes éventuellement ponctuées de secteur à <i>Eriophorum vaginatum</i> et sphaignes rouges.	<b>Remarques complémentaires:</b>  Aucune.

## Documents de référence:

Goubet P. (2005) - Compte rendu d'expertise. Diagnostic écologique. Tourbière d'Ayguebonne. Vollore-Ville, 63. Herbiers Universitaires de Clermont-Ferrand, 20 p. Commande Office National des Forêts.  
Goubet P. (2016) - Compte rendu d'étude commandée par la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement Auvergne. Etat des lieux fonctionnel de la tourbière d'Ayguebonne (Vollore-Ville, Puy-de-Dôme). Cabinet Pierre Goubet, Ardes-sur-Couze, 28 p.

# 7 - Bibliographie

Goubet P. (2005) - Compte rendu d'expertise. Diagnostic écologique. Tourbière d'Ayguebonne. Vollore-Ville, 63. Herbiers Universitaires de Clermont-Ferrand, 20 p. Commande Office National des Forêts.

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

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

Goubet P. (2016) - Compte rendu d'étude commandée par la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement Auvergne. Etat des lieux fonctionnel de la tourbière d'Ayguebonne (Vollore-Ville, Puy-de-Dôme). Cabinet Pierre Goubet, Ardes-sur-Couze, 28 p.

Lachassagne P., Wyns R., Bérard P., Bruel T., Chéry L., Coutand T., Desprats J.-F. & Le Strat P. (2001). Exploitation of high-yields in hard-rock aquifers: downscaling methodology combining GIS and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. *Groundwater*, 39(4), 568-581.

Sjögren P., van der Knaap W.O., van Leeuwen J.F.N., Andric M. and Grünig A. (2007) - The occurrence of an upper decomposed peat layer, or "kultureller Trockenhorizont", in the Alps and Jura Mountains. *Mires and Peat*, Volume 2 (2007), Article 05, <http://www.mires-and-peat.net/>, ISSN 1819-754X



GOUBET P. (2016). Compte rendu d'étude commandée par la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement Auvergne. Etat des lieux fonctionnel des tourbières d'Ayguebonne (Vollere-Ville, Puy-de-Dôme). Cabinet Pierre Goubet, Ardes-sur-Couze, 28 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 - <http://www.sphagnum.fr>**  
**Siret : 49539019700020**  
**N° TVA intracommunautaire : FR41495390197**