

Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des Zones Humides de Têtes de Bassins (ZHTB) dans le soutien d'étiage des cours d'eau

*Recherche de références dans les contextes très contrastés
du bassin du Rhône*

Typologie des zones humides (typologies de références et nomenclatures,
typologies hydrogéomorphologiques)
Méthodes de caractérisation du soutien d'étiage (bilans hydrologiques)
Choix des sites d'étude

Rapport final

Phase 1 (2016-2017)

Action n°51

UMR CNRS 5600 EVS Mines Saint-Etienne, département PEG (Didier Graillot,
Frédéric Paron, Jordan Ré-Bahaud)

Décembre 2017

Fiche signalétique

Destinataires du document : AE-RMC, Zabr

Coordonnées complètes :

- Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée et Corse (AE-RMC) 2-4, Allée de Lodz 69 363 Lyon Cedex 07 ;
- Zone Atelier Bassin du Rhône (Zabr) 66, boulevard Niels Bohr - BP 2132 - 69 603 Villeurbanne Cedex.

Interlocuteurs : Laurent Cadilhac et François Chambaud

Date : Décembre 2017

Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des Zones Humides de Têtes de Bassins (ZHTB) dans le soutien d'étiage des cours d'eau

Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône

Statut du rapport :

Version de travail	○
Version provisoire	○
Version intermédiaire	○
Version finale (phase 1)	☺

Auteurs :

- UMR CNRS 5600 EVS Mines Saint-Etienne PEG (Didier Graillot, Frédéric Paran, Jordan Ré-Bahuaud)

Contact : frederic.paran@mines-stetienne.fr

Comité de pilotage :

- AE-RMC : Laurent Cadilhac, François Chambaud, Émilie Lunaud, Martin Pignon, Nadine Bosc-Bossut, Joël Hervo, Lionel Perrin, Cécile Zys
- CEN : Delphine Danancher, Jérôme Porteret
- UMR 5600 EVS : Hervé Cubizolle

Données : -

Financements complémentaires : aucun

Nombre d'exemplaires édités : 20

Diffusion : Zabr / AE-RMC

Nombre de volumes : 1

Nombre de pages du rapport hors Annexes : 121

Nombre d'illustrations hors Annexes : 45 figures et 37 tableaux

Nombre d'Annexes : 9

Mots clés : zones humides, têtes de bassins versants, soutien d'étiage, typologie, bilan hydrologique, critères de répartition

Table des matières synthétique

Fiche signalétique.....	I
Table des matières synthétique	III
Résumé	V
Acronymes, sigles et abréviations.....	VII
Préambule.....	IX
INTRODUCTION	1
1. Objectifs et planification du projet	1
2. Organisation du rapport phase 1 (2016-2017)	3
PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides	5
1. Définitions, sources et dictionnaire de données.....	5
2. Typologies de référence des zones humides.....	11
3. Outils, critères et indicateurs pour localiser, identifier, caractériser et étudier les zones humides.....	36
PARTIE II – Méthodes pour la caractérisation du rôle hydrologique des zones humides	41
1. Bilan hydrologique des zones humides.....	41
2. Hydrologie des zones humides tourbeuses	46
3. Méthodes d'investigation et de mesures.....	65
PARTIE III – Synthèse bibliographique et enseignements	73
1. Synthèse partie I : définitions et typologies.....	73
2. Synthèse partie II : méthodes de caractérisation du soutien d'étiage.....	75
3. Enseignements tirés de la phase 1 et perspectives pour la phase 2.....	77
PARTIE IV – Choix des sites et instrumentation prévue	81
1. Critères de choix des sites	82
2. Spécificités des sites sélectionnés : Instrumentation des sites et acquisition de données.....	82
CONCLUSION.....	91
1. Bilan du travail de la phase 1	91
2. Mise en œuvre de la phase 2	93
3. Perspectives pour la phase 3	94
Références Bibliographiques	97
Liste des figures et tableaux	111
Table des matières complète.....	115
Tables des matières des Annexes	119
Annexe 1 : Fiches projets	121
Annexe 2 : Fiches de synthèse Zabré	130
Annexe 3 : Compte-rendu de terrains et de réunions	132
Annexe 4 : Critères de sélection des sites de zones humides.....	220
Annexe 5 : Personnes impliquées ou contactées (ZHTB phases 1 et 2).....	221
Annexe 6 : Poster du projet	223
Annexe 7 : Présentation type phase 1	224
Annexe 8 : Typologies de zones humides.....	232
Annexe 9 : Solutions analytiques et séparation des contributions	236

Résumé

Le projet Zabré/AE-RMC intitulé « Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins dans le soutien d'étiage des cours d'eau - Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône » (ZHTB - action 51) s'intéresse à la problématique suivante : *Quel est le rôle des zones humides pour le soutien d'étiage des cours d'eau ?* Pour répondre à cette question, ce projet est planifié en 3 phases : *Phase 1 (2016/2017)* - état de l'art, choix des sites d'étude, des compétences et de l'instrumentation ; *Phase 2 (2017-2018)* - mesures et instrumentation des sites, développement d'indicateurs du potentiel de soutien d'étiage des zones humides ; *Phase 3 (à planifier)* - analyse et interprétation des données, test des indicateurs, valorisation des résultats. Comme tous les projets Zabré/AE-RMC sa finalité est double et se situe à l'interface de problématiques de recherche et de gestion. Du point de vue scientifique, le projet vise à : 1) mieux comprendre les interactions cours d'eau/zones humides/eaux souterraines et la transformation du signal hydrologique à travers les zones humides ; 2) mieux appréhender les services rendus en termes de soutien d'étiage (ex : régulation, stockage) ; 3) préciser les vulnérabilités physiques des zones humides de têtes de bassins pour une meilleure protection et gestion. D'un point de vue opérationnel, il existe des attentes en termes de : 1) transfert de connaissance (ex : guide méthodologique ou technique) ; 2) production d'argumentaires pour la protection des zones humides ; 3) construction d'indicateurs de diagnostic et de suivi (ex : restauration, bon fonctionnement).

Les zones humides sont des objets phares dans le domaine de l'eau, tant au niveau local qu'international. De nombreux enjeux pèsent sur ces milieux fragiles et menacés qui assurent des fonctions écosystémiques. Des estimations indiquent que plus de 50% des zones humides ont été détruites ou dégradées au cours du siècle dernier. Pour la France, les zones humides ne couvrent plus que 5 à 10% du territoire. Les zones humides apparaissent communément comme des réservoirs de biodiversité et des « éponges » stockant l'eau. L'analyse de la littérature scientifique montre que ce rôle d'éponge dans le stockage/déstockage d'eau est à nuancer. Le projet vise donc à préciser le rôle hydrologique des zones humides en : 1) quantifiant leurs capacités de stockage/transfert d'eau ; 2) déterminant et quantifiant les origines des apports d'eau au cours d'eau à l'étiage. Ce travail tiendra compte du contexte (ex : altitude, géologie, géomorphologie, climat, type de zones humides...), des pressions anthropiques (ex : prélèvements, drainages, pollutions) et des incertitudes sur les mesures.

La phase 1 du projet a conduit à la sélection de 2 sites d'études principaux, la tourbière de Luitel (Isère, France) et la tourbière de Frasné (Doubs, France). L'analyse bibliographique réalisée lors de cette phase de travail sur les typologies des zones humides et les méthodes de caractérisation du soutien d'étiage a conduit à l'élaboration d'une méthodologie interdisciplinaire et de plans d'instrumentation pour les 2 sites d'études principaux qui seront mis en œuvre en phase 2. Ainsi, l'instrumentation et les campagnes de mesures visent à acquérir ou à compléter les connaissances pédologiques, géophysiques, hydrologiques, hydrogéologiques et géochimiques. La quantification du soutien d'étiage nécessite de : 1) « boucler » de manière précise les bilans hydrique et hydrologique du site en identifiant et quantifiant les sources d'apport localisées ou diffuses (ex : pluie, ruisseau, aquifère dont drainance) et d'export (ex : évapotranspiration, surverse, infiltration) ; 2) caractériser en 3D la géométrie (parfois variable dans le temps) de la zone humide et ses propriétés hydrodynamiques (ex : perméabilité, porosité). L'accent sera plus particulièrement mis sur la caractérisation de deux interfaces : 1) l'interface tourbière/versant pour estimer les apports et les pertes diffuses liés à des écoulements souterrains ; 2) l'interface catotélme/acrotélme pour déterminer les propriétés hydrodynamiques de la zone hydrauliquement dynamique de la tourbière. Les données et connaissances acquises seront utilisées pour modéliser le comportement de stockage/déstockage des tourbières sur un ou plusieurs cycles hydrologiques et déterminer les paramètres et variables clefs en vue d'identifier des indicateurs de suivi.

En phase 3 du projet, ces indicateurs seront testés sur de nouveaux sites et de nouvelles simulations seront effectuées sur la base de scénarios climatiques. De tels indicateurs pourront être utiles dans le cadre de la DCE pour l'évaluation du bon état des masses d'eau, le dimensionnement et le suivi d'opérations de restauration ou le « test » milieux humides dépendants des eaux souterraines (ex : identification/typologie, risque/dégradation, surveillance, indicateurs pluridisciplinaires). La méthodologie interdisciplinaire mise en œuvre pourra être complétée par d'autres indicateurs de type paysagers et écologiques (ex : odonates, végétation, diptères, amibes). La prise en compte d'aspects sociaux (ex : perceptions, enjeux, besoins) pourra aussi l'enrichir. À terme, de tels indicateurs pourraient s'avérer utiles pour travailler sur : 1) des modèles géomatiques de répartition et de fonctionnement des zones humides (ex : présence, maintien, évolution) à l'échelle de grands bassins versants ; 2) des modèles économiques de quantification de services écosystémiques (ex : stockage, régulation, marché du carbone).

Acronymes, sigles et abréviations

AE-RMC : Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse
 AE-SN : Agence de l'eau Seine Normandie
 AFB : Agence française pour la biodiversité
 Afes : Association française pour l'étude des sols
 AM : Arrêté ministériel
 ANR : Agence nationale de la recherche
 BO : Bulletin officiel
 BV : Bassin versant
 CAEi : Conseil aménagement espace ingénierie
 Cen : Conservatoires d'espaces naturels
 Corine (land cover) : Inventaire biophysique de l'occupation des terres
 CPCS : Commission de pédologie et de cartographie des sols
 DCE : Directive cadre européenne sur l'eau
 DEA : Denitrification enzyme activity
 Deb : Direction de l'eau et de la biodiversité
 EPA : Environmental protection agency
 ERC (principe) : Éviter, Réduire, Compenser
 Eso : Eau souterraine
 Esu : Eau de surface
 ET : Évapotranspiration
 ETP : Évapotranspiration potentielle
 ETR : Évapotranspiration réelle
 EU : European Union
 Eunis : European nature information system
 FCBN : Fédération des conservatoires botaniques nationaux
 Geppa : Groupe d'étude des problèmes de pédologie appliquée
 GES : Gaz à effet de serre
 Gewex : Global energy and water cycle exchanges
 GHZH : Groupe d'histoire des zones humides
 Gis : Groupement d'intérêt scientifique
 GPS : Global positioning system
 GWDTE : Groundwater dependent terrestrial ecosystems
 GWI : débit entrant souterrain
 GWO : débit sortant souterrain
 Habref : Référentiel national des habitats
 HGM : Hydrogeomorphic approach
 IBK : Indice Beven-Kirby
 IDPR : Indice de persistance des réseaux
 IGN : Institut géographique national
 INPN : Inventaire national du patrimoine naturel
 Lidar : Light detection and ranging
 Medde : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie
 MedWet : Zones humides méditerranéennes
 Meem : Ministère de l'environnement et de la mer

MES : Matière en suspension
 MNHN : Museum National d'Histoire Naturelle
 MNT : Modèle numérique de terrain
 MTES : Ministère de la transition écologique et solidaire
 NRCS : Natural resources conservation service
 ONF : Office National Des Forêts
 Oskar (Convention) : Protection du milieu marin de l'Atlantique du nord-est
 P : précipitations
 PEE (modèle) : Zones humides potentielles, effectives, efficaces
 PER (modèle) : Pressions-État-Réponses
 Piren Seine : Programme interdisciplinaire de recherche sur l'eau et l'environnement du bassin de la Seine
 PNR : Parc naturel régional
 PNRZH : Programme national de recherche sur les zones humides
 QMNA : Moyenne des débits journaliers du mois d'étiage
 Rhomeo : Observatoire de l'évolution du bon état des zones humides sur le bassin Rhône Méditerranée
 RMC : Rhône Méditerranée et Corse
 Sage : Schéma d'aménagement et de gestion des eaux
 Sandre : Service d'administration national des données et référentiels sur l'eau
 Sdage : Schéma d'aménagement et de gestion des eaux
 Seq : Système d'évaluation de la qualité
 SIG : Système d'information géographique
 SNO : Service national d'observation
 SNPN : Société nationale de Protection de la Nature
 SPN : Service du patrimoine naturel
 SWI : débit entrant de surface
 SWO : débit sortant de surface
 UHC : Unité hydraulique cohérente
 UICN : Union internationale pour la conservation de la nature
 UK : United Kingdom
 US : United States
 USA : United States of America
 VCN : Débits d'étiage annuels au pas de temps journalier
 WetMec : Wetland water supply mechanisms
 Zabré : Zone atelier bassin du Rhône
 ZH : Zones humides
 ZHTB : Zones humides de têtes de bassins versants

Préambule

Ces dernières décennies, les zones humides sont devenues des objets d'étude et d'attention particulière dans le domaine de l'eau, avec une prise en compte aussi bien à l'échelle locale qu'internationale. Il existe de nombreux travaux et dispositifs à de telles échelles. De nombreux enjeux pèsent sur ces milieux fragiles et menacés qui assurent des fonctions bénéfiques pour l'homme ou services écosystémiques. À l'échelle mondiale, la convention de Ramsar¹ estime que 64% à 71% des zones humides ont disparu depuis 1900 (Ramsar, 2015). À l'échelle de la France, plus de 50% de la surface des zones humides (soit environ 2,5 millions d'hectares) a été détruite ou dégradée au cours du siècle dernier et plus particulièrement entre 1960 et 1990. À partir des années 1990 à 2010, on observe un ralentissement de la destruction des zones humides. Ce constat est établi à partir du suivi de 152 zones humides jugées représentatives qui couvrent environ 2,4 millions d'hectares (Site des milieux humides² ; Forum des Marais Atlantiques, 2014 ; Bernard, 1994 ; Ximenès et al., 2007 ; Moreau, 2012). Parmi les causes de ces destructions ou dégradation, on peut citer principalement l'urbanisation et l'artificialisation, l'assèchement et le drainage notamment pour l'agriculture. D'autres causes peuvent aussi être mises en avant : la pollution et l'eutrophisation, l'exploitation sylvicole, l'intensification de l'agriculture, les aménagements hydrauliques, les prélèvements d'eau (irrigation), les espèces exotiques envahissantes et les changements climatiques... Au final, pour la France, les zones humides ne couvrent plus que 5 à 10% du territoire mais hébergent 35% des espèces rares et en danger.

À l'occasion du travail de recherche bibliographique réalisé pour ce projet, nous avons commencé à prendre la mesure de l'objet zones humides dans sa diversité et du sujet traitant la question des bilans hydrologiques dans sa complexité. L'analyse de la littérature scientifique interdisciplinaire ou non-scientifique semble mettre en avant un discours très structuré et très établi, souvent généralisant, pour argumenter en faveur de la défense et de la protection des zones humides. D'un point de vue général, les zones humides apparaissent comme des réservoirs de biodiversité et des « éponges » stockant l'eau.

Suite à la revue bibliographique réalisée dans le cadre de ce rapport, notre point de vue est que la protection légitime des zones humides a construit un discours généralisant sur le « rôle d'éponge » des zones humides dans le stockage/déstockage des eaux. Il apparaît donc nécessaire de nuancer et de préciser selon le type de zones humides. C'est à cette tâche que nous allons nous atteler dans ce projet dédié spécifiquement aux zones humides de têtes de bassins versants.

À suivre...

¹ https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/cop12_doc23_bn7_sowws_f.pdf (page consultée en mars 2018)

² <http://www.zones-humides.org/milieux-en-danger> (page consultée en mars 2018)

INTRODUCTION

Cette introduction est construite en deux parties. La première rappelle de manière synthétique les éléments contenus dans les fiches projets Zabr/AE-RMC (Annexe 1). Elle présente la problématique générale du projet ZHTB (Zones Humides de Têtes de Bassins versants), les objectifs scientifiques et opérationnels pour les 3 phases du projet. La deuxième partie expose le contenu du rapport.

1. Objectifs et planification du projet

1.1. Problématique, finalités et objectifs

Ce projet de recherche est mis en œuvre pour étudier le rôle supposé important des zones humides (ex : tourbière) dans la rétention et le stockage d'eau et sa libération différée assurant une fonction de soutien de débit d'étiage des cours d'eau (voire des eaux souterraines). En d'autres termes, la problématique vise à répondre à la question suivante :

Quel est le rôle des zones humides pour le soutien d'étiage des cours d'eau ?

L'étiage, dans son acception la plus courante, est une notion statistique et hydraulicienne qui correspond à la période de l'année durant laquelle le débit d'un cours d'eau (ou d'une nappe souterraine) atteint son niveau le plus faible (basses eaux). Le projet vise à évaluer la faculté des zones humides à constituer un stock hydrique et à le restituer de manière déphasée vers les cours d'eau qui les drainent sur la période où leur soutien par les précipitations est le plus faible (étiage estival et pas hivernal).

La finalité du projet est double et se situe à l'interface de problématiques de recherche et de gestion comme c'est la règle pour tous les projets Zabr soutenus par l'agence RMC.

Du point de vue scientifique, les finalités sont les suivantes :

- mieux comprendre les interactions cours d'eau/zones humides/eaux souterraines ;
- mieux comprendre la transformation du signal hydrologique à travers les zones humides ;
- mieux appréhender les services rendus en termes de soutien d'étiage (ex : régulation, stockage...) ;
- préciser les vulnérabilités physiques des ZHTB pour une meilleure protection et gestion.

Du point de vue opérationnel, les finalités sont les suivantes :

- transfert de connaissance : guide méthodologique ou technique en ouvrant le domaine d'applicabilité des guides méthodologiques Nappes/Rhône³ et Naprom⁴ à de nouveaux contextes géomorphologiques et hydrogéologiques ;
- production d'argumentaires pour la protection des zones humides ;
- construction d'indicateurs simples de diagnostic et de suivi (ex : restauration, bon fonctionnement...).

³ http://www.graie.org/zabr/zabrdoc/Guides_methodo/Guide_Echanges_NR_RMC_VF.pdf

⁴ <http://www.onema.fr/Guide-Interactions-nappe-riviere>

Introduction

Les trois grands objectifs du projet sont les suivants :

- quantifier les capacités de stockage et de transfert d'eau des zones humides ;
- faire la part et quantifier les origines des apports d'eau aux cours d'eau d'amont bassins à l'étiage ;
- déterminer des indicateurs simples du rôle de soutien d'étiage et des critères de présence, maintien et évolution des zones humides.

La réalisation de ces objectifs tiendra compte :

- du contexte altitudinal, géologique, géomorphologique, climatique et des typologies des zones humides ;
- des éventuelles conséquences des pressions anthropiques (ex : prélèvements, drainages, pollutions...) ;
- des incertitudes sur les mesures.

1.2. Phases de l'étude

Le projet est planifié en 3 phases :

- phase 1 (2016-2017) : État de l'art / Choix des sites, des compétences et de l'instrumentation ;
- phase 2 (2017-2018) : Mesures et instrumentation sur 2 sites test ;
- phase 3 (à planifier) : Analyse et interprétation des données / Test des indicateurs sur de nouveaux sites / Valorisation.

Les objectifs à termes sont transversaux aux trois phases :

- schémas conceptuels des ZHTB à partir des typologies ;
- test de modélisation numérique à partir des schémas conceptuels théoriques – scénarios de soutien d'étiage ;
- prédétermination des indicateurs pertinents vis-à-vis du rôle dans le soutien d'étiage (ex : variables géomorphologiques, hydrométéorologiques, ...) ;
- modalités de co-construction du guide méthodologique (questionnaires) ;
- modalités de co-construction des documents de valorisation selon les destinataires (grand public, élus...).

Le contenu plus détaillé des trois phases de travail est le suivant :

• Phase 1 : Sélection des compétences et des sites

Les tâches prévues pour la phase 1 sont les suivantes :

- état de l'art sur l'hydrologie des ZH et les différentes typologies des ZH ;
- contacts avec les gestionnaires et acteurs locaux ;
- présélection des sites ayant déjà fait l'objet d'investigations et d'acquisition de données ;
- reconnaissance de terrain sur les sites les plus intéressants ;
- choix des sites et de l'échelle de travail (Locale : Échelle de la ZH et du cours d'eau d'accompagnement ; Régionale : Échelle du bassin versant regroupant plusieurs ZH) ;
- choix des variables et paramètres à étudier ;
- établissement d'un plan de suivi et d'instrumentation (protocole expérimental).

Livrable : rapport (et document de valorisation du travail bibliographique) et fiche de synthèse Zabr

Consortium : sélection des compétences pour la suite du projet

- **Phase 2 : Mesures et instrumentation**

Les tâches prévues en phase 2 sont les suivantes :

- traitement et exploitation des données hydrologiques, hydrogéologiques et biologiques (ex : odonates) pour les sites déjà équipés et sélectionnés : bilans hydrologiques, corrélations statistiques spatiales et temporelles à partir des chroniques disponibles ;
- prédétermination des indicateurs pertinents vis-à-vis du rôle dans le soutien d'étiage (ex : variables géomorphologiques, hydrométéorologiques, ...) ;
- acquisition d'information hydrologique/hydrogéologique sur les sites choisis pour être équipés et début d'exploitation des données.

- **Phase 3 : Analyse, interprétation du fonctionnement, mise en évidence du rôle de soutien d'étiage et préconisations en matière de gestion**

Les tâches envisagées (à planifier) en phase 3 sont les suivantes :

- suite de l'acquisition d'information et exploitation des données au cours des cycles hydrologiques correspondants ;
- analyse et synthèse des données acquises en phases 2 ;
- restitution et valorisation (Scientifique : rapport, publication, communication ; Opérationnel : extension du guide méthodologique, site web ; Grand public : plaquettes, site web, panneaux signalétiques).

La phase 3 pourrait inclure de nouveaux sites et de nouvelles compétences. Les perspectives sont les suivantes :

- modélisation de la répartition des zones humides ;
- prise en compte d'aspects sociaux : perceptions, enjeux, besoins... ;
- intégration d'indicateurs paysagers et écologiques (ex : odonates, végétation, diptères, amibes...) ;
- quantification de services écosystémiques : marché du carbone, stockage, régulation...

2. Organisation du rapport phase 1 (2016-2017)

La première part du travail réalisé en phase 1 est bibliographique (Parties I, II et III).

La partie I revient sur les définitions des principaux mots clefs du projet : zones humides ou milieux humides, têtes de bassins versants, soutien d'étiage. Elle présente un panorama des principales et nombreuses typologies permettant d'appréhender l'objet zones humides. Ces typologies peuvent être fondées sur les notions d'habitats, de végétation, de sols ou sur des approches hydrogéomorphologiques. Un point particulier est mis en avant concernant : 1) la typologie des tourbières, très fréquentes en têtes de bassins versants ; 2) la typologie des zones humides dépendantes des eaux souterraines, enjeux majeur de la DCE. Pour terminer, cette partie présente un panorama des outils et indicateurs existants liés à l'étude des zones humides.

La partie II est focalisée sur les méthodes et méthodologies de caractérisation et de mesure de soutien d'étiage des zones humides. L'analyse de la bibliographie internationale répertoriée (France, Belgique, Allemagne, Russie, Royaume-Unis, USA, Canada...) met en avant des méthodes pour réaliser des bilans hydrologiques (bilan des flux d'eau entrants et sortants) appliqués aux zones humides et déterminer la manière dont leurs réserves d'eau fluctuent. Ces méthodes visent à mieux connaître les modalités de fonctionnement de zones humides afin d'évaluer leur rôle de stockage/restitution des eaux et d'étudier les interactions avec d'autres compartiments de l'hydrosystème (échanges Eso-ZH-Esu). Un point particulier est fait sur les paramètres et variables clefs pour le suivi du stockage et de la restitution d'eau et donc pour l'instrumentation des sites de zones humides. Comme dans la Partie I, les tourbières font l'objet d'une attention particulière. Le deuxième chapitre de la Partie II fait le point sur leur nature,

Introduction

leurs propriétés hydrodynamiques, leur structuration verticale, leur évolution temporelle et sur certaines propriétés spécifiques (ex : hystérèse séchage/réhumidification, anisotropie et hétérogénéités, double porosité, effets de seuils et types d'écoulements, capacités de stockage et de restitution d'eau). Cet état des lieux permet de faire le point sur les idées reçues et les controverses. Pour terminer, la Partie II inventorie les méthodes d'investigation et de mesure qui paraissent les plus pertinentes et fournit des références bibliographiques qui seront exploitées en phase 2 du projet. Les méthodes et outils inventoriés sont largement interdisciplinaires : hydrologie (fonctionnement, stockage d'eau, bilan, évapotranspiration, instrumentation et suivi), biologie/écologie et thermie (origine de l'alimentation des zones humides), géochimie (cheminement de l'eau), géophysique (propriétés hydrodynamiques et géométrie), pédologie (propriétés hydrodynamiques), cartographie et télédétection, modélisation (traitement et analyse de données)...

La Partie III propose une synthèse des deux parties précédentes. Elle met en avant les points importants issus des deux premières parties bibliographiques. Les apports principaux sont donc rappelés et soulignés : 1) typologies de zones humides, notamment l'approche hydrogéomorphologique ; 2) spécificités des zones humides tourbeuses ; 3) méthodes et outils d'investigation pour la réalisation de bilans hydrologiques ; 4) spécificités des zones humides, notamment tourbières, pour la mise en œuvre d'un bilan hydrologique ; 5) rôle hydrologique des zones humides (stockage/restitution), notamment pour le soutien d'étiage. Pour terminer, cette partie expose les principaux acquis et enseignements de la phase 1 et des perspectives pour les phases 2 et 3.

La Partie IV du rapport présente la seconde part du travail réalisé en phase 1 concernant la sélection et l'instrumentation des sites d'étude. Cette partie rappelle les critères de choix des sites et l'ensemble des sites analysés. Au final, deux sites d'investigation principaux ont été sélectionnés : la tourbière de Luitel (38) et la tourbière de Frasné (25). C'est sur ces deux sites que l'effort d'instrumentation et de mesure sera le plus intense en phase 2. Trois sites complémentaires seront étudiés sur la base des données existantes : la tourbière de Praubert (74), le marais de Vaux (01) et la tourbière de Montselgues (07). Pour chacun des sites, des tableaux de synthèse présentent leurs spécificités, leurs avantages, les principaux questionnements ainsi que les équipements complémentaires et travaux envisagés.

Pour terminer la conclusion expose un bilan synthétique du travail effectué en phase 1, les premiers éléments de mise en œuvre de la phase 2 et d'ores et déjà quelques perspectives pour la phase 3.

PARTIE I

—

Définitions et typologies des zones humides

La première partie de ce rapport revient tout d'abord sur la définition de mots clefs liés au projet et sur les référentiels institutionnels. Pour chacun des mots clefs suivants, zones humides ou milieux humides, têtes de bassins versants et soutien d'étiage, plusieurs définitions sont présentées et analysées. De plus, les principales sources de données, référentiels et le dictionnaire de données des zones humides sont listés et/ou présentés.

Ensuite, cette partie aborde la question des typologies des zones humides. Celles-ci sont nombreuses et diversifiées. Elles peuvent être fondées sur une approche spécifique (faune et flore), habitat, milieu, végétation, sol, hydrologie, hydrogéomorphologie, fonction... ou sur une combinaison de plusieurs approches. Si certaines typologies englobent tous les milieux humides, d'autres sont plus spécifiques. À titre d'exemple, une typologie des tourbières et des milieux humides sous dépendance des eaux souterraines sont présentées.

Pour terminer, cette partie dresse un bilan synthétique des grands outils et des indicateurs dédiés à la localisation, l'identification et la caractérisation des zones humides.

1. Définitions, sources et dictionnaire de données

Les zones humides constituent actuellement une thématique très en vue. Elles font référence à des milieux très diversifiés et concentrent des enjeux nombreux. Il existe de plus une littérature scientifique ou non-scientifique très abondante sur la question. Ainsi, avant d'entrer dans le vif du sujet, il semble intéressant : 1) de revenir sur quelques définitions et concepts clefs ; 2) de présenter un panorama rapide des sources documentaires et de données ou métadonnées.

1.1. Définitions de départ : zones humides, milieux humides, têtes de bassins versants, soutien d'étiage

Cette partie revient sur la définition des trois principaux mots clefs du projet : zones humides, têtes de bassins versants et soutien d'étiage.

1.1.1. Zones humides : définitions générales

Le glossaire sur l'eau et les milieux aquatiques⁵ donne la définition suivante de zone humide : « Zone où l'eau, douce, salée ou saumâtre, est le principal facteur qui contrôle le milieu naturel et la vie animale et végétale associée. Les zones humides sont alimentées par le débit du cours d'eau et/ou par les remontées de nappes phréatiques et sont façonnées par l'alternance de hautes eaux et basses eaux. Il s'agit par exemple des ruisseaux, des tourbières, des étangs, des mares, des berges, des prairies inondables, des prés salés, des vasières, des marais côtiers, des estuaires. Ces zones sont des espaces de transition entre la terre et l'eau (ce sont des écotones). La végétation présente un caractère hygrophile (qui absorbe l'eau) marqué. Comme tous ces types d'espaces particuliers, ils présentent une forte potentialité biologique (faune et flore spécifique) et ont un rôle de régulation de l'écoulement et d'amélioration de la qualité des eaux. La convention de Ramsar a adopté une optique plus large pour déterminer quelles zones humides peuvent être placées sous son égide. Les zones humides sont des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou

⁵ http://www.glossaire.eaufrance.fr/sites/default/files/export_data/glossaire_eaufrance_fr.pdf?absolute=1 (page consultée en avril 2017)

PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides

temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres ».

Le glossaire distingue les zones humides alluviales qui sont définies de la façon suivante : « *Située en fond de vallées des cours d'eau, zone comprenant les habitats fluviaux (îlots, grèves, berges...) et les annexes alluviales (prairies inondables, marais tourbeux, bras morts, ripisylves, forêts alluviales, annexes hydrauliques...) ainsi que les zones humides des têtes de bassins (tourbières notamment). Les zones humides alluviales sont des réservoirs de biodiversité et constituent souvent des habitats de reproduction ou des aires de repos pour de nombreuses espèces animales protégées. Leur capacité de stockage, à plus ou moins long terme, prévient des risques d'inondation en diminuant l'intensité des crues et soutient le débit à l'étiage. La plupart d'entre elles participent à la recharge de la nappe phréatique et à l'épuration des eaux. Les zones humides ont une forte valeur paysagère. Par ces nombreuses fonctions, elles participent à la gestion quantitative et qualitative de la ressource en eau ».*

Ces deux premières définitions des zones humides et des zones humides alluviales mettent en avant la forte diversité de milieux humides. La présence d'eau permanente ou temporaire et la forte potentialité biologique (réservoir de biodiversité) sont deux facteurs prépondérants. Les liens des zones humides avec d'autres entités de l'hydrosystème comme les cours d'eau et les eaux souterraines sont mis en avant. Ces définitions mettent aussi en exergue que les zones humides peuvent soit :

- être alimentées par les cours d'eau et les eaux souterraines ;
- participer au soutien du débit des cours d'eau à l'étiage voire à la recharge des nappes d'eau souterraine⁶.

1.1.2. Étiage et soutien d'étiage : vision statistique et hydraulicienne

Le glossaire eaufrance aborde aussi la question de l'étiage selon plusieurs entrées. L'étiage lui-même est défini comme : « *Période de plus basses eaux des cours d'eau et des nappes souterraines (généralement l'été pour les régimes pluviaux)* ». Ce glossaire aborde aussi d'autres concepts liés à l'étiage :

- Débit d'étiage : « *Débit minimum d'un cours d'eau calculé sur un pas de temps donné en période de basses eaux. Ainsi pour une année donnée on parlera de : débit d'étiage journalier, débit d'étiage de n jours consécutifs, débit d'étiage mensuel : moyenne des débits journaliers du mois d'étiage (QMNA). Pour plusieurs années d'observation, le traitement statistique de séries de débits d'étiage permet de calculer un débit d'étiage fréquentiel. Par exemple, le débit d'étiage mensuel quinquennal (ou QMNA 5) est un débit mensuel qui se produit en moyenne une fois tous les cinq ans. Le QMNA 5 constitue le débit d'étiage de référence pour l'application de la police de l'eau » ;*
- Débit d'étiage de référence : « *Débit de référence légal, défini comme le débit mensuel d'étiage de récurrence 5 (ou de fréquence 1/5, c'est-à-dire se produisant une année sur cinq), désigné par le sigle QMNA 5 (fréquence 1/5) » ;*
- Lit d'étiage : « *Partie du lit qui reste toujours en eaux. Il correspond au débit d'étiage. On parle aussi de lit d'été » ;*

Le soutien d'étiage en tant que tel est défini comme : « *Action d'augmenter le débit d'un cours d'eau en période d'étiage à partir d'un ouvrage hydraulique (barrage réservoir ou transfert par gravité ou par pompage...) ».*

La notion d'étiage est donc principalement liée au cours d'eau (mais aussi aux nappes d'eaux souterraines) et fondée sur l'analyse des fréquences des faibles débits. Rien n'est précisé concernant l'étiage des zones humides. Le terme soutien d'étiage semble utilisé principalement dans le cadre de la gestion des ouvrages hydrauliques, même s'il est utilisé par analogie pour les zones humides dans les définitions précédentes.

Les zones humides assurent donc des fonctions de stockage/déstockage d'eau, mais aussi de prévention des inondations et d'épuration des eaux. Les zones humides de têtes de bassins versants (ZHTB) quant à elles semblent principalement représentées par des tourbières.

⁶ Une nappe phréatique » sensu stricto désigne un type de nappe spécifique. D'après Margat (1997 in <https://hydrologie.org>) une nappe phréatique est une « nappe d'eau souterraine à surface généralement libre et à faible profondeur (ordre métrique à décimétrique), accessible et exploitable par les puits ordinaires ». Cet auteur qualifie « l'extension du sens de nappe phréatique à celui de nappe souterraine en général comme impropre et abusif ».

1.1.3. Têtes de bassins versants : des secteurs à enjeux à géographie variable

Le glossaire eaufrance définit les têtes de bassins versants de la façon suivante : « *Partie amont des bassins versants et par extension tronçon amont des cours d'eau qui, en zone de relief notamment, sont le plus souvent moins exposés aux pressions anthropiques que les parties aval (mais restent très fragiles) et qui de ce point de vue constituent des secteurs de référence à préserver* ».

D'après le Sdage Loire-Bretagne (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2015), « *les têtes de bassin versant s'entendent comme les bassins versants des cours d'eau dont le rang de Strahler est inférieur ou égal à deux et dont la pente est supérieure à 1%... ce critère de pente peut être adapté localement pour les cours d'eau à faible puissance spécifique présentant un risque de non atteinte des objectifs environnementaux* ». L'analyse bibliographique réalisée par Duranel (2016) montre que de telles entités sont difficiles à cartographier précisément, notamment en fonction de l'échelle considérée.

Si les zones humides constituent des milieux à enjeux et à préserver, il en est de même pour les têtes de bassins versants. Les zones humides de têtes de bassins versants (ZHTB) constituent donc des milieux très sensibles à très forts enjeux notamment pour la ressource en eau et plus particulièrement pour le soutien d'étiage.

1.1.4. Zones humides et milieux humides : entre réglementation et perception

Le Portail eaufrance dédié aux zones humides⁷ propose de nombreuses informations pour mieux connaître de tels milieux. Il présente les zones humides de la façon suivante : « *Dans les milieux humides, l'eau est le facteur déterminant tant pour le fonctionnement de ces zones naturelles que pour la vie animale et végétale. La submersion des terres, la salinité de l'eau (douce, saumâtre ou salée) et la composition en matières nutritives de ces territoires subissent des fluctuations journalières, saisonnières ou annuelles. Ces variations dépendent à la fois des conditions climatiques, de la localisation de la zone au sein du bassin hydrographique et du contexte géomorphologique (géographie, topographie). Ces fluctuations sont à l'origine de la formation de sols particuliers ainsi que d'une végétation et d'une faune spécifiques. L'abondance des algues, de poissons, d'oiseaux d'eau, et d'autres espèces sauvages, peut ainsi varier dans un même milieu selon la période de l'année. Tous ces facteurs expliquent que la définition et la délimitation des milieux humides soient des sujets complexes, souvent matière à controverse. Les définitions des zones humides sont aussi nombreuses que leurs rédacteurs, qu'ils soient scientifiques, gestionnaires, juristes ou politiques. Au niveau international, la Convention relative à la conservation et l'utilisation rationnelle des zones humides et de leurs ressources » (convention de Ramsar) a adopté une définition assez générale prenant en compte un certain nombre de milieux marins comme les récifs coralliens et les herbiers marins ainsi que les cours d'eau et milieux souterrains. En France, la législation est plus restrictive en raison de l'existence antérieure d'une réglementation sur certains milieux artificiels (barrage, plan d'eau...) ou naturels (cours d'eau, milieu marin et souterrain...) ».*

Cette dernière définition complète les premières. Elle souligne une nouvelle fois le rôle prépondérant de la composante hydrique de ces milieux. Elle précise de plus l'influence forte des contextes climatique, hydrographique et géomorphologique. Enfin, elle souligne la difficulté à définir et délimiter ces milieux selon le point de vue adopté : « scientifique, gestionnaire, juriste ou politique ».

En conséquence, pour la France, le Portail eaufrance précise qu'il est nécessaire de faire une distinction entre milieux humides et zones humides pour éviter la confusion entre le zonage lié aux conventions internationales et celui lié au droit français :

- le syntagme⁸ milieux humides « *est utilisé pour aborder les espaces définis par la convention de Ramsar. Cette définition large englobe notamment certains milieux souterrains, marins ou encore les cours d'eau...* » ;

⁷ <http://www.zones-humides.eaufrance.fr/> (page consultée en avril 2017)

⁸ Combinaison de morphèmes ou de mots qui se suivent et produisent un sens acceptable. Le syntagme se compose donc toujours de deux ou plusieurs unités consécutives (par exemple: re-lire; contre tous; la vie humaine; Dieu est bon; s'il fait beau temps, nous sortirons, etc.) (SAUSS. 1916, p. 170). La notion de syntagme s'applique non seulement aux mots, mais aux groupes de mots, aux unités complexes de toute dimension et de toute espèce (mots composés, dérivés, membres de phrase, phrases entières) (SAUSS. 1916, p. 172)

Source : <http://www.cnrtl.fr/>

PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides

- le syntagme zones humides « est utilisé pour aborder les espaces répondant à la définition française officielle. De cette dernière découle des conséquences réglementaires mais aussi des modalités d'action quand ce terme est employé dans des textes officiels », notamment dans le Code de l'Environnement.

Selon le Portail eaufrance, le Portail de l'eau Rhône-Méditerranée⁹ et la boîte à outils de l'AE-SN (Forum des Marais Atlantiques, 2014) les principaux documents de référence relatifs aux zones humides sont les suivants :

- Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau (Ramsar) ;
- Décret n° 2007-135 du 30 janvier 2007 précisant les critères de définition et de délimitation des zones humides figurant à l'article L. 211-1 du code de l'environnement complété par l'arrêté ministériel du 24 juin 2008 modifié par l'arrêté du 1er octobre 2009 et l'article R211-108 du code de l'environnement ;
- Articles L214-1 à 6 et R214-1 du code de l'environnement (principe « Éviter, Réduire, Compenser ») ;
- Loi n° 2005-157 du 23 février 2005 relative au développement des territoires ruraux ;
- Loi sur l'eau du 3 janvier 1992 ;
- Directive Cadre sur l'Eau (DCE) 2000/60/CE du 23 octobre 2000 ;
- Loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 ;
- ...

1.1.5. Zones humides : définitions complémentaires

En s'appuyant sur la réglementation le Portail de l'eau Rhône-Méditerranée définit les zones humides de la façon suivante.

« L'article L 211-1 du code de l'environnement donne la définition réglementaire des zones humides 'on entend par zone humide les terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année'. Ce même article, qui définit les critères d'une 'gestion équilibrée de la ressource en eau', stipule que 'la préservation des écosystèmes aquatiques, des sites et des zones humides' est une condition indispensable de cette gestion équilibrée. En 2008, la réglementation a précisé les critères d'identification et de délimitation des zones humides. Ainsi, conformément à l'arrêté ministériel du 24 juin 2008 modifié par l'arrêté du 1er octobre 2009 et à l'article R211-108 du code de l'environnement, une zone est considérée comme humide si elle présente au moins l'un des critères suivants :

- Les sols sont gorgés d'eau de façon permanente ou temporaire : la liste des types pédologiques correspondant est spécifiée en annexe 1.1 de l'arrêté du 24/06/2008. La classification et la méthodologie décrite dans l'arrêté permet d'établir la présence prolongée d'eau dans les sols, en fonction de leurs caractéristiques morphologiques ;
- La végétation, si elle existe, est caractérisée soit par des espèces hygrophiles (voir liste en annexe 2.1 de l'arrêté du 24/06/2008), soit par des habitats caractéristiques des zones humides (voir liste en annexe 2.2) ».

Pour terminer cette partie consacrée aux définitions, il est intéressant de souligner l'existence d'une terminologie spécifique liée aux problématiques d'identification, de caractérisation et de délimitation des zones humides. La boîte à outils de l'AE-SN (Forum des Marais Atlantiques, 2014) présente les définitions suivantes :

- zones à dominante humide : « Secteurs où il existe une forte probabilité de zone humide... (Synonymes : zones probablement humides, zones humides potentielles, zones humides probables... » ;
- zones humides (effectives) : « Zones correspondant à la définition de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992. Elles présentent des critères hydrologiques (inondation ou engorgement en eau fréquent), pédologiques (sol témoignant d'un milieu saturé en eau) ou botaniques (végétation dominée par des plantes hygrophiles) » ;
- zones humides (effectives) délimitées de façon réglementaire : « Zones correspondant à la définition de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 et délimitées selon la méthode réglementaire définie par l'arrêté du 24 juin 2008 modifié » ;

⁹ <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/milieux-aquatiques/zones-humides/index.php> (page consultée en mars 2018)

- zones anciennement humides : « *Zones qui, dans le passé, ont été humides mais qui ne présentent plus les caractéristiques d'une zone humide effective* » ;

De plus, on trouve aussi zones humides efficaces (modèle PEE¹⁰ ; PNRZH, 2005) : « *L'efficacité d'une zone humide est reliée à une fonction (paysagère, épuratoire, refuge de biodiversité...) ou à un objectif à atteindre par rapport à une fonction. Elle concerne généralement une sous-unité de la zone humide potentielle ou effective* ».

La boîte à outils de l'AE-SN (Forum des Marais Atlantiques, 2014) présente de plus les définitions suivantes liées au dimensionnement de territoire d'étude ou d'action :

- zones humides prioritaires : « *Zones humides à protéger ou restaurer (valeurs, fonction, menaces)* » ;
- site fonctionnel : « *Regroupement de zones humides homogène ou cohérent du point de vue hydrologique, écologique et géographique* » ;
- unité hydraulique cohérente (UHC) : « *Portion continue du territoire, disposant d'une autonomie propre en termes de niveaux d'eau et d'au moins une entrée et une sortie d'eau* » ;
- espace de fonctionnalité : « *Espace proche de la zone humide, ayant une dépendance directe et des liens fonctionnels évidents avec la zone humide à l'intérieur duquel, certaines activités peuvent avoir une incidence directe, forte et rapide sur le milieu et conditionner sérieusement sa pérennité (ex : bassin versant ou tête de bassin versant, proche bassin versant, ensemble de zones humides complexe)* ».

1.2. Sources et dictionnaire de données

1.2.1. Sources documentaires et de données

Il existe de nombreuses sources documentaires et de données concernant les zones humides. L'objectif de cette partie n'est pas d'en fournir un inventaire exhaustif mais d'en présenter un panorama représentatif qui sera complété au fil du projet.

La littérature scientifique (publications, rapports de recherche, mémoires de thèse...) est abondante et largement interdisciplinaire. Les travaux peuvent être abordés sous un angle disciplinaire ou pluridisciplinaire en mobilisant par exemple les champs suivants : analyse du signal, écologie, géochimie, géomorphologie, hydrologie, hydrogéologie, télédétection, géophysique, pédologie, géomatique... Ces travaux portent sur des problématiques diverses, par exemple, modélisation, gestion, fonctions, services, typologies... Ils abordent différents types de zones humides en lien ou non avec l'hydrosystème.

La littérature scientifique analysée dans le cadre de ce projet concerne principalement les typologies hydrogéomorphologiques, les critères de répartition spatiale des zones humides, les méthodes d'investigations et de mesures principalement d'un point de vue hydrologique (voir Parties II.2, II.3 et III).

Le portail eaufrance dédiée aux zones humides (<http://www.zones-humides.eaufrance.fr/>) constitue une source d'information structurée et intéressante sur les zones humides : actualité, définitions, typologies, intérêts (fonctions, services), enjeux (menaces), identification (observation, inventaires, délimitation, évaluation, diagnostics), réglementation. Ce portail renvoie aussi à une documentation et à des références abondantes et variées (travaux scientifiques ; documents techniques et pratiques sur la gestion et la restauration, sur l'éducation à l'environnement ; ...). Le portail eaufrance (<http://www.eaufrance.fr/>) général complète cette source d'informations :

- documents techniques de l'eau : <http://www.documentation.eaufrance.fr/#&panel1-1>
- données sur l'eau : <http://www.data.eaufrance.fr/>
- ...

¹⁰ https://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/Territ_Eau/CONNAISSANCES/Zones_humides/ (page consultée en avril 2017)

PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides

À l'échelle bassin, le Portail de l'eau Rhône-Méditerranée propose une entrée sur les zones humides (<http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/milieus-aquatiques/zones-humides/index.php>).

Cette source documentaire fait le point sur : les définitions, les enjeux majeurs, la politique de bassin, les plans nationaux d'action, la législation/réglementation et l'étymologie/toponymie.

Pour compléter et à titre d'exemple le Tableau 1 propose une liste d'organismes, de structures ou de projets où de la documentation ou des données sur les zones humides sont disponibles.

Organisme	Site web
The Network for freshwater research	http://www.freshwaterplatform.eu/#
UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature)	https://www.iucn.org/fr
Cen (Fédération des Conservatoires d'Espaces Naturels)	http://www.reseau-cen.org/
Meem (Ministère de l'Environnement et de la Mer)	http://www.developpement-durable.gouv.fr/
AFB (Agence Française pour la Biodiversité)	http://www.afbiodiversite.fr/
Agence de l'eau notamment Rhône Méditerranée Corse	https://www.eaurmc.fr/
Agence de l'eau Loire-Bretagne	http://www.eau-loire-bretagne.fr/
Agence de l'eau Seine-Normandie	http://www.eau-seine-normandie.fr/
Pôle-relais zones humides	http://www.pole-zhi.org/
Portail Carteau France	http://www.carteau-rdi.fr/
SNPN (Société nationale de Protection de la Nature)	http://www.snnp.com/spip.php?rubrique23
Association Ramsar France	http://www.ramsar.org/fr/zone-humide/france
GHZH (Groupe d'histoire des zones humides)	http://www.ghzh.fr/
Pôle relais tourbière	http://www.pole-tourbieres.org/
INPN (Inventaire National du Patrimoine Naturel)	https://inpn.mnhn.fr/accueil/index
Piren Seine (Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'eau et l'environnement du bassin de la Seine)	https://www.piren-seine.fr/
Zabr (Zone Atelier Bassin du Rhône)	http://www.graie.org/zabr/index.htm
ANR Peatwarm	http://peatwarm.cnrs-orleans.fr/
Projet MedWet	http://medwet.org/
SNO Tourbières	http://www.sno-tourbieres.cnrs.fr/
PNRZH (Programme National de Recherche sur les Zones Humides)	http://www.zones-humides.org/sites/default/files/pdf/PNRZH/0.couverture_intro.pdf
Explore 2070	http://www.onema.fr/explore-2070
Gewex (Global Energy and Water cycle Exchanges)	http://www.gewex.org/
US EPA (US Environmental Protection Agency)	https://www.epa.gov/
US Army Corps of Engineers	http://www.usace.army.mil/
Centre de Ressources Loire nature	http://www.centrederessources-loirenature.com/
UK Environment Agency	https://www.gov.uk/government/organisations/environment-agency
Zones humides 74	http://carto.geo-ide.application.developpement-durable.gouv.fr/612/JPV_zones_humides_74.map#
Zones humides 38	http://sig.reseau-zones-humides.org/
SIG Réseau zones humides	http://sig.reseau-zones-humides.org/
Fédération des Conservatoires botaniques nationaux	http://www.fcbn.fr/
Museum National d'Histoire Naturelle	https://www.mnhn.fr/
IGN (Institut Géographique National)	https://www.geoportail.gouv.fr/
À compléter...	...

Tableau 1 : Liste d'organismes, de structures ou de projets où de la documentation ou des données sur les zones humides sont disponibles

1.2.2. Dictionnaire de données des zones humides

L'inventaire et la description des zones ou milieux humides en France sont encadrés par le modèle (ou dictionnaire de données) Sandre¹¹ (Sandre, 2014) qui constitue un tronc commun. Ce modèle concerne :

- « - une description générale de la zone humide, notamment son paysage, son extension, les milieux présents en s'appuyant sur les typologies Sdage, Corine Biotope et Seq Physique ;
- une description du fonctionnement hydrologique et hydraulique, notamment en précisant de manière simplifiée la nature de flux hydriques, entrants ou sortants de la zone humide, et leur permanence ;
- une description du patrimoine de la zone humide, au travers les zonages réglementaires et techniques qui la composent, les espèces animales et végétales protégées et les habitats ;
- une description des activités humaines et usages sur la zone humide ;
- un descriptif du contexte institutionnel, réglementaire et contractuel en identifiant les mesures de protection présentes sur la zone ;
- une évaluation globale faisant ressortir les principaux enjeux sur la zone humide ;
- des orientations d'action pour préserver la zone humide ».

Ce dictionnaire fait de plus le lien avec les communes, les zones hydrographiques et les entités hydrogéologiques en relation avec la zone humide.

2. Typologies de référence des zones humides

D'après le Portail eaufrance, les typologies et les classifications à différentes échelles de milieux humides existent en grand nombre. Ces typologies peuvent être fondées sur :

- la notion d'habitat comme Eunis-habitats (Louvel et al., 2013) ou Corine-biotopes (Bissardon et al. 1997) et les notions de végétation et de phytosociologie (Bardat et al., 2004) ;
- le type de sol (Geppa, 1981 ; Afes, 2008) ;
- la notion de milieu [Ramsar (Frazier, 1999) ; MedWet (Farinha, 1996) ; Sdage 1996 (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2000) ; Agence de l'eau Loire Bretagne, 2005] ;
- la notion de fonction : Approche HGM (Hydrogéomorphologique) (Brinson 1993 ; Brinson 1995 ; Smith et al 1995 ; Smith et al., 2013 ; Gayet et al 2016) ; modèle PEE¹² (Zones potentielles, effectives, efficaces) (PNRZH, 2005).

2.1. Typologies : Habitats, milieux, végétation, sols

Du point de vue réglementaire, les critères botanique et pédologique sont prépondérants pour l'identification et la caractérisation des zones humides. Jusqu'à présent [arrêté ministériel (AM) du 24 juin 2008 modifié par AM du 1er octobre 2009] ces critères étaient alternatifs (sols hydromorphes ou végétation). La note technique du 26 juin 2017¹³ du ministère de l'environnement, signée par le directeur de la direction de l'eau et de la biodiversité (Deb) fait suite à l'arrêt du conseil d'État qui remet en cause le caractère alternatif des critères pédologique et botanique de l'AM. La note dit en substance qu'il existe deux cas :

1. lorsque que la végétation spontanée caractéristique est présente le diagnostic de la zone humide se fait sur la base des deux critères pédologique et botanique (critères cumulatifs) ;
2. en l'absence de végétation spontanée caractéristique des zones humides, le critère pédologique est suffisant pour le diagnostic d'une zone humide (critère alternatif).

¹¹ <http://www.sandre.eaufrance.fr/urn.php?urn=urn:sandre:dictionnaire:MHI:FRA::ressource:2.0::pdf> (page consultée en avril 2017)

¹² https://agro-transfert-bretagne.univ-rennes1.fr/Territ_Eau/CONNAISSANCES/Zones_humides/ (page consultée en avril 2017)

¹³ http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201712/met_20170012_0000_0011.pdf Note technique du 26 juin 2017 relative à la caractérisation des zones humides (NOR : TREL1711655N), publiée au BO du MTES

PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides

Cela se complique pour l'application de la police de l'eau. La note dit qu'il faut la présence cumulée de la végétation et du sol pour être en présence de zones humides. En l'absence de végétation la police de l'eau ne peut plus statuer.

Cette note ne permet de réintégrer qu'une partie des zones humides dans le cadre de la protection de la police de l'eau par rapport à la situation précédente. Ainsi, la direction de l'eau et de la biodiversité signale qu'elle travaille à d'autres suites juridiques pour rétablir l'ensemble des zones humides dans leur propre définition.

2.1.1. Typologies : Habitats, milieux, végétation

Les typologies fondées sur les habitats, milieux et types de végétations sont sans doute les plus connues. La nomenclature utilisée à l'échelle européenne est appelée Eunis (European Nature Information System) (Louvel et al., 2013). Elle est en lien avec la classification Corine-biotopes (Bissardon et al., 1997 pour les types d'habitats français). Cette typologie est fondée sur les biotopes caractérisés par la flore, la faune (facteurs biotiques) et des paramètres environnementaux (facteurs abiotiques). Elle est structurée de manière hiérarchique. Ces deux classifications incluent les zones humides.

La nomenclature Corinne-biotopes comprend 7 types d'habitats principaux eux-mêmes subdivisés en sous-types (voir exemples dans le Tableau 2). La nomenclature Eunis quant à elle comprend 11 types d'habitats principaux eux-mêmes subdivisés en sous-types (voir exemples dans le Tableau 3).

Types d'habitats principaux	Exemple de sous-types 2 - Milieux aquatiques non marins	Exemple de sous-types 5 - Tourbières et marais
1 - Habitats littoraux et halophile 2 - Milieux aquatiques non marins 3 - Landes, fruticées et prairies 4 - Forêts 5 - Tourbières et marais 6 - Rochers continentaux, éboulis et sables 8 - Terres agricoles et paysages artificiels	21. Lagunes 22. Eaux douces stagnantes 23. Eaux stagnantes, saumâtres et salées 24. Eaux courantes	51. Tourbières hautes 52. Tourbières de couverture 53. Végétation de ceinture des bords des eaux 54. Bas-marais, tourbières de transition et sources

Tableau 2 : Types d'habitats français Corine-biotopes (d'après Bissardon et al., 1997)

Types d'habitats Eunis de niveau 1	Exemple de sous-types C - Eaux de surface continentales	Exemple de sous-types D - Tourbières et bas-marais
A - Habitats marins B - Habitats côtiers C - Eaux de surface continentales D - Tourbières et bas-marais E - Prairies ; Terrains dominés par des espèces non graminéoïdes, des mousses ou des lichens F - Landes, fourrés et toundras G - Bois, forêts et autres habitats boisés H - Habitats continentaux sans végétation ou à végétation clairsemée I - Habitats agricoles, horticoles et domestiques régulièrement ou récemment cultivés J - Zones bâties, sites industriels et autres habitats artificiels X - Complexes d'habitats	C1 - Eaux dormantes de surface C2 - Eaux courantes de surface C3 - Zones littorales des eaux de surface continentales	D1 - Tourbières hautes et tourbières de couverture D2 - Tourbières de vallée, bas-marais acides et tourbières de transition D4 - Bas-marais riches en bases et tourbières des sources calcaires D5 - Roselières sèches et cariçaies, normalement sans eau libre D6 - Marais continentaux salés ou saumâtres et roselières

Tableau 3 : Types d'habitats Eunis (d'après (Louvel et al., 2013)

Il existe de plus, une typologie Sdage des zones humides. Cette typologie a été déclinée à l'échelle du bassin hydrogéographique Rhône Méditerranée Corse (AE-RMC, 2000). Elle comprend 13 types principaux. Elle est fondée sur la chimie de l'eau (salinité) et le régime hydrologique. Le Tableau 4 présente cette typologie Sdage en faisant la correspondance avec les types Corine-biotopes et Corine Land Cover et les sous-types Rhomeo (Collectif RhoMéO, 2014).

	Types Sdage	Définition RMC	Sous-types	Sous-type Rhomeo	Corine Biotope et *Land Cover*
Eaux marines					
1	Grands estuaires	Larges embouchures de fleuve dans les eaux marines, soumises à l'action des marées (< à 6m)			*5.2.2 Estuaires* 11 Mers et océans 12 Bras de mer, baies et détroits 13 Estuaires et rivières tidales 14 Vasières et bancs de sable sans végétation 15 Marais salés, prés salés, steppes salées 16 Dunes marines et plages de sable
2	Baies et estuaires moyens-plats	Embouchures de cours d'eau dans les eaux marines où l'influence de la marée n'est pas prépondérante, deltas	Vasières Herbiers, récifs Prés-salés		17 Plages de galets 21 Lagunes 23 Eaux stagnantes, saumâtres et salées 53 Végétation de ceinture de bord des eaux *5.2.1 Lagunes littorales*
3	Marais et lagunes côtiers	Milieu littoral saumâtre à faible renouvellement des eaux et au fonctionnement globalement naturel	Marais Prés-salés Lagunes Arrières-dunes Sansouires Roselières	3.1 Lagunes 3.2 Péri-lagunaire 3.3 Péri-lagunaire avec apport d'eau	
4	Marais saumâtres aménagés	Milieu littoral saumâtre à faible renouvellement des eaux et au fonctionnement profondément artificialisé	Marais salants Bassins aquacoles		89 Lagunes et réservoirs industriels, canaux *4.2.2 Marais salants*
Eaux courantes					
5 et 6	Bordures de cours d'eau et plaines alluviales	Ensemble des zones humides du lit majeur du cours d'eau	Grèves nues ou végétalisées Annexes fluviales Ripisylves Prairies inondables		24 Eaux courantes 37 Prairies humides et communautés d'herbacées hautes 44 Forêts et fourrés alluviaux très humides 53 Végétation de ceinture de bord des eaux
Eaux stagnantes					
7	Zones humides de bas-fonds en tête de bassin	Zones humides de tête de bassin alimentées par les eaux de ruissellement et les eaux de pluie	Tourbières Milieux fontinaux Prairies humides Prairies tourbeuses Pozzines	7.1 Zone humide d'altitude 7.2 Tourbière acide 7.3 Tourbière alcaline 7.4 Zone humide de pente et source 7.5 Zone humide de combe et bordure de ruisseaux	36 Pelouses alpines et subalpines 37 Prairies humides et communautés d'herbacées hautes 51 Tourbières bombées à communautés très acides 52 Tourbières de couverture 54 Bas-marais, tourbières de transition et sources *4.1.2 Tourbières*
8	Régions d'étangs	Système de plans d'eau peu profonds d'origine anthropique	Étangs isolés		22 Eaux douces stagnantes (lacs, étangs et mares)
9	Petits plans d'eau et bordures de plans d'eau	Zones littorales et zones annexes de milieux stagnants profonds à héliophytes et hydrophytes (6 m)	Bordures de lacs Prairies humides Prairies tourbeuses	9.1 Zone humide acide 9.2 Zone humide alcaline	22 Eaux douces stagnantes (lacs, étangs et mares) 37 Prairies humides et communautés d'herbacées hautes 44 Forêts et fourrés alluviaux très humides 53 Végétation de ceinture de bord des eaux
10	Marais et landes humides de plaine et plateaux	Milieux humides déconnectés des cours d'eau et plan d'eau pouvant être temporairement exondés, connectés ou non à la nappe	Plateaux imperméables Zones de sources Tourbières Prés-salés	10.1 Marais (tourbière) de plaine 10.2 Prairie humide 10.3 Pré salé continental	31 Landes, broussailles, recrus (31.1 Landes humides) 37 Prairies humides et communautés d'herbacées hautes 51 Tourbières bombées à communautés très acides 52 Tourbières de couverture 54 Bas-marais, tourbières de transition et sources *4.1.1 Marais intérieurs*
11	Zones humides ponctuelles	Plans d'eau isolés peu profonds permanents ou temporaires	Réseau de mares ou mares permanentes ou temporaires, naturelles ou créées par l'homme	11.1 Mare temporaire Saumâtre 11.1 / Alcaline 11.12 / acide 11.13 11.2 Mare permanente	22 Eaux douces stagnantes (lacs, étangs et mares)
12	Marais aménagés dans un but agricole	Zones humides aménagées dans un but agricole et sylvicole, intensifs	Rizières (T3) Prairie amendée (T6 ou T10) Peupleraie (T6 et T10)		81 Prairies fortement amendées et ensemencées 82 Cultures (82.41 Rizières) 83 Vergers (83.321 Plantations de peupliers)
13	Zones humides artificielles	Milieux humides d'eau douce résultats d'activités anthropique dont le but premier n'est pas la création de zone humide	Contre-canaux, Carrières en eau Bassins aquacoles intensifs (p.m)		22 Eaux douces stagnantes (lacs, étangs et mares) 89 Lagunes et réservoirs industriels, canaux *2.1.3 Rizières*

Tableau 4 : Typologie Sdage des zones humides appliquée au bassin RMC (d'après Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2000 et Collectif RhoMéO, 2014)

PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides

La typologie Sdage a aussi été déclinée sur le bassin Loire-Bretagne, notamment au niveau des Sage avec l'introduction de 28 sous-types (Agence de l'eau Loire Bretagne, 2005). Il existe de plus les typologies Ramsar (Frazier, 1999) et MedWet (Farinha et al., 1996) et des comparatifs de typologies (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011). Les tableaux synthétiques de ces typologies sont présentés en Annexe 8.

Pour terminer, on soulignera l'existence du référentiel habitats (Habref)¹⁴ (Clair et al., 2017) utilisé dans le cadre de Natura 2000 pour « la gestion de données sur les habitats naturels et les végétations dans les systèmes d'information de la nature ». Ce document propose une typologie des habitats et fait état des correspondances avec d'autres typologies, dont certaines ont été évoquées précédemment (Prodrome des végétations de France, Unités phytosociologiques des Cahiers d'habitats, Biocénoses benthiques de Méditerranée, Habitats marins benthiques d'Atlantique, Corine biotopes, Eunis, Habitats d'intérêt communautaire, Cahiers d'habitats, Convention Ospan, Convention de Barcelone).

2.1.2. Typologies : sols

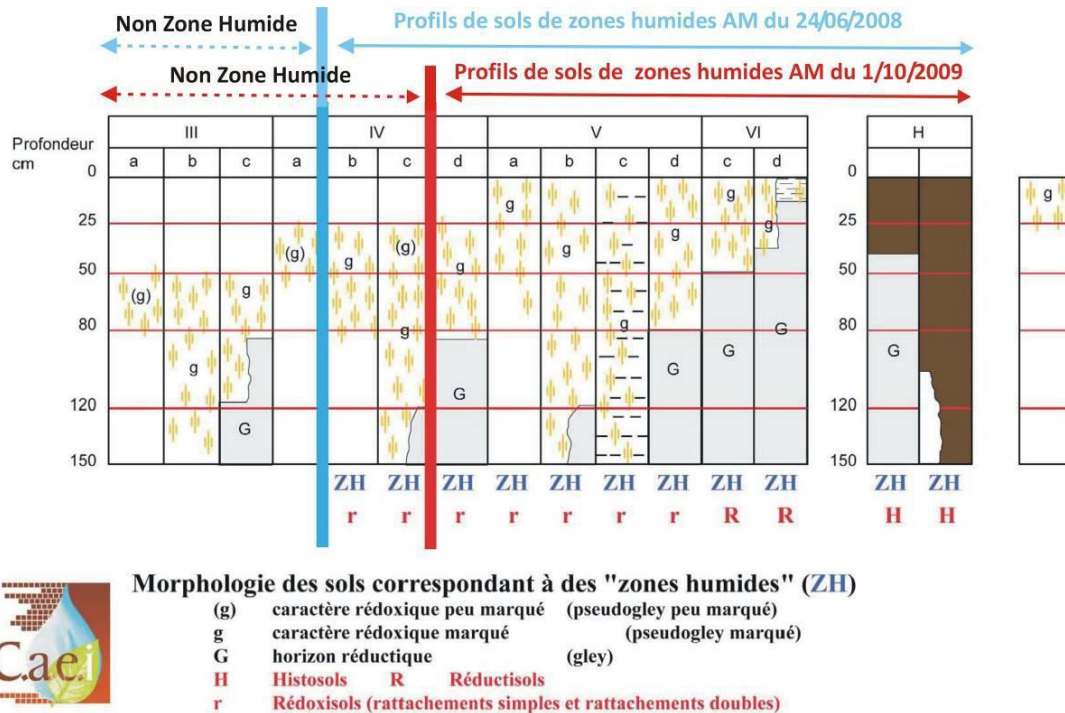
DÉNOMINATION SCIENTIFIQUE (“ Références ” du référentiel pédologique, Afes, Baize et Girard, 1995 et 2008)	ANCIENNES DÉNOMINATIONS (“ groupes ” ou “ sous-groupes ” de la CPCS, 1967)
HISTOSOLS (toutes références d').	Sols à tourbe fibreuse. Sols à tourbe semi-fibreuse. Sols à tourbe altérée.
REDUCTISOLS (toutes références de).	Sols humiques à gley (1). Sols humiques à stagnogley (1) (2). Sols (peu humifères) à gley (1). Sols (peu humifères) à stagnogley (1) (2). Sols (peu humifères) à amphigley (1).
REDOXISOLS (pro parte).	Sols (peu humifères) à pseudogley (3) ou (4).
FLUVIOSOLS-bruts REDOXISOLS (pro parte).	Sols minéraux bruts d'apport alluvial-sous-groupe à nappe (3) ou (4).
FLUVIOSOLS typiques-REDOXISOLS (pro parte).	Sols peu évolués d'apport alluvial-sous-groupe “ hydromorphes ” (3) ou (4).
FLUVIOSOLS brunifiés-REDOXISOLS (pro parte).	Sols peu évolués d'apport alluvial-sous-groupe “ hydromorphes ” (3) ou (4).
THALASSOSOLS-REDOXISOLS (toutes réf. de) (pro parte).	Sols peu évolués d'apport alluvial-sous-groupe “ hydromorphes ” (3) ou (4).
PLANOSOLS typiques (pro parte).	Sols (peu humifères) à pseudogley de surface (3) ou (4).
LUVISOLS dégradés-REDOXISOLS (pro parte).	Sous-groupe des sols lessivés glossiques (3) ou (4).
LUVISOLS typiques-REDOXISOLS (pro parte).	Sous-groupe des sols lessivés hydromorphes (3) ou (4).
Sols salsodiques (toutes références de).	Tous les groupes de la classe des sols sodiques (3) ou (4).
PELOSOLS-REDOXISOLS (toutes références de) (pro parte).	Sols (peu humifères) à pseudogley (3) ou (4).
COLLUVIOSOLS-REDOXISOLS.	Sols peu évolués d'apport colluvial (3) ou (4).
PODZOSOLS humiques et podzosols humoduriques.	Podzols à gley (1). Sous-groupe des sols podzoliques à stagnogley (1), (3) ou (4). Sous-groupe des sols podzoliques à pseudogley (3) ou (4).
(1) À condition que les horizons de “ gley ” apparaissent à moins de 50 cm de la surface. (2) À condition que les horizons de “ pseudogley ” apparaissent à moins de 50 cm de la surface et se prolongent, s'intensifient ou passent à des horizons de “ gley ” en profondeur. (3) À condition que les horizons de “ pseudogley ” apparaissent à moins de 25 cm de la surface et se prolongent, s'intensifient ou passent à des horizons de “ gley ” en profondeur. (4) À condition que les horizons de “ pseudogley ” apparaissent à moins de 50 cm de la surface et se prolongent, s'intensifient et passent à des horizons de “ gley ” en profondeur (sols “ à horizon réductique de profondeur ”).	

Tableau 5 : Tableau des profils pédologiques retenus par l'arrêté ministériel avec la correspondance entre les dénominations scientifiques de l'Afes et les anciennes dénominations de la CPCS (in Chambaud et al., 2002)

¹⁴ <https://inpn.mnhn.fr/telechargement/referentiels/habitats> (Page consultée en mai 2017)

Outre les typologies fondées sur les habitats, milieux et végétation, il existe aussi une typologie des sols hydromorphes pouvant servir de base à la classification des zones humides. Les principaux types de sols hydromorphes sont les suivants (in Chambaud et al., 2002) : histosols, reductisols, fluvisols, thalassosols, luvisols, pelosols, colluviosols, podzosols (Tableau 5).

L'identification d'un sol hydromorphe n'est pas forcément chose aisée. Il est nécessaire de rechercher différents traits d'hydromorphie à partir d'une description détaillée du sol pour déterminer ou non si le type de sol est indicateur de la présence de zones humides. La Figure 1 présente la correspondance entre morphologie des sols et zones humides.



d'après Classes d'hydromorphie du Groupe d'Étude des Problèmes de Pédologie Appliquée (GEPPA, 1981)

Figure 1 : Caractéristiques morphologiques des sols hydromorphes et comparatif avec les Arrêtés Ministériels (AM) de 2008 et 2009 (modifié par CAEi d'après les classes d'hydromorphie du Geppa). Des sols caractéristiques de zones humides selon l'AM du 24/06/2008, ne le sont plus dans l'AM modificatif du 1/10/2009 (in Chambaud et al., 2002)

2.2. Typologies hydrogéomorphologiques et fonctions hydrologiques

2.2.1. Approches hydrologiques et hydrogéomorphologique (HGM)

L'approche dite hydrogéomorphologique a été développée aux États-Unis au début des années 1990. Elle repose sur une classification hydrogéomorphologique des zones humides (Brinson, 1993) plusieurs fois mise à jour (NRCS, 2008 ; Brooks et al., 2013). L'objectif de cette approche vise initialement à évaluer qualitativement et quantitativement les fonctions des zones humides ripariennes (Brinson et al., 1993), puis des différents types de zones humides des États-Unis (Smith et al., 1995 ; Smith et al., 2013).

La classification hydrogéomorphologique est un système de classification hiérarchique fondé sur trois facteurs fondamentaux pour identifier les fonctions des zones humides (Smith et al., 2013 ; Gayet et al., 2016) :

- la configuration géomorphologique, définie par la localisation de la zone humide dans le paysage et la topographie (ex : dépression, vallée, plaine, géologie, têtes de bassins...) ;
- la source principale ou dominante d'alimentation en eau, c'est-à-dire l'origine de l'eau alimentant la zone humide (ex : précipitations, apports de surface et sub-surface, apports d'eau souterraine). Ce

PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides

facteur intègre les effets retard concernant le ruissellement, le débordement et le transit souterrain (Figure 2 et Figure 3) ;

- l'hydrodynamique, définie comme la direction, l'importance et les variations des flux d'eau de surface et de sub-surface dans la zone humide. Les mouvements peuvent être horizontaux et verticaux.

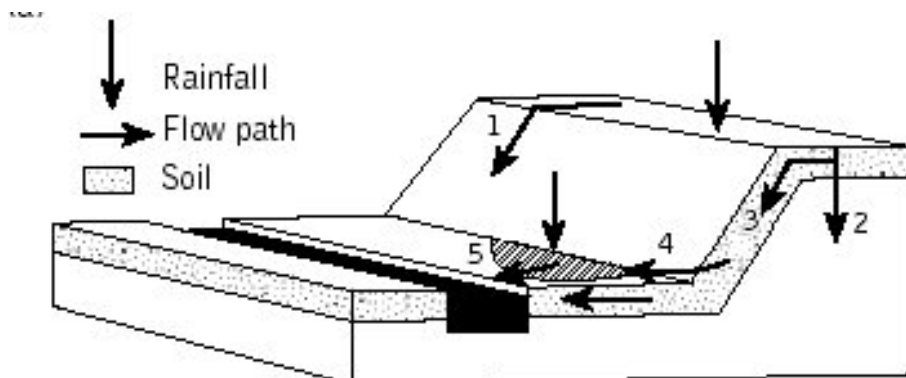


Figure 2 : Voies de transit potentielles des eaux de pluies arrosant une tête de bassin versant (Smith et al., 2013)
Possible flow paths of rainfall on hill slopes, including (1) infiltration-excess overland flow; (2) groundwater recharge; (3) throughflow; (4) return flow; and (5) saturation overland flow (Smith et al., 2013)

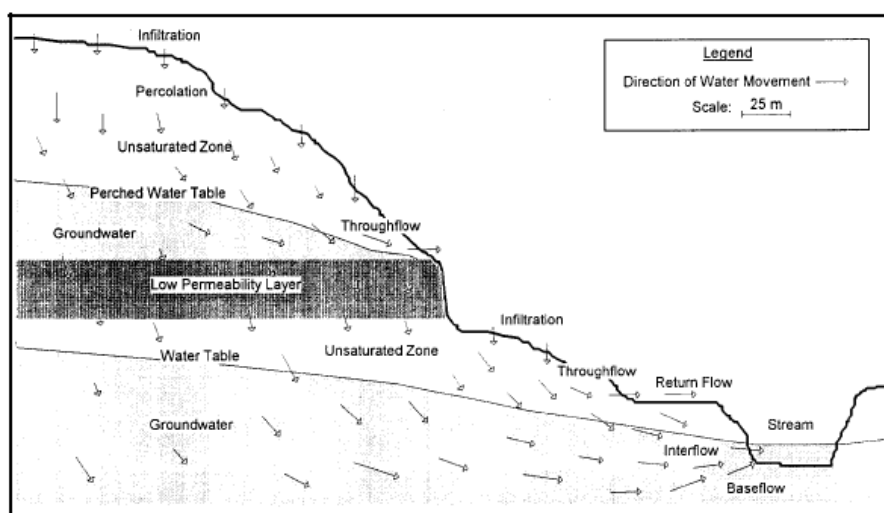


Figure 3 : Sources d'alimentation en eau potentielles des zones humides (Smith et al., 1995)

Hydrogeomorphic Classification Factors			Potential Wetland Subclasses	
Geomorphic Setting	Water Source	Hydrodynamics	Eastern USA	Western USA/Alaska
Depression	Groundwater or interflow	Vertical fluctuation	Prairie pothole marshes, Carolina bays	Vernal pools
Fringe (tidal)	Ocean	Bidirectional, horizontal	Chesapeake Bay and Gulf of Mexico tidal marshes	San Francisco Bay marshes
Fringe (lacustrine)	Lake	Bidirectional, horizontal	Great Lakes marshes	Flathead Lake marshes
Slope	Groundwater	Unidirectional, horizontal	Fens	Avalanche chutes
Flat (mineral soil)	Precipitation	Vertical	Wet pine flatwoods	Large playas
Flat (organic soil)	Precipitation	Vertical	Peat bogs; portions of Everglades	Peatlands over permafrost
Riverine	Overbank flow from channels	Unidirectional, horizontal	Bottomland hardwood forests	Riparian wetlands

Adapted from Smith et al. (1995) and Rheinhardt et al. (1997).

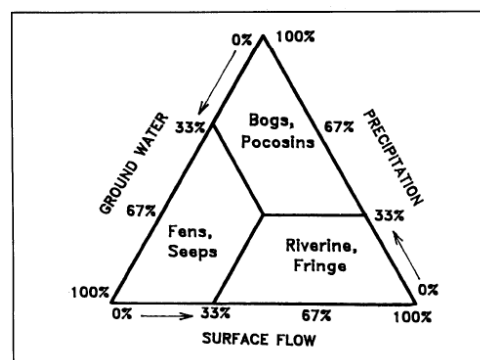


Tableau 6 : Origine de l'alimentation en eau et hydrodynamique pour les 7 types de la classification hydrogéomorphologique (in Smith et al., 2013) – à gauche

Figure 4 : Contribution relative des sources d'alimentation en eau des zones humides (Brinson, 1993) – à droite

La classification hydrogéomorphologique distingue 7 grands types de zones humides (Smith et al., 2013) pour les États-Unis (voir Tableau 6 et Tableau 7 pour les définitions précises). Ces types sont schématisés en coupes et en plans (voir exemples : Figure 5, Figure 6, Figure 7, Figure 8, Figure 9, Figure 10).

Le Tableau 6 donne les sources dominantes d'alimentation en eau (Figure 4) et l'hydrodynamique pour les 7 grands types des zones humides. Comme pour les classifications présentées précédemment, ces grandes classes sont scindées en sous-classes.

Outre la classification hydrogéomorphologique, il existe d'autres modèles de classification des zones humides aux États-Unis. Dans un travail de synthèse, l'US EPA (2002) liste de nombreux modèles de classification des zones humides. Ils peuvent être fondés sur différents critères déjà évoqués précédemment (ex : occupation des sols, habitats, écorégions, unités écologiques...) et/ou ciblés sur des milieux spécifiques (ex : estuaires, marais, cours d'eau, ...).

Class	Definition
Depression	Depression wetlands occur in topographic depressions that allow the accumulation of surface water. They are distinguished from Lacustrine Fringe wetlands by the lack of deep water areas found in lakes, reservoirs, and other large bodies of water. Depressions may have any combination of inlets and outlets, or lack them completely. Potential water sources are precipitation, overland flow, streams, or groundwater flow from adjacent uplands. The predominant direction of flow is from the margins of the topographic depression to the lowest point in the depression. Hydrodynamically, depressions exhibit vertical fluctuations with temporal scales ranging from a few days to many months. Depressions lose water through intermittent or perennial outlets, infiltration and percolation to subsurface layers, and evapotranspiration. Small or "micro" depression areas that occur in association with other wetland classes, such as riverine or flat wetlands, are generally not considered to belong to the depression class, but rather are considered to be characteristic components of the wetland class in which they occur. Prairie potholes, playa lakes, vernal pools, Carolina Bays, and cypress domes are common examples of depression wetlands.
Tidal Fringe	Tidal fringe wetlands occur along coasts and estuaries under the influence of sea level and tides. They intergrade landward with riverine wetlands where tidal influence diminishes and channel flow becomes the dominant water source. Additional water sources may be groundwater and precipitation. Because tidal fringe wetlands are frequently flooded and water table elevations are controlled mainly by sea surface elevation, tidal fringe wetlands seldom dry for significant periods. Tidal fringe wetlands lose water by tidal exchange, by overland flow to tidal creek channels, and by evapotranspiration. Organic matter normally accumulates in higher elevation marsh areas where flooding is less frequent and the wetlands are isolated from shoreline wave erosion by intervening areas of low marsh or dunes. <i>Spartina alterniflora</i> salt marshes are a common example of tidal fringe wetlands.
Lacustrine Fringe	Lacustrine fringe wetlands are adjacent to lakes, reservoirs, or other large bodies of water. Sources of water are the adjacent body of water, precipitation and groundwater discharge where lacustrine fringe wetlands intergrade with uplands or slope wetlands. Surface water flow is bidirectional. Lacustrine fringe wetlands lose water by flow returning to the adjacent body of water after flooding, and evapotranspiration. Organic matter may accumulate in areas sufficiently protected from shoreline wave erosion. Unimpounded marshes of the Great Lakes are an example of lacustrine fringe wetlands.
Slope	Slope wetlands are found on slightly sloping to steeply sloping land surfaces where groundwater discharge or saturated overland flow occurs without channel formation. Slope wetlands are distinguished from depression wetlands by the lack of a closed topographic depression and the predominance of the groundwater water source. Precipitation is also a potential source of water. Hydrodynamics are dominated by downslope, unidirectional flow of water. Slope wetlands lose water primarily by saturated subsurface flows, surface flows, and by evapotranspiration. Fens are a common example of slope wetlands.
Mineral Soil Flats	Mineral soil flats are most common on relatively flat land surfaces such as interfluvies, extensive relic lake bottoms, or large alluvial terraces. The primary source of water is precipitation. They receive virtually no groundwater discharge, which distinguishes them from the depression and slope wetland classes. Dominant hydrodynamics are vertical fluctuations. Mineral soil flats lose water by overland flow, infiltration, and percolation to subsurface layers, and evapotranspiration. They are distinguished from non-wetland flats land surfaces by their poor vertical drainage due to low permeability soils or impermeable layers (e.g., hardpans), slow lateral drainage, and low hydraulic gradients. Pine flatwoods on hydric soils are an example of mineral soil flat wetlands.
Organic Soil Flats	Organic soil flats, or extensive peatlands, differ from mineral soil flats in part because their elevation and topography are controlled by vertical accretion of organic matter. They commonly occur on flat interfluvies, but may also be located where depressions have become filled with peat to form a relatively large flat surface. Precipitation is the dominant water source, while water loss is via overland flow and infiltration and percolation to subsurface layers. Portions of the Everglades and northern Minnesota peatlands are examples of organic soil flat wetlands.
Riverine	Riverine wetlands occur in floodplains and riparian corridors associated with stream channels. The dominant sources of water are overbank or backwater flow from the stream channel. Additional sources may be groundwater or overland flow from adjacent uplands, tributary inflow, and precipitation. During overbank events, the hydrodynamics of riverine wetlands are unidirectionally downstream. Headwater riverine wetlands often intergrade with slope, depression, or flat wetlands as the stream channel diminishes. Riverine wetlands lose water via the return of surface water to the stream channel, infiltration and percolation to subsurface layers and the stream channel, and evapotranspiration. Bottomland hardwood forests on floodplains are an example of riverine wetlands.

Tableau 7 : Classification hydrogéomorphologique : définitions (Smith et al., 2013)

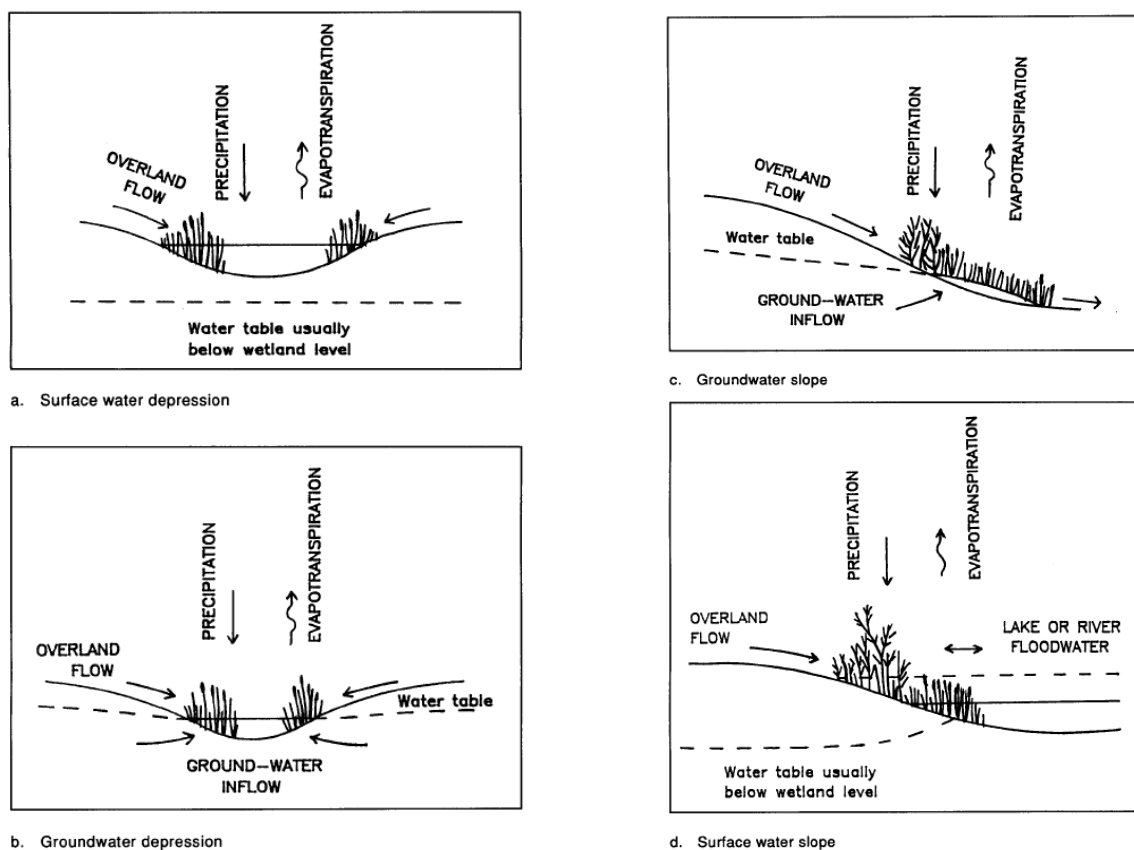


Figure 5 : Exemple des 4 grands types de zones humides du Wisconsin (Brinson, 1993)

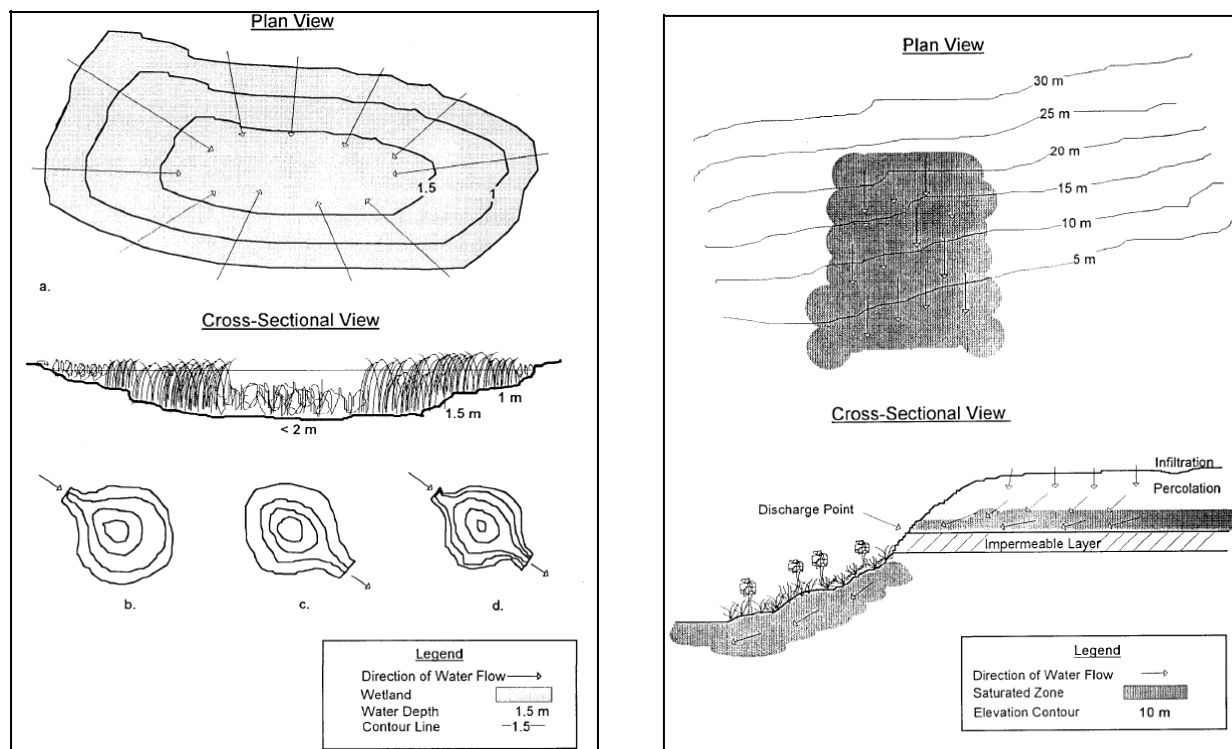


Figure 6 : Zones humides de dépression (Smith et al., 1995) – à gauche

Figure 7 : Zones humides de pente (Smith et al., 1995) – à droite

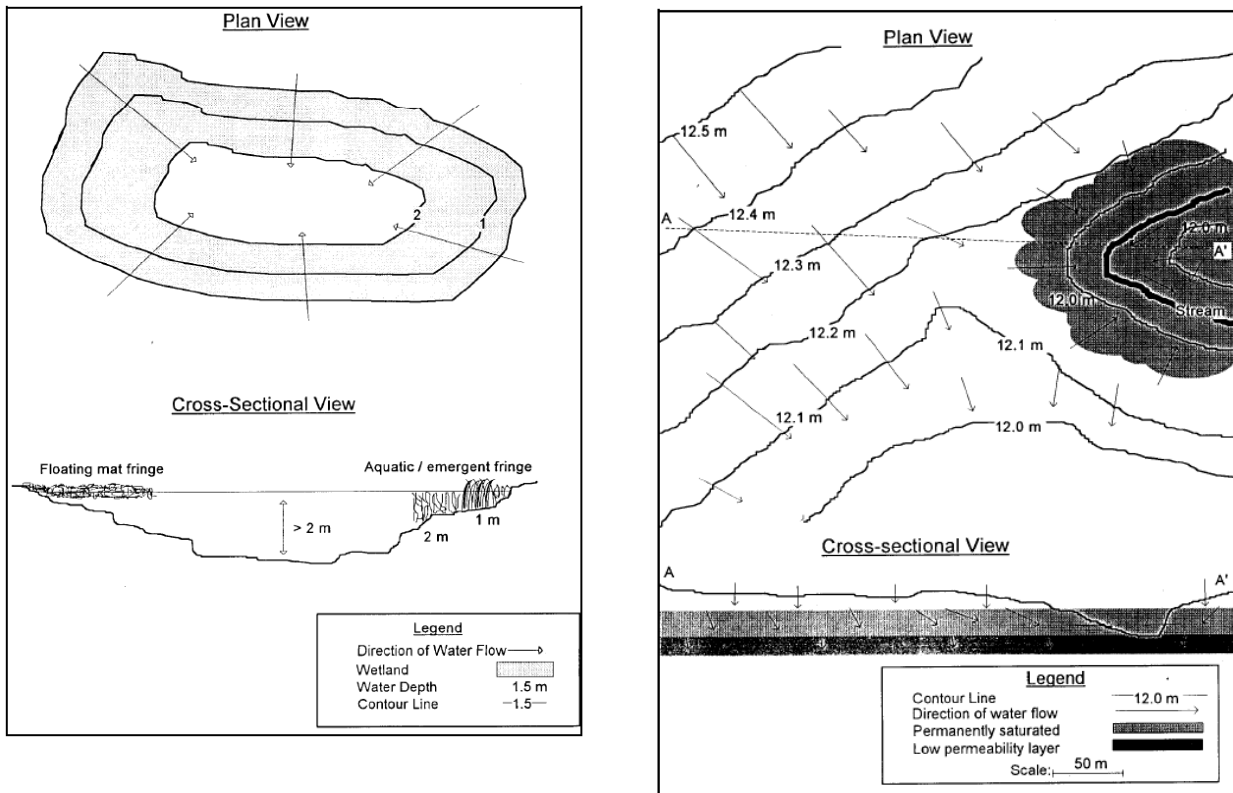


Figure 8 : Zones humides des franges lacustres (Smith et al., 1995) – à gauche
 Figure 9 : Zones humides plates à sols minéralisés (Smith et al., 1995) – à droite

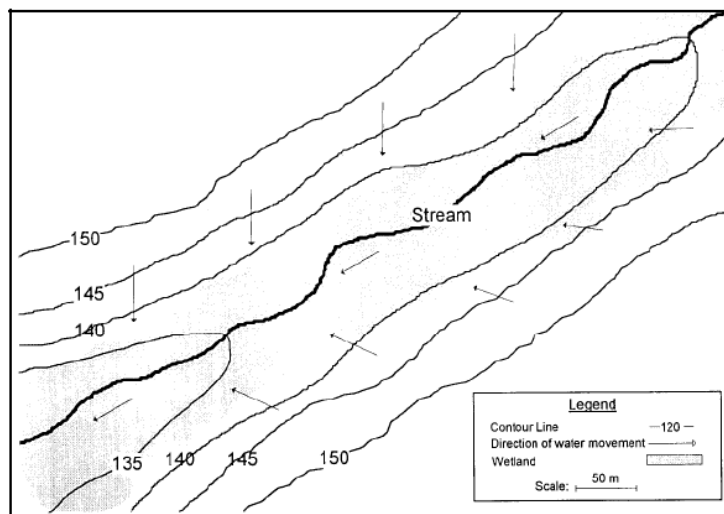


Figure 10 : Zones humides rivulaires (Smith et al., 1995)

L'approche hydrogéomorphologique propose donc un système de classification des zones humides fondé sur des critères et des propriétés géomorphologiques, hydrologiques et hydrodynamiques, et un système d'indicateurs visant à caractériser et à estimer les fonctions des zones humides (Tableau 8).

Pour la France, Gayet et al. (2016) dans le cadre de leurs travaux sur l'évaluation des fonctions des zones humides ont retenus cinq des sept systèmes hydrogéomorphologiques proposés par Brinson (1995) (Tableau 9) : (1) alluvial, (2) riverain des étendues d'eau, (3) de dépression, (4) de versant et bas-versant et (5) de plateau. Ils proposent ainsi une clef de détermination des systèmes hydrogéomorphologiques adaptée à la France (Figure 12) d'après les travaux de Brinson (1993) et Smith et al. (1995) (Figure 11).

PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides

Hydrologic Functions	Potential Metrics
Temporary Storage of Surface Water Subsurface Storage of Water Maintenance of Base Flows	Average volume of water stored ($m^3/ha/yr$) Percent reduction in flow peaks (%) Lag time of input and output flow peaks (d) Percent reduction in water velocity (%) Volume of water absorbed ($m^3/ha/yr$) Volume of available pore space (m^3/ha) Difference in low flows above/below wetland (%) Wetland contribution to low flows ($m^3/ha/d$)
Biogeochemical Functions	Potential Metrics
Cycling of Nutrients Removal of Elements and Compounds Retention of Particulates Export of Organic Carbon	Net primary productivity ($kg/ha/yr$) Annual turnover of detritus ($kg/ha/yr$) Denitrification rate ($kg/ha/yr$) Soil denitrification enzyme activity (DEA, $gN/g/d$) Amount of sediment trapped ($tons/ha/yr$) Sediment accretion rate (cm/yr) Rate of biomass export ($kg/ha/yr$)
Habitat Functions	Potential Metrics
Support Characteristic Plant Community Support Characteristic Wildlife Community Support Characteristic Invertebrate Community Support Landscape/Regional Biodiversity	Diversity of native plant species (index, H') Number of rare or endemic species (count) Species richness of vertebrates (count) Number of species of forest interior birds (count) Density of breeding amphibians (number/ha) Invertebrate biomass (kg/ha) Arthropod species richness (count) Number of species unique or rare in the region (count) Number of food web links (count)

Tableau 8 : Fonctions des zones humides et indicateurs (Smith et al., 2013)

Système hydrogéomorphologique	Source d'eau dominante	Hydrodynamique dominante
Alluvial	Débordement de cours d'eau	Unidirectionnelle, horizontale
Riverain des étendues d'eau	Débordement des étendues d'eau	Bidirectionnelle, horizontale
Dépression	Décharge de nappe et apports de subsurface	Verticale
Versant et bas-versant	Décharge de nappe	Unidirectionnelle, horizontale
Plateau	Précipitation	Verticale

Tableau 9 : Apports majeurs d'eau et caractéristiques hydrodynamiques dominantes des classes hydrogéomorphologiques (In Gayet et al., 2016 d'après Brinson, 1995)

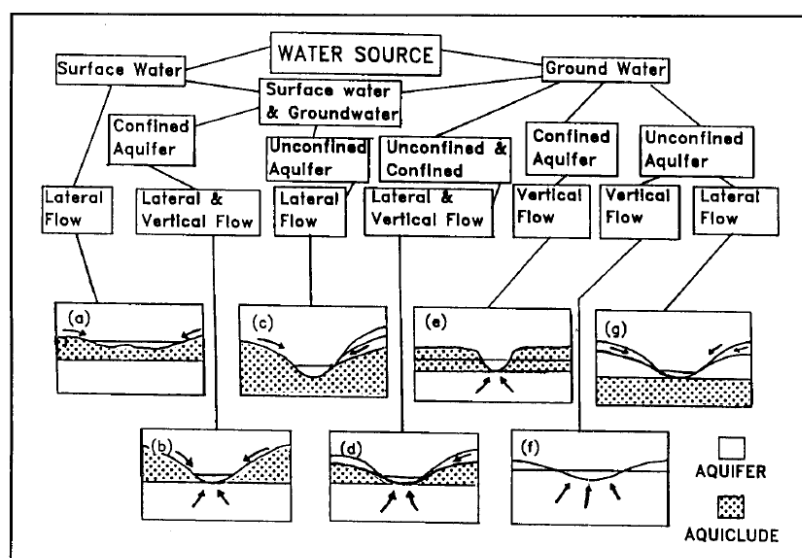


Figure 11 : Classification hydrogéologique des tourbières (Gilvear et al., 1989)

Hydrogeologic classification of Gilvear et al. (1989) for East Anglian fens. Description of wetland classes are as follows: (a) those fed by surface water runoff and wetlands that receive river flooding, (b) those receiving aquifer discharge in addition to some surface water, (c) those fed by surficial groundwater in addition to some surface water, (d) those receiving both surficial groundwater and aquifer discharge, (e) those fed predominately by aquifer discharge with minor surface water input, (f) those fed by unconfined main aquifer, and (g) those receiving total surficial groundwater. Precipitation inputs are assumed similar in all examples (in Brinson, 1993)

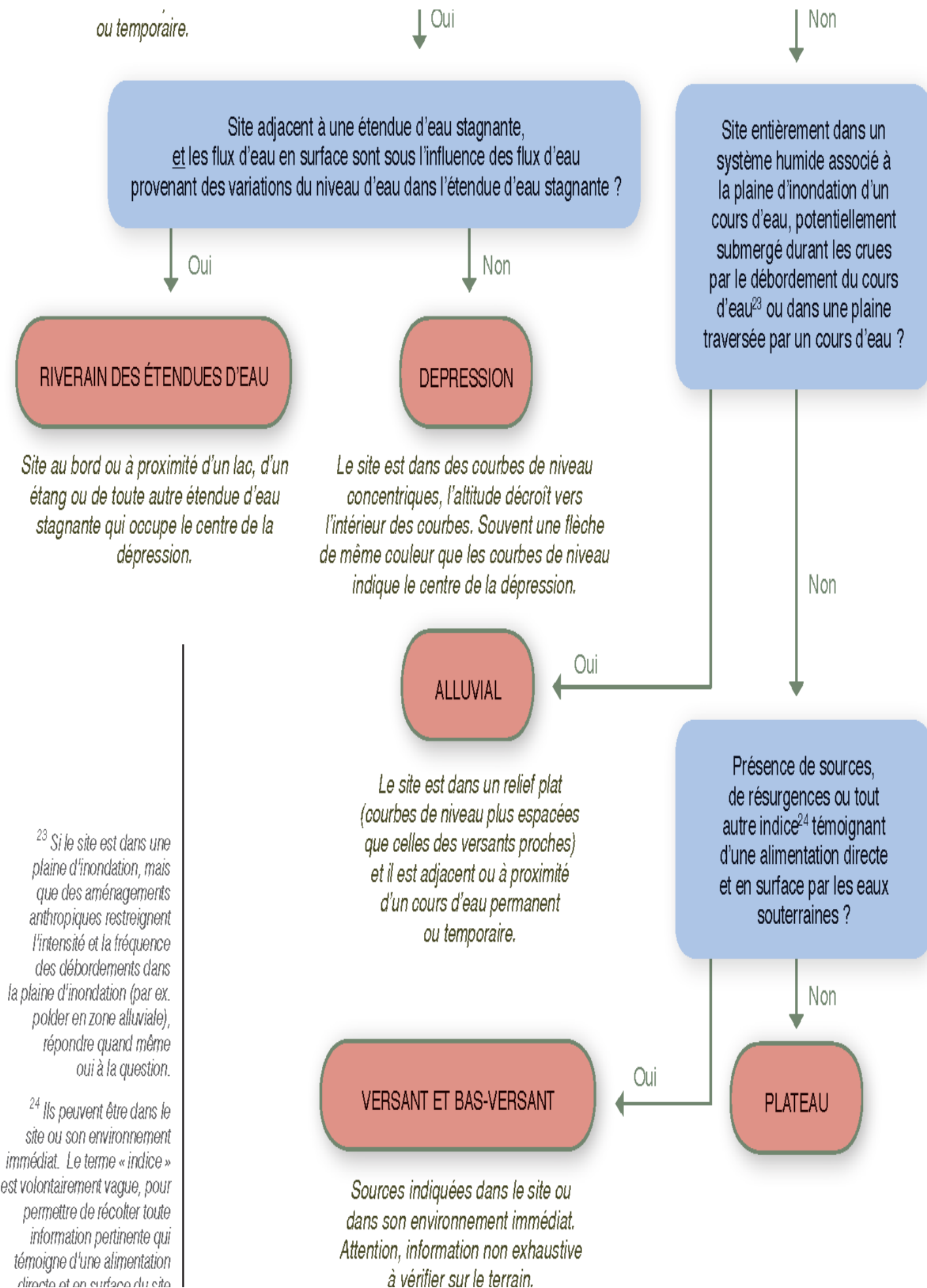


Figure 12 : Clef de détermination des systèmes hydrogéomorphologiques (adaptée de Smith et al. 1995 in Gayet et al., 2016)

PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides

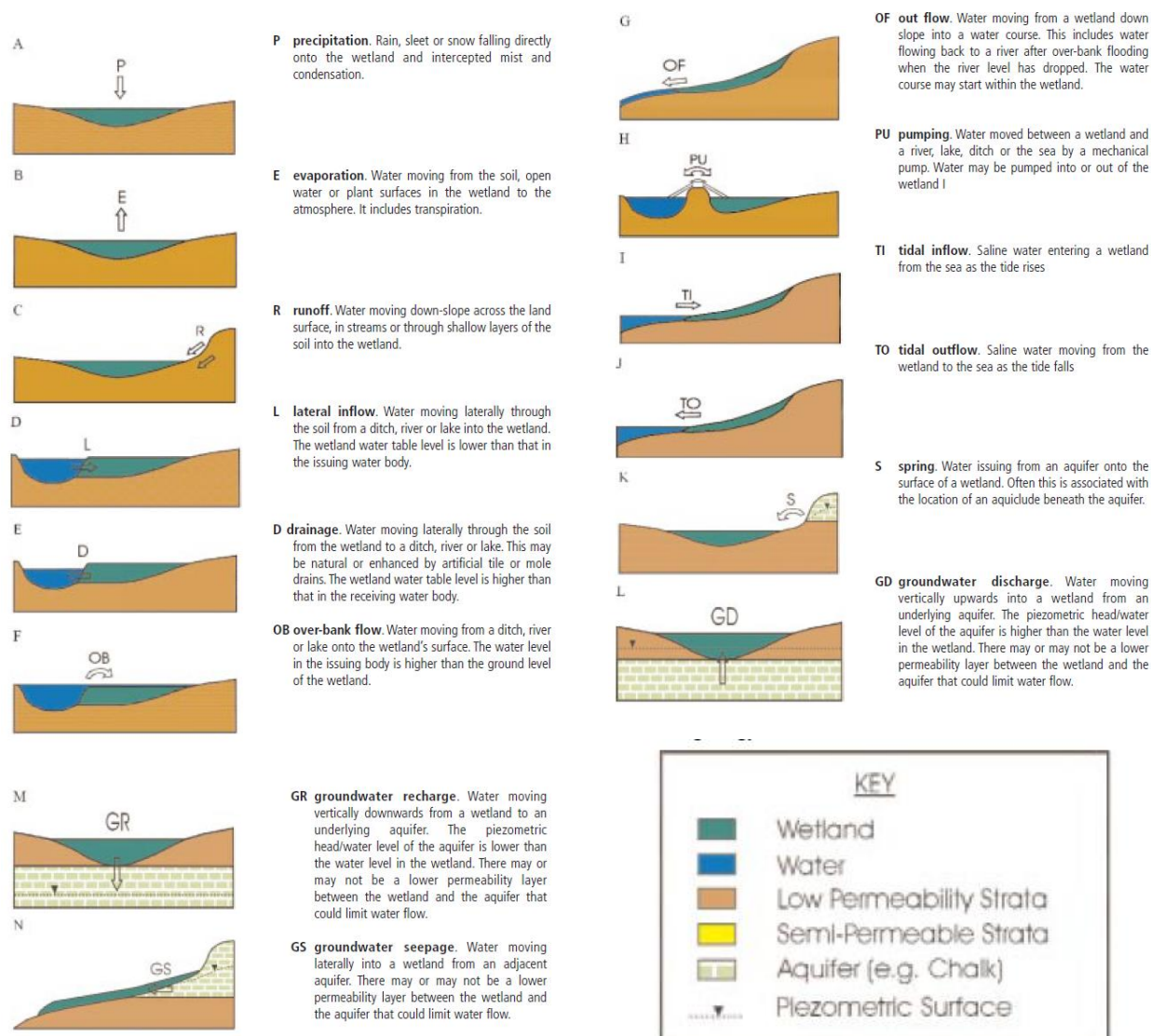


Figure 13 : Mécanismes de transfert d'eau dans les zones humides (Acreman et Miller, 2006)

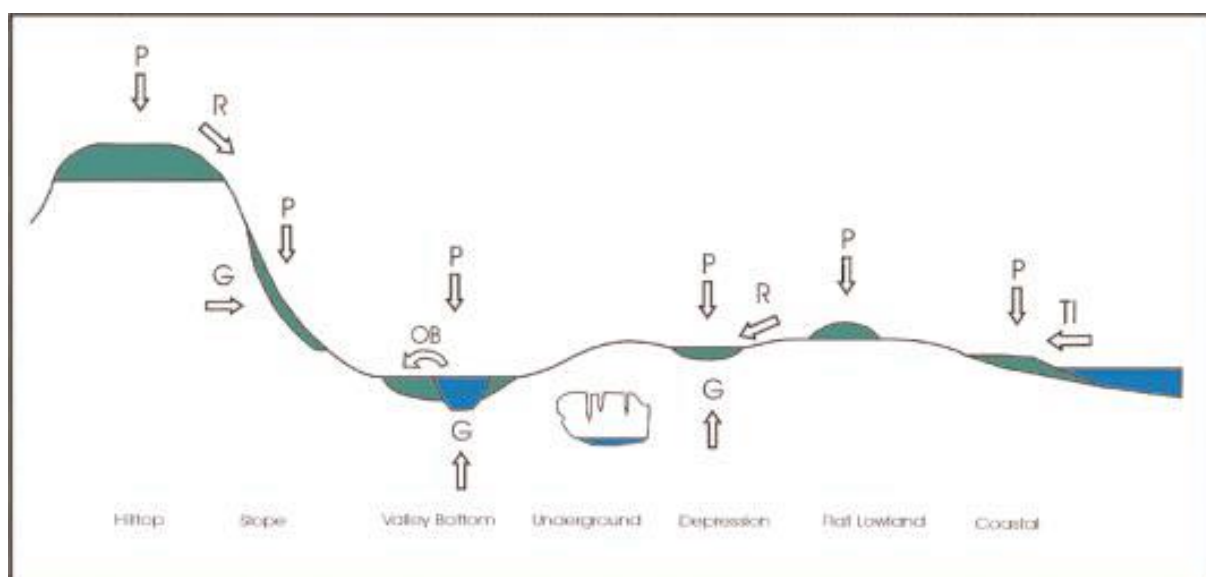


Figure 14 : Typologie topographique des zones humides (Acreman et Miller, 2006) (La légende des types d'alimentation est présentée Figure 13)

Landscape location	Sub-type based on water transfer mechanism
Flat upland wetlands	Upland surface water fed
Slope wetlands	Surface water-fed
	Surface and groundwater-fed
Valley bottom wetlands	Groundwater-fed
	Surface water-fed
	Surface and groundwater-fed
Underground wetlands	Groundwater-fed
Depression wetlands	Surface water-fed
	Surface and groundwater-fed
Flat lowland wetlands	Groundwater-fed
Coastal wetlands	Lowland surface water fed
	Surface and groundwater-fed
	Groundwater-fed

Tableau 10 : Types topographiques de zones humides et sous-types liés aux mécanismes de transfert d'eau (Acreman et Miller, 2006)

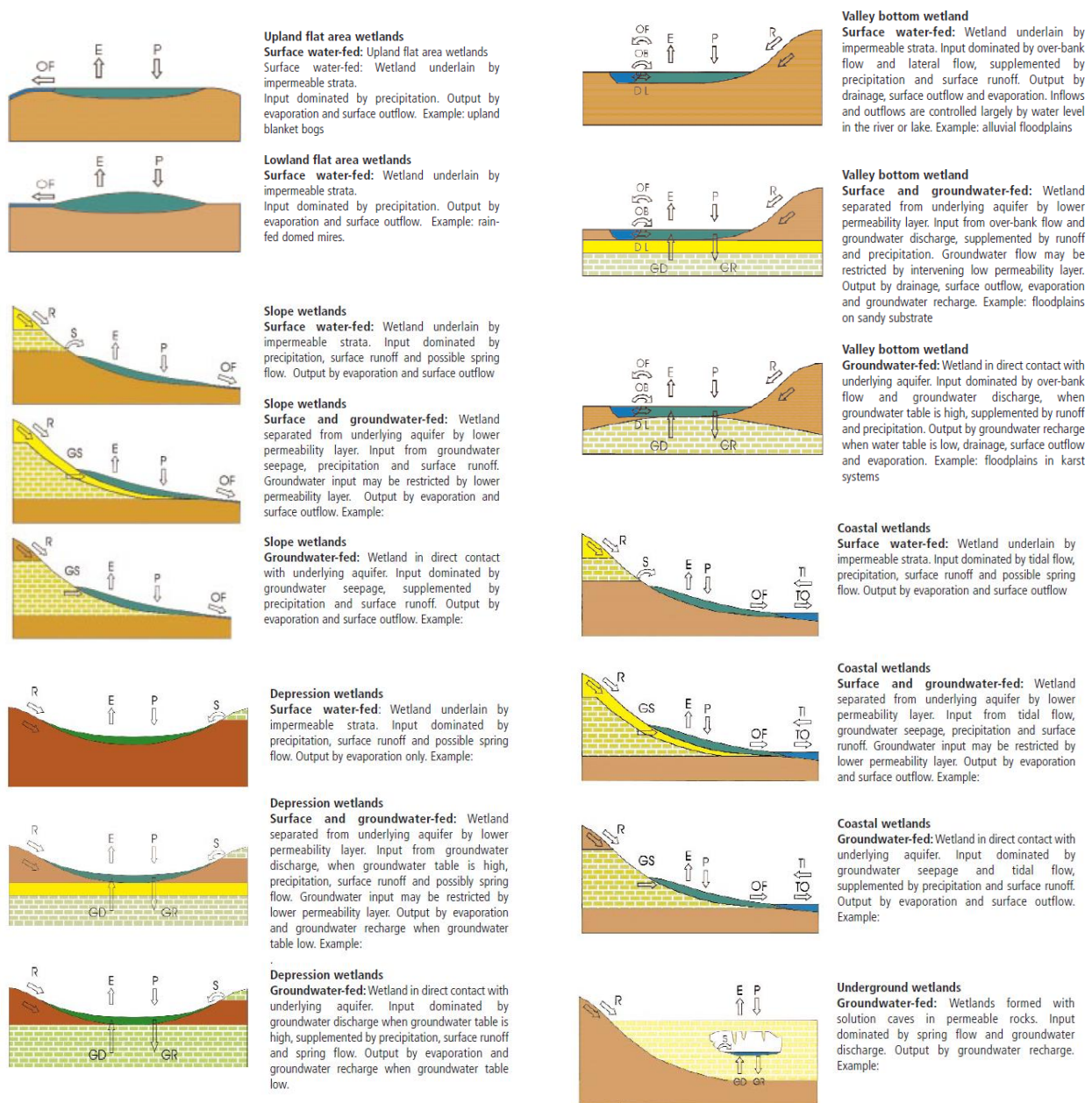


Figure 15 : Description des différents types de zones humides selon Acreman et Miller (2006) : zones humides plates, zones humides de pentes, zones humides de dépression, zones humides de bas de vallées, zones humides côtières et zones humides souterraines

PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides

Acreman et Miller (2006) proposent aussi une typologie des zones humides fondées sur la position topographique dans le paysage et les mécanismes de transferts d'eau (Figure 13, Figure 14, Figure 15, Tableau 10)

La plupart des documents consultés dans le cadre de ce travail bibliographiques mettent en avant 3 grandes familles de typologies fonctionnelles des zones humides (Gayet et al, 2016 ; Smith et al., 2013 ; Forum des Marais Atlantiques, 2014 ; PNRZH, 2005) :

- Fonctions hydrologiques : stockage (longitudinal et transversal), transfert, régulation des inondations, diminution des forces érosives, soutien d'étiage des cours d'eau, régulation-vidange des aquifères ;
- Fonctions épuratrices ou biogéochimiques : rétention des MES (matières en suspension), transformation et consommation des nutriments et des toxiques, stockage de carbone, maintien de la qualité de l'eau ;
- Fonctions écologiques ou d'habitats : richesses et diversité, corridor écologique.

Ces fonctions assurent des services utiles aux sociétés humaines : régulation des inondations, amélioration de la qualité de l'eau, diminution de l'érosion, soutien d'étiage, maintien de la biodiversité, réduction des émissions de GES, développement économique et socio-culturel.

2.2.2. Focus sur les tourbières

Les tourbières ou systèmes de tourbières sont des milieux très étudiés. Ils sont intéressants dans le cadre de cette étude car fréquemment présents sur les têtes de bassins versants. Les éléments présentés ci-après sont tirés des travaux de Manneville et al. (1999).

Ces milieux très étudiés sont décrits par un vocabulaire précis reflétant : la structuration verticale ou spatiale, le type, les modes d'alimentations en eaux, les modalités de mises en place et la vie biologique. Les définitions des principaux termes sont données au Tableau 11.

Ces milieux fragiles sont soumis à des dégradations et destruction. Ils sont souvent caractérisés par la présence de sphaignes, organismes ingénieurs, pourvus de cellules spécialisées dans le stockage d'eau (Hyalocystes). Ces organismes peuvent stocker de 15 à 30 fois leur poids sec en eau. On estime que 1m² de sphaignes de 20 cm d'épaisseur peut stocker jusqu'à 70 kg d'eau.

Le bilan de l'eau de ces milieux est équilibré sinon positif. Cette caractéristique est nécessaire au développement des tourbières. La formation de tourbe est possible si ces milieux sont inondés ou engorgés d'eau au moins 6 mois de l'année. Cette condition est souvent liée à la géomorphologie et au climat, même si d'autres facteurs comme l'alimentation hydrique entrent en jeu (Figure 16).

L'assèchement provoque l'oxygénation des sédiments et l'augmentation de l'activité microbienne qui décompose la matière organique pour la minéraliser. Dans les tourbières, l'évapotranspiration et l'échauffement sont limités par le dessèchement superficiel de la végétation. En période humide, les précipitations abondantes dilatent les pores de la tourbe et provoquent une circulation latérale d'eau. En période sèche, on observe la fermeture des pores de la tourbe et un tassement de la tourbe. L'eau liée à la tourbe n'est alors plus utilisable par les plantes.

Les tourbières à sphaignes créent des conditions microclimatiques : forte humidité de l'air (100%) au moins chaque nuit pendant plusieurs heures ; forte condensation au-dessus des buttes de sphaignes qui compense la dessiccation en été (jusqu'à 30% de saturation) ; grands écarts thermiques en été entre la surface et la sub-surface (effet isolant des sphaignes). Au final, les conditions climatiques ressemblent à celles de la toundra.

Terme	Définition
Acrotelm(e)	Couche supérieure de l'histosol, de quelques décimètres d'épaisseur, où l'eau, plus ou moins abondante suivant les saisons, circule latéralement et très lentement et où il y a une certaine décomposition
Bas-marais	Marais détrempé jusqu'à sa surface par affleurement de la nappe
Catotelm(e)	Couche inférieure de l'histosol, très épaisse, où l'eau est piégée en permanence et où il n'y a presque plus de dégradation de la tourbe, mais un fort tassement
Condensarogène	Tourbière dont l'eau provient, par condensation, de l'air circulant dans un éboulis froid
Couverture (tourbière)	Tourbière ombrogène recouvrant tous les reliefs dans les régions atlantiques humides
Fluviogène (ou telmatogène)	Tourbière issue d'une inondation périodique par une nappe alluviale
Haut-marais (tourbière bombée)	Tourbière ombrotrophe, alimentée uniquement par des eaux de pluie ou de neige, très acide, très pauvre en minéraux, et souvent caractérisée par les sphaignes et par un bombement au-dessus du niveau de la nappe minérotrophe
Limnogène	Tourbière ou marais provenant de l'atterrissement d'un plan d'eau
Marais plat (tourbière plate)	Marais eutrophe, neutrobasiq, à niveau d'eau proche de la surface du sol
Minérotrophe (ou géotrophe)	Type d'alimentation hydrique par des eaux plus ou moins riches en sels minéraux récupérés sur ou dans le substrat minéral où elles ont circulées
Mixte (tourbière)	Tourbière comportant à la fois haut et bas marais
Ombrogène	Tourbière dont l'origine est due exclusivement aux précipitations
Ombrotrophe	Type d'alimentation par des eaux météoriques (neige et pluie) acides et très pauvres en minéraux, donc oligotrophes ; ceci correspond à un isolement par rapport au substrat géologique originel
Paratourbeux	Biotopes ou communautés faisant la transition entre les tourbières et les autres milieux, ayant moins de 20 à 40cm de tourbe
Soligène	Type de tourbière provenant du ruissellement ou de la percolation des eaux sur les pentes pas trop fortes ou encore de sources (l'eau circule donc plus ou moins vite)
Topogène	Tourbière dont l'origine est une nappe affleurante stagnante dans une dépression ; quand cette nappe est bloquée par une nappe d'eau salée d'origine marine plus dense, il s'agit du sous-type thalassogène
Transition (tourbière ou marais)	Minéro-ombrotrophe, alimenté à la fois pour des eaux de nappe et météoriques
Turficole	Espèce ou groupement végétal présent surtout sur la tourbe
Turfigenèse (tourbification)	Production de tourbe par la végétation dite alors turfigène
Tyrphobionte, tyrphophile, tyrphoxène	Termes qualifiant les relations des animaux avec les milieux tourbeux – de tyrpho (tourbe) – bionte (qui vit toujours dans ce milieu) – phile (qui fréquente ce milieu pour certaines phases de la vie) – xène (étranger et accidentel)

Tableau 11 : Définitions liées aux tourbières (Sélection de définition in Manneville et al., 1999)

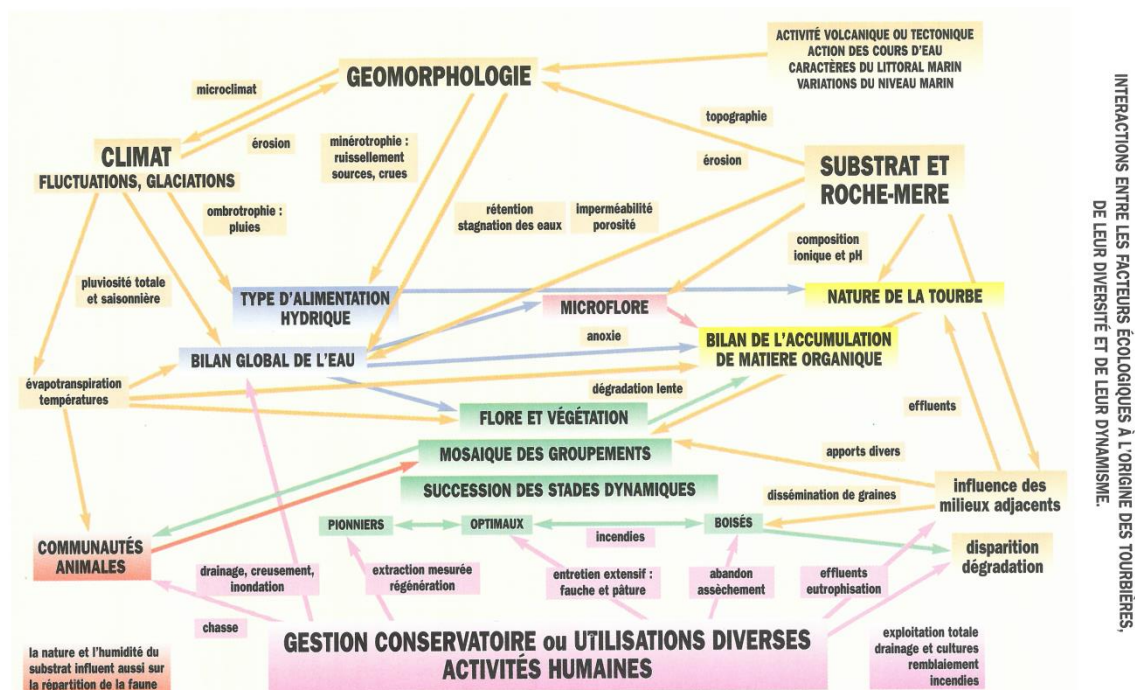


Figure 16 : Facteurs expliquant l'origine et la formation des tourbières (Manneville et al., 1999)

PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides

La tourbe ou histosol est un dépôt sédimentaire carboné et peu consolidé dont les épaisseurs varient de quelques décimètres à plusieurs dizaines de mètres (jusqu'à 30m). Il existe différents type de tourbes :

- tourbe blonde : texture fibrique, faible densité, grande porosité, forte teneur en eau (95%), forte acidité, pauvreté en ions ;
- tourbe brune : texture mésique à fibrique, fibres accompagnées d'éléments plus fins (dégradation des végétaux), teneur en eau (88%) / évolution du type précédent ;
- tourbe noire : texture mésique à saprique (moins de fibres), teneur en eau (87%).

Dans la tourbe, d'autres niveaux peuvent s'intercaler en fonction de son histoire : débris végétaux grossiers, sédiments argileux, sableux ou graveleux, cendres volcaniques ou d'incendies, sédiments limono-argileux bleu-verdâtre type gley (crues). La structuration verticale d'une tourbière est généralement caractérisée par deux couches :

- couche inférieure ou catotélme : eau piégée, ancienne, pauvre en ions, très réductrice, chimie stable, sous le niveau de la nappe ;
- couche supérieure ou acrotélme : 30 à 60 cm d'épaisseur (présence des racines), circulation d'eau, plus riche en ions et en oxygène, chimie plus variable, plus hétérogène, soumis aux conditions climatiques (ex : fortes variations de température, pluies, sécheresse, neige...), alimentation essentiellement par les pluies, peu de relation avec le catotélme, l'eau s'échappe par évapotranspiration.

Quand la tourbière se minéralise, c'est que l'eau ne reste pas assez longtemps dans l'acrotélme.

Les tourbières façonnent les paysages. Manneville et al. (1999) mettent en avant 5 grands types de milieux et d'autres types plus marginaux. On note qu'il existe des types intermédiaires.

Type	Description et exemples
Landes tourbeuses	Pente faible, altitude moyenne, climat humide, températures estivales peu élevées, aspect sec, épaisseur de tourbe faible (quelques décimètres) Ex : Tourbière de Montselgues
Grands marais tourbeux de plaine ou de bordure des lacs périalpins	Vaste surface, larges dépressions (vallées fluviales, estuaires, deltas, bord de grands lacs), apport d'eau et minéraux par les crues et températures estivales favorables à la végétation, basse altitude, étiages en fin d'été, eau près de la surface du sol Ex : Marais de Lavours
Lacs-tourbières	Forêts montagnardes épaisses et sombres, moyenne altitude, topographie en creux (glaciaire, volcanique), climat frais aux pluies abondantes, radeaux flottants Ex : Lac du Luitel
Tourbières bombées ou semi-bombées	Grandes épaisseurs de tourbes (10 m et plus), climat à tendance boréale (frais à froid, humide toute l'année), eau uniquement météorique, milieu pauvre en minéraux et très acide, sphaignes Ex : Tourbière de Praubert (plateau de Gavot), Tourbière de Frasne
Tourbières de pentes et de sources	Alimentées par de l'eau en circulation (sol, résurgence), dépendantes de la nature du bassin d'alimentation, eau oxygénée et riche en minéraux (tuf fossilisant la végétation), acides, neutro-basiques Ex : Tourbière des Creusates
Autres types	Tourbières dérivées de paises (effondrement de lentilles de glaces) Ex : Ardennes belges Marais tourbeux arrière littoraux et panes (dépressions dunaires ou anciennes lagunes) Ex : Marquenterre en baie de Somme Tourbières et marais tourbeux de haute montagne (en lien avec les reliefs hérités des glaciations) Ex : Massif de Rinosu Corse Bois tourbeux Ex : Marais du Bourget

Tableau 12 : Types de paysages de tourbières en France (D'après Manneville et al., 1999)

Il existe des situations géomorphologiques favorables à la naissance des tourbières (Tableau 13). Ces événements peuvent être rapides ou violents (ex : volcanisme, éboulement, tempête, crue...) ou graduels (ex : tectonique, eustatisme, méandrage, glaciation, érosion...).

Situations géomorphologiques	Phénomènes et exemples
Dépressions	Actions des cours d'eau, glaciers, volcans, mer ; érosion différentielle ; karstification ; éboulement ; actions humaines
Grands réseaux hydrographiques	Marais régulateur de crue et d'étiage ? Ex : rive des grands lacs, vallées de grands cours d'eau, bras mort, estuaires,
Glaciers et phénomènes glaciaires	Surcreusement et dépôt de moraines Ombilics et verrous / (ex : Luitel) / surcreusement et formation d'une cuvette à l'amont d'un obstacle plus résistant Retrait des glaciers et création de vallums morainiques riches en argiles imperméables (farine glaciaire) qui forment un barrage Cirque et langue glaciaire / aval front glaciaire, replat Passe liée à la fonte du pergélisol / thermokarst
Éboulements	Effondrement de pans de montagne
Relief karstique	Tourbières isolées du fonctionnement du karst (évacuation des eaux latérales par des dolines) / tourbières acides en environnement calcaire Tourbière développées dans un système de dolines (fond garni par une couche imperméable : argiles de décalcification)
Volcans	Dépression centrale de cratère et des maars Barrages créés par les coulées de lave
Mouvement des mers	Pannes dunaires : accumulation de sédiments liée au vent marin et à l'exhaussement des dunes (blocage ou ralentissement du mouvement des eaux) Eustatisme marin (changement du sens de circulation de l'eau, remontée d'eau salée)
Sources et suintement de pente	Diffuse (grès, micaschistes, roches volcaniques) Localisée (calcaire, marnes) / plus fort débit (marais tufeux)
Autres cas	Tourbière de cols ou d'ensellement / conditions microclimatique plus froide et plus humide / reçoit les eaux de versant au départ puis devient isolée quand elle est bombée Tourbière sommitale / exceptionnel / alimentée seulement par eau de pluie Tourbière d'alvéole d'érosion différentielle / tourbière de cuvette d'arénisation Tourbière liées aux digues, affaissement (mines)...

Tableau 13 : Situations géomorphologiques favorables aux tourbières (D'après Manneville et al., 1999)

Il existe un système de classification des tourbières fondé sur plusieurs critères :

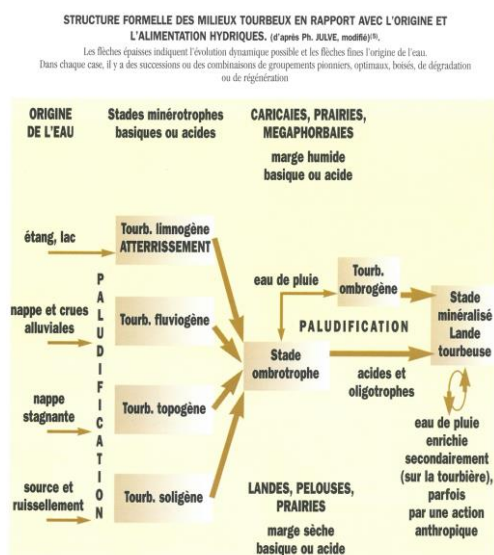
- type d'alimentation hydrique : ombrotrophique ou minerotrophique (géomorphologie, climat)
- importance des précipitations : fréquence, intensité, acidité, charge en ions ;
- gradient climatique : pluviométrie, température, contrastes saisonniers (altitude, latitude), saisonnalité (influence la surface, la forme et le fonctionnement des tourbières) ;
- chimisme de l'eau et de la tourbe : lié à l'alimentation hydrique (ne pas confondre avec le niveau trophique, l'acidité de l'eau, la richesse en calcaire actif et le calcium échangeable dissous) ;
- gradient hydrique : dynamique liée au stade évolutif de la tourbière.

La classification formelle des tourbières (Tableau 14) est fondée sur l'origine de l'eau (Figure 17) et le fonctionnement hydrologique (Figure 19), notamment les transferts d'eau (Figure 18) (Manneville et al., 1999). Les conditions de formations de plusieurs types de tourbières sont présentées dans les figures suivantes (Figure 20, Figure 21, Figure 22, Figure 23, Figure 24, Figure 25, Figure 26).

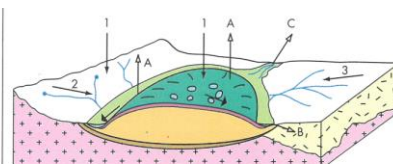
Classification	Origine de l'eau et fonctionnement hydrologique
Ombrogène	pluie, neige
Soligène	sources, pentes
Topogène	nappe affleurante, dépression topographique
Fluviogène	crues périodiques
Limnogène	atterrissement
Thalassogène	pannes dunaires
Condensarogène	condensation atmosphérique dans des éboulis de blocs grossiers où circulent de l'air froid et humide venant des sommets

Tableau 14 : Classification des tourbière (D'après Manneville et al., 1999)

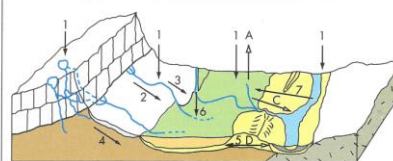
PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides



APPORTS, TRANSFERTS ET PERTES EN EAU DANS UNE TOURBIÈRE BOMBÉE.



APPORTS, TRANSFERTS ET PERTES EN EAU DANS UN BAS-MARAIS OU UN MARAIS PLAT DE VALLÉE.



→ **arrivées d'eau dans la tourbière**
 1 - apport par les pluies et la neige
 2 - par les sources
 3 - par le ruissellement de surface
 4 - par la circulation dans le sol
 5 - par transfert latéral phréatique
 6 - par les cours d'eau
 7 - par les crues

→ **pertes en eau**
 A - par évapotranspiration
 B - par infiltration dans un terrain perméable ou poreux
 C - par un émissaire
 D - par transfert latéral phréatique
 → **circulation à l'intérieur de la tourbière, transfert latéral dans l'acrotelm**

eau	alluvions diverses
bas-marais	éboulis
haut-marais	sables
tourbe bas-marais et acrotelm haut-marais	grès
acrotelm haut-marais	calcaire filtrant
marnes, argiles	granite, gneiss

Figure 17 : Alimentation hydrique des tourbières (in Manneville et al., 1999) – à gauche
 Figure 18 : Apports transferts d'eau dans les tourbières bombées et les bas-marais (Manneville et al., 1999) – à droite

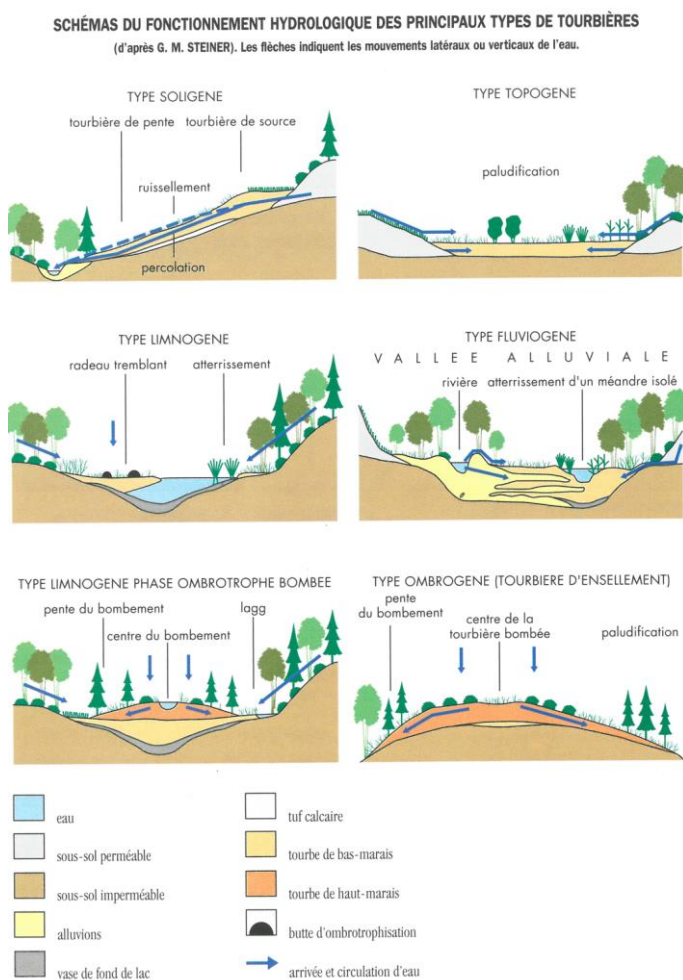


Figure 19 : Fonctionnement hydrologique des tourbières (in Manneville et al., 1999)

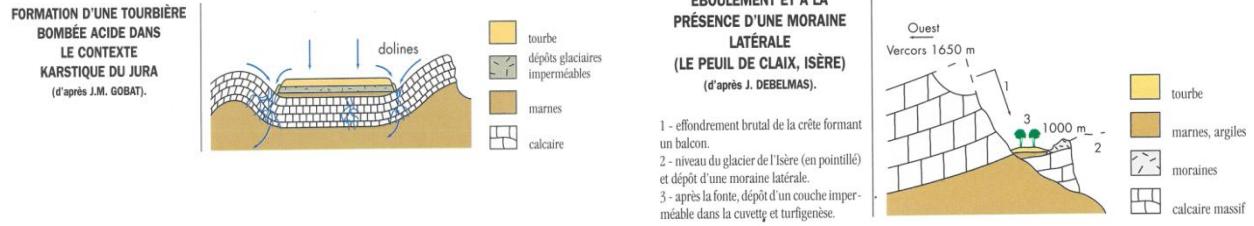


Figure 20 : Formation d'une tourbière bombée sur une doline (in Manneville et al., 1999) – à gauche
Figure 21 : Formation d'une tourbière suite à un éboulement (in Manneville et al., 1999) – à droite

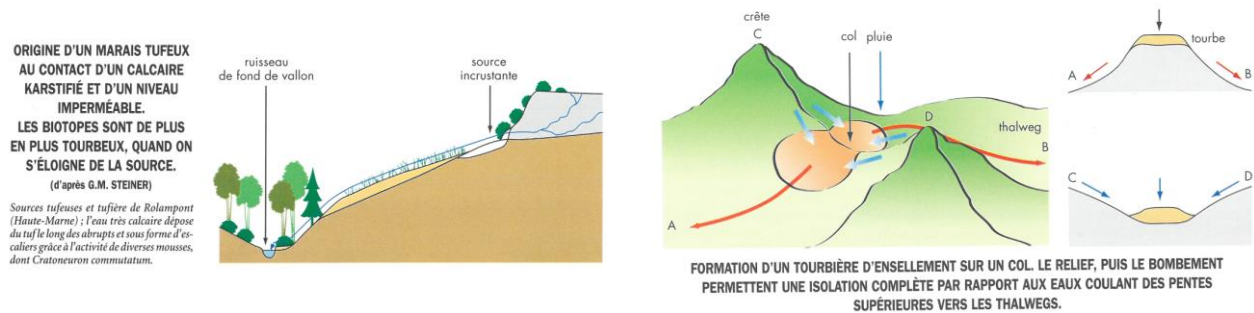


Figure 22 : Formation d'un marais tufeux en contexte karstique (in Manneville et al., 1999) – à gauche
Figure 23 : Formation de tourbière d'ensellement (in Manneville et al., 1999) – à droite

FORMATION PÉRIGLACIAIRE D'UNE PALSE MINÉRALE ET ÉVOLUTION VERS UNE TOURBIÈRE DEPUIS ENVIRON 10 000 ANS (d'après plaquette ASBL-Haute-Ardenne).

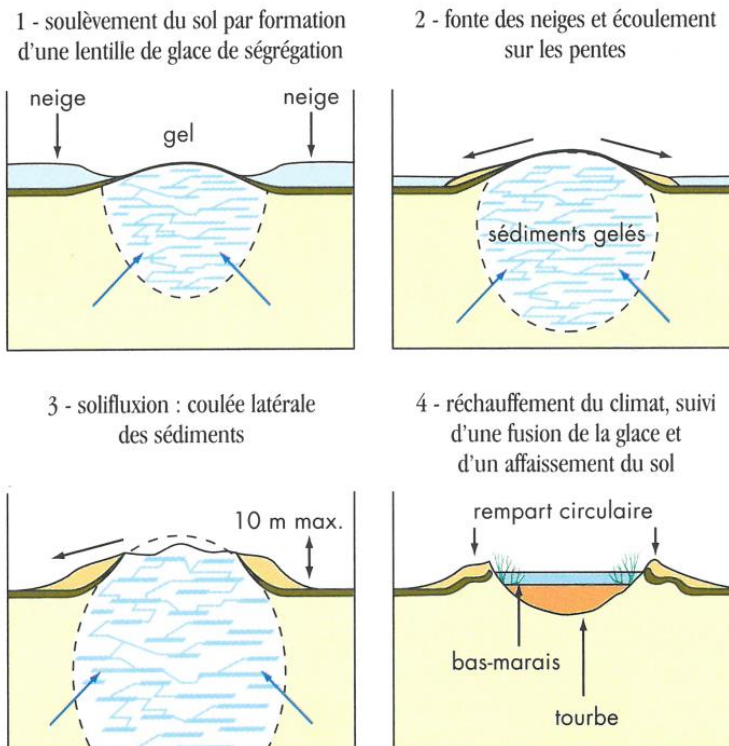
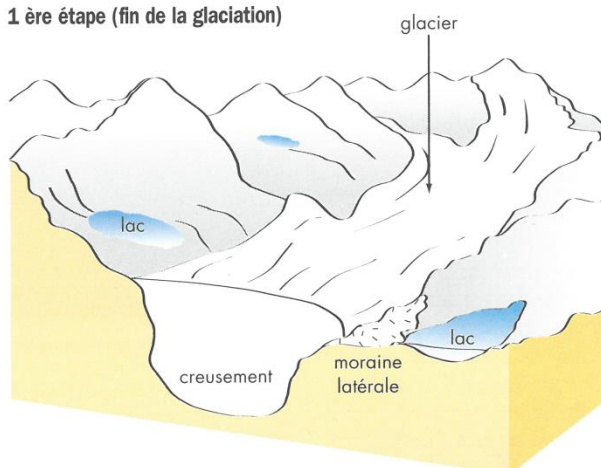


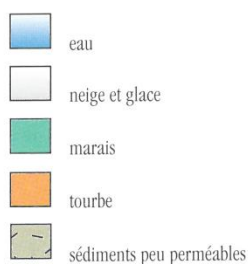
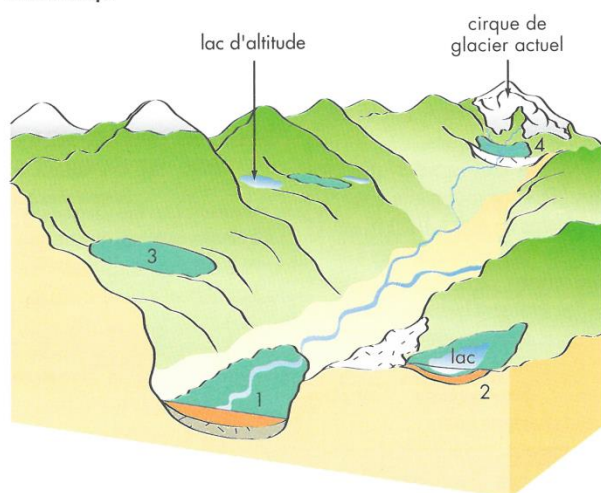
Figure 24 : Formation de tourbière en contexte périglaciaire (in Manneville et al., 1999)

**LACS-TOURBIÈRES ET MARAIS LIÉS À LA GÉOMORPHOLOGIE
GLACIAIRE (d'après G. LACROIX).**

1 ère étape (fin de la glaciation)



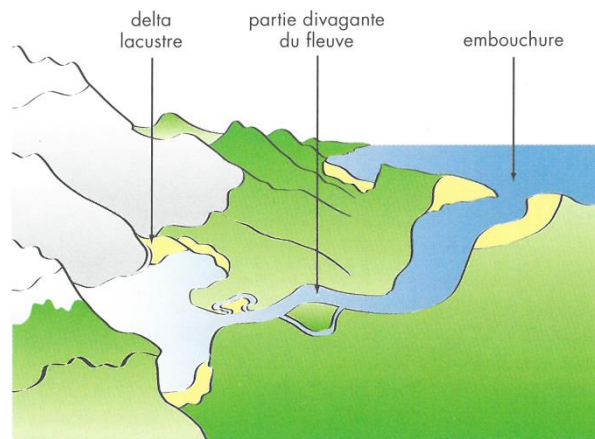
2 ème étape



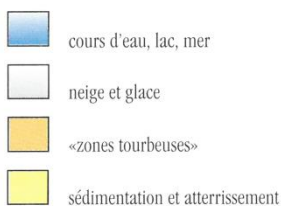
1 - creusement, puis remblaiement des grandes vallées en U
2 - rétention des eaux par les moraines latérales
3 - cuvette de surcreusement sur les épaulements
4 - blocage par la moraine frontale et alimentation par les torrents divagant sous le glacier

**FORMATION DE DIVERS TYPES DE MARAIS TOURBEUX DE PLAINE
LE LONG D'UN RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE.**

1 ère étape



2 ème étape (quelques millénaires ou siècles après)



1 - marais de bord de lac
2 - lac comblé devenu un marais inondable
3 - marais d'ancien méandre isolé
4 - marais de delta ou d'estuaire
5 - bassin littoral subsident comblé et devenu un marais

Figure 25 : Formations de tourbières en contexte postglaciaire (in Manneville et al., 1999) – à gauche
Figure 26 : Formations de tourbières en contexte de plaine (Manneville et al., 1999) – à droite

Dans les régions septentrionales et boréales, on trouve les tourbières de couverture. Il s'agit de tourbières très vastes, plusieurs dizaines ou centaines de km², considérées comme les seules vraies tourbières ombrogènes. Dans ces régions on observe aussi les tourbières réticulées soligènes (Taïga) et les tourbières à palses organiques topogènes (Toundra).

Sur le bassin Rhône Méditerranée les types de tourbière dominants sont les suivants (Figure 27) :

- zone méditerranéenne : pas de tourbière ou rare tourbières minérotrophes (grand delta) ;
- zone continentale : tourbières hautes plates ombrotrophes et minérotrophes (superficie moyenne à réduite) ;
- zone atlantique : tourbières minérotrophes et ombrotrophes (superficie moyenne à réduite)

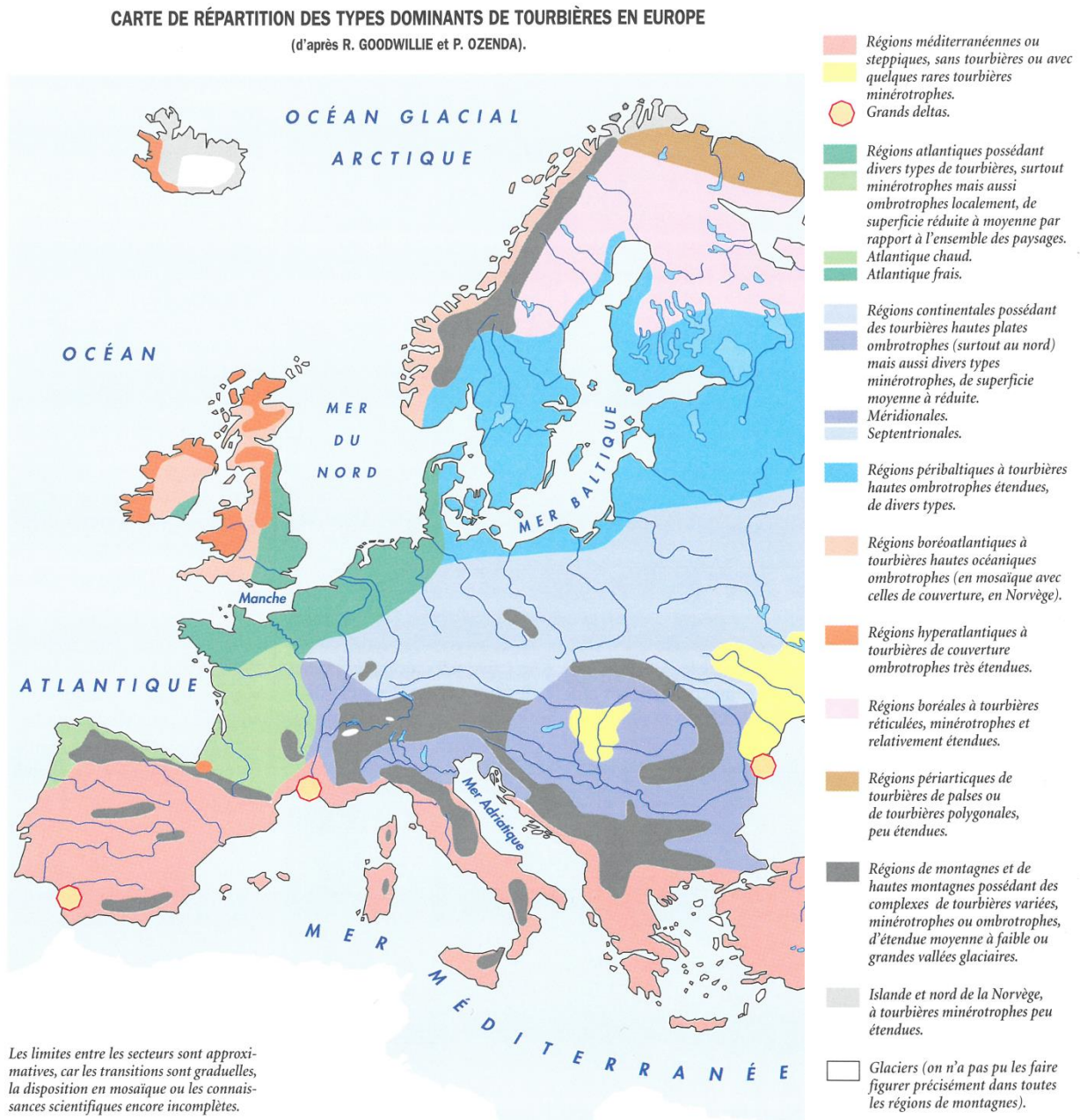
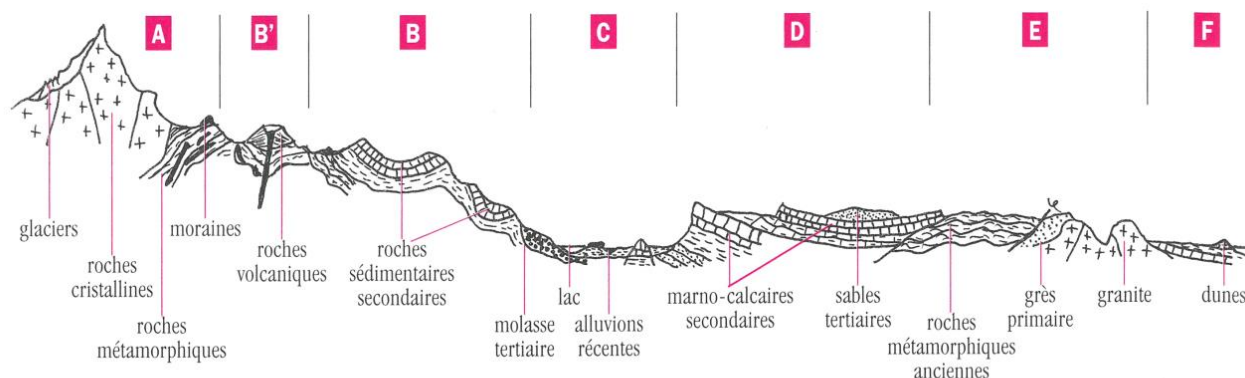


Figure 27 : Répartition des tourbières en Europe (in Manneville et al., 1999)

Au final, Manneville et al. (1999) ont établi une synthèse générale permettant de relier la présence de types de tourbières en fonction de critères paysagers, géomorphologiques et biogéographiques (Figure 28).

SYNTHÈSE GÉNÉRALE ENTRE LES PAYSAGES, LA GÉOMORPHOLOGIE, LA BIOGÉOGRAPHIE ET LES TYPES DE VÉGÉTATION DES TOURBIÈRES



France : zones A, B et B', C, D, E, F - Suisse : zones A, B, C - Belgique et Luxembourg : zones D, E, F

présence fréquente (XX) ou peu fréquente (X)

PAYSAGES DE TOURBIÈRES	ZONES						les numéros renvoient aux pages du livre			
	A	B	C	D	E	F	photos chap. I	schémas chap. II	transects chap. III	annexes 2
pannes, marais arrière-littoraux						XX	30	63	120	
estuaires et deltas						XX	15			
grands marais de vallée		X	XX	XX	X	XX	15	61	122	294
bords de grands lacs			XX			X				
tourbières de pente	XX	XX	XX	XX	XX		26	53	125	294
landes tourbeuses				XX	XX	XX	12		126	295
tourbières de couverture						X		71		
mares tourbeuses forestières			X	XX	X	X	33			
étangs tourbeux			X	XX	XX	XX			126	
viviers = anciens paises					XX		29	48		
lacs-tourbières	XX	XX	X			X	19	61	128	296
tourbières bombées		XX	XX			XX	22	61		
marais de haute montagne, pozzines	XX						31	62	134	297
forêts tourbeuses ou tourbières boisées (principaux types en fonction des zones)	néant ou saussaie naine	peissière pinède	aulnaie saussaie	aulnaie saussaie	boulaie aulnaie	boulaie aulnaie saussaie	25, 33	61		

(voir aussi les schémas de la page 68 pour l'ensemble des types)

A = étages alpin et subalpin supérieur des régions de haute montagne, soumis à un climat rigoureux ; glaciers encore présents

B = étage montagnard au sens large des grands massifs montagneux soumis aux glaciations quaternaires (volcanisme récent localement en B')

C = régions basses des grandes vallées fluviales intérieures et des grands lacs postglaciaires de piémont

D = bassins secondaires peu orogéniques, avec cuestas, vallées et buttes ou glacis de terrains sableux tertiaires

E = vieux massifs aplanis, en climat souvent atlantique, parfois soumis antérieurement à des phénomènes périglaciaires

F = régions littorales, plaines maritimes, côtes basses, zone de subsidence

Figure 28 : Critères de répartition spatiale des tourbières (Manneville et al., 1999)

2.2.3. Focus sur les relations eaux souterraines - zones humides

L'Agence Française pour la Biodiversité - AFB (2017) met en avant les besoins en termes de surveillance et d'évaluation de l'état des eaux et des milieux aquatiques qui sont des problématiques phares dans le contexte de la DCE ; surveillance en termes de « *production de données, d'échantillonnage et de mesures* » notamment à long terme ou dans le cadre de programme de restauration ; évaluation pour « *connaître et comprendre l'état des eaux* ». Ce type d'évaluation doit être fondé sur des indicateurs pluridisciplinaires (ex : biologie, physico-chimie, hydromorphologie...) fiables, validés et s'appuyant sur des référentiels, nécessitant le plus souvent des développements méthodologiques pour leur optimisation et la création d'outils dédiés. Les principaux besoins sont relatifs à la physicochimie et aux contaminants des eaux, l'hydrobiologie, l'hydromorphologie et à l'hydrogéologie en termes de « *surveillance et d'évaluation quantitatif des eaux souterraines* », notamment en vue « *d'améliorer la connaissance de l'impact des prélèvements ESO sur les écosystèmes terrestres dépendant des ESO* ».

Dans le cadre de la DCE la question de l'incidence des eaux souterraines sur les écosystèmes terrestres qui en dépendent est prégnante. L'analyse des documents de cadrages européens et de rapports sur la question (Auterives et al., 2012 ; EU, 2003 ; EU, 2009 ; EU, 2011a ; EU, 2011b ; EU, 2014 ; Puissauve et Hérard, 2015 ; MNHN-SPN, 2015) par l'AFB (2017) fait ressortir des besoins méthodologiques pour :

- *l'évaluation de l'état chimique et quantitatif : « des dommages importants aux écosystèmes terrestres qui dépendent directement de la masse d'eau souterraine » ;*
- *la caractérisation initiale des masses d'eau souterraine : « l'existence d'écosystèmes terrestres directement dépendants » ;*
- *la caractérisation détaillée : « un inventaire détaillé, des directions et taux d'échange entre la masse d'eau souterraine et les écosystèmes terrestres ».*

Actuellement, selon l'AFB (2017), pour les travaux engagés en France il est important de noter que :

- l'identification des écosystèmes terrestres dépendant des eaux souterraines s'appuie sur les délimitations Natura 2000 et les typologies associées (ex : végétation, habitats...) et quelques paramètres hydrogéologiques (ex : épaisseur de la zone saturée). Cette identification a été faite à dire d'experts sans réelle définition commune ;
- la détermination du risque ou du niveau de dégradation ne s'appuie sur aucune méthode standard, même si des tests sont effectués à l'aide des indicateurs Rhomeo ;
- il n'y a pas de système de surveillance spécifique.

En conséquence, selon l'AFB (2017) il apparaît important de :

- développer des indicateurs de dépendance d'un écosystème terrestre aux eaux souterraines fondés sur l'écologie et l'hydrogéologie, voire la pédologie et la physico-chimie ;
- déterminer et caractériser le risque de dégradation.

Des travaux pour l'étude des milieux terrestres sous dépendance eaux souterraines sont d'ores et déjà engagés. Kimberley et Coxon (2011) ont étudié les systèmes irlandais et ont dressé une typologie de dépendance (Figure 29 - le type côtier machair (terrains plats) et dunes humides de dépression n'a pas été inclus dans cette figure) à partir de la typologie WetMec fondée sur des données écohydrologiques (Tableau 15).

WETMEC	Description
WETMEC 3	Buoyant weakly minerotrophic surfaces (transition bogs)
WETMEC 7 – Groundwater floodplain	Floodplains of groundwater-fed watercourses with flat topography. Often complex alluvial sequence with only shallow peat. Water supply and relationship to river and aquifer mostly uncertain. Springs and seepages mostly absent. Surface flooding not known, possibly infrequent.
WETMEC 8 – Groundwater-fed bottoms with aquitard	Trough or basin, usually on quite deep peat upon aquitard; if on floodplain, usually isolated from river. Water table often below solid surface. Often marginal springs/seepages. Distinguished from WETMEC 16 by topography and deeper peat. Water supply to much of surface may be dominated by precipitation in places. Water level may be episodically at, above or near surface, but water table in wetland may fall well below groundwater table at margins. Typically no surface flooding.
WETMEC 9 – Groundwater-fed bottoms	Similar to WETMEC 8 but no aquitard and marginal springs/seepages often less evident. Water level may be episodically at, above or near surface, but is often low and more or less in equilibrium with wetland water table. Typically no surface flooding.
WETMECs 10–17 – WETMEC Macro-Group: Groundwater-fed surfaces	This macro-grouping of WETMECs includes systems where there is permanent or episodic groundwater outflow at, or very close to the surface. Groundwater outflow of WETMECs 7–9 rarely reaches the surface of the wetland.
WETMEC 10 – Permanent seepage slopes	Summer wet surface, usually sloping and shallow peat; springs/seepages usually visible, over permeable substratum. Water table at or immediately below outflow. Localised strong seepage is characterised by small strong springs, often corresponding to variations in basal material (locally high potassium). Diffuse seepage takes the form of elongated seepages, often forming a valley-side zone.
WETMEC 11 – Intermittent & part-drained seepage	Similar to WETMEC 10 but water table well below surface in summer or year round; also more often on flat surfaces or in sumps. Low water levels may be due to low aquifer water tables and/or to a low permeability top layer deposit.
WETMEC 12 – Fluctuating seepage basin	Small shallow sumps with strongly fluctuating water table. Effectively represents a WETMEC 11 mechanism within a shallow depression, where topography permits the accumulation of water, which can sometimes persist year round.
WETMEC 13: Seepage percolation basin	Groundwater-fed basins, typically with buoyant surface and a transmissive surface layer, often with a quite strong outflow from the basin. Low permeability deposits may constrain groundwater upflow and confine outflow to basin margins. Typically occurs in basins, floodplain margins and sometimes in small depressions in valley heads. Springs and seepages often visible around periphery, or aquifer head at or above wetland surface. Wet for much of the year.
WETMEC 14: Seepage percolation troughs	Peat-filled troughs, generally flat to gently sloping, fed by groundwater outflow directly from underlying deposits or flanking slopes. Soft or quaking (rarely buoyant) surfaces in groundwater-fed valley heads and troughs. More flopping than WETMEC 13.
WETMEC 15: Seepage flow tracks	Water flow tracks, mostly narrow and unstable, sourced primarily by groundwater outflow but sometimes with a surface run-off component. Groundwater-fed flow paths in mires, often embedded in WETMEC 14 but occasionally alone. Unconsolidated watery surface.
WETMEC 16: Groundwater-flushed bottoms	Broadly analogous to WETMEC 14, differing primarily in being underlain by a continuous, extensive aquitard, so that groundwater outflows occur mainly at margin and flow laterally, and having thinner peat. Marginal springs/seepages often evident.
WETMEC 17: Groundwater-flushed slopes	Groundwater-flushed slopes with thin peat over aquitard, below springs or narrow seepage line. Analogous to WETMECs 10 and 11, differing primarily in being underlain by a continuous aquitard, so that groundwater outflows occur primarily along the top edge as a seepage and flow downslope.
WETMEC 21: Inflow from karst conduits	

Tableau 15 : Indicateurs WETMEC (Wheeler et al., 2009 in Kimberley et Coxon, 2011)

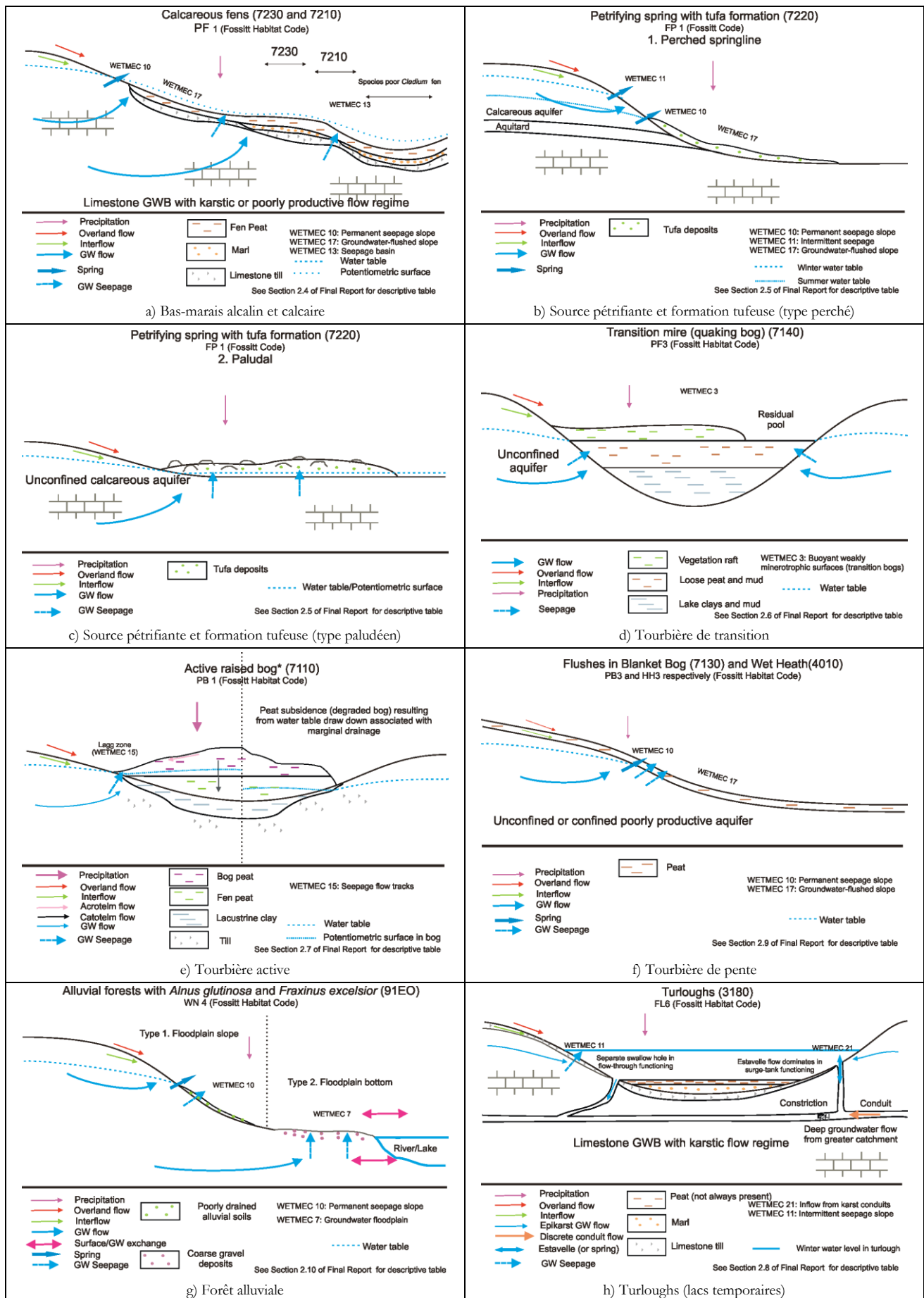


Figure 29 : Typologie des milieux terrestres sous dépendance des eaux souterraines en Irlande, coupes transversales (in Kimberley et Coxon, 2011)

3. Outils, critères et indicateurs pour localiser, identifier, caractériser et étudier les zones humides

Il existe de nombreux travaux, notamment en France mais aussi dans d'autres pays, présentant des méthodes et outils pour localiser, identifier, caractériser et étudier les zones humides (Tableau 16 et Tableau 17). En complément du Tableau 16 et du Tableau 17 quelques précisions sur les outils sont listées ci-après, notamment sur les outils et méthodes en lien avec l'hydrologie et le soutien d'étiage.

Auteurs	Objectifs pour les zones humides	Critères / Indicateurs
Cizel (2010)	Délimitation	Présence d'eau dans l'espace, présence d'eau dans le temps, salinité, écoulement, critères réglementaires, sol et végétation
Forum des Marais Atlantiques (2014)	Inventaire (recenser), cartographie (localiser), délimitation (définir le périmètre), caractérisation (identifier et évaluer des caractéristiques : fonction, valeur, menace)	Prélocalisation : zones humides existantes à différentes échelles, analyse cartographique, photo-interprétation de la végétation, modélisation du toit de nappe, MNT, télédétection Anciennes ZH : cartographie, photo-interprétation, données historiques de niveaux de nappe, MNT ZH effectives : critères botanique, pédologique, hydrologique Délimitation : sol, flore Caractérisation simplifiée : typologie, superficie, végétation, atteintes, activités, pression, protection (fonction, valeurs, menaces) Diagnostic préalable : hydrologie, biogéochimie, fonctionnement écologique, valeur socio-économique, menaces Indicateurs de suivi : paysagers, morphologiques, hydrologiques, physico-chimiques, hydrobiologiques, floristiques et faunistiques, Indicateurs morphologiques : topographie, bathymétrie (profondeur d'eau), sédimentation Indicateurs hydrologiques : niveaux d'eau, débits dans les canaux et les cours d'eau, hydromorphie, indice d'Ellenberg
Collectif RhoMéO (2014)	Suivi de l'état, des fonctions et des pressions	I01 : niveau d'humidité du sol – pédologie ; I02 : indice floristique d'engorgement ; I03 : dynamique hydrologique de la nappe – piézomètres ; I04 : dynamique hydrologique de la nappe – substances humiques ; I05 : dynamique sédimentaire – orthoptères ; I06 : indice floristique de fertilité du sol ; I07 : vulnérabilité à l'eutrophisation – phosphore ; I08 : indice de qualité floristique ; I09 : humidité du milieu – orthoptères ; I10 : intégrité du peuplement d'odonates ; I11 : intégrité du peuplement d'amphibiens ; I12 : pression de l'artificialisation ; I13 : pression de pratiques agricoles
Medde, Gis Sol (2013)	Identification et délimitation	Traits d'hydromorphie, type de sols (Pédologie, topographie, géologie)
Chambaud et al., 2002	Reconnaissance, délimitation, caractérisation et gestion	Localisation à petite échelle : zones humides existantes (inventaire, sites naturels, zones réglementaires, cartographie, toponymie, photographies aériennes, paysage), type de végétation (fonction de l'étagement), géologie, relief, climat Localisation à grande échelle : facteurs abiotiques (lithologie, géomorphologie, facteurs climatiques) Caractérisation : type de sol (hydromorphie), type de végétation (hygrophile)
Gayet et al. (2016)	Évaluation des fonctions (notamment hydrologique)	Fonctions hydrologique : ralentissement des ruissellements, recharge de nappes, rétention de sédiments Sous-fonction soutien d'étiage : non évaluée Recharge de nappe : rigoles, fossés, fossés profonds, drains souterrains, conductivité hydraulique, incision du lit mineur Ralentissement du ruissellement : rugosité du couvert végétal, rigoles, fossés, fossés profonds, sinuosité cours d'eau, distance au lit mineur, incision Indicateurs : couvert végétal, systèmes de drainage, érosion, sol, habitats
Mazogol et al. (2008)	Délimitation des têtes de bassins versants Cartographie prédictive des ZH	BD carthage, Bd alti (MNT) Géologie, topographie (crêtes, talwegs, zone planes), géomorphologie (surfaces d'érosion), densité de drainage
Cubizolle et al. (2013)	Cartographie prédictive des tourbières	Héritages géomorphologiques : surfaces d'érosion, facteur pétrographique, modelés et formations superficielles quaternaires, topographie locale
Medde, Gis Sol (2013)	Identification et délimitation	Traits d'hydromorphie, type de sols (pédologie, topographie, géologie)
PNRZH (2005)	Évaluation des fonctions, caractérisation	Fonction de stockage longitudinal (stockage eau de versant) : typologie des fossés, topographie des ZH Fonction de stockage transversale (stockage eau de rivière) : taille BV et ZH, continuité, flux Fonction de transfert : flux, vitesse, ZH potentielle : topographie, sols ZH effective : usage sol, indice humidité, végétation ZH efficace : flux polluant, géométrie interne

Tableau 16 : Outils, critères et indicateurs liés aux zones humides (1/2)

Auteurs	Objectifs pour les zones humides	Critères / Indicateurs / Données
Agence de l'eau Loire-Bretagne (2005)	Probabilité de présence des zones humides	Analyse des pentes et Indice Beven-Kirby : « L'indice IBK correspond au Log népérien du rapport entre la surface amont drainée et la pente ($L_n = \text{surface drainée au point considéré} / \text{pente en ce point}$). Un indice élevé correspond, non seulement à une forte probabilité de présence d'un sol hydromorphe, mais également de zone humide. Les caractéristiques géologiques agissent en renforçant ou en atténuant cette probabilité. Les résultats obtenus par l'IBK doivent donc être modulés avec la géologie. Le croisement de l'indice IBK et de la nature géologique du substrat permet ainsi de dresser des séries de cartes de probabilité de présence de zones humides ».
Ecosphère (2006)	Évaluation des fonctions	Fonction durable de stockage des eaux de surface (Type Sdage : 3, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13) Indicateurs : pluviométrie, topo ZH, Taille ZH, continuité ZH avec BV, flux Recharge de nappe (Type Sdage : 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13) Indicateurs : ? Soutien d'étiage (Type Sdage : 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13) Indicateurs : ?
Kimberley et Coxon (2011)	GWDTE	Localisation dans le paysage, substrat dominant, régime des eaux souterraines, apports d'eau dominants, mécanisme d'apports d'eau souterraine, hydrogéochimie souterraine, variation des niveaux d'eau, réponses écologiques aux changements de niveaux d'eau ou de chimie.
Auterives et al. (2012)	GWDTE	Espèces, habitats, typologie ZH, typologie eaux souterraines, géologie, IDPR, hydrogéologie (profondeur de nappe, présence de sources, affleurement de nappe)
Smith et al. (2013)	Évaluation des fonctions	Indicateurs hydrologiques : average volume of water stored (m ³ /ha/yr), Percent reduction in flow peaks (%), Lag time of input and output flow peaks (d), Percent reduction in water velocity (%), Volume of water absorbed (m ³ /ha/yr), Volume of available pore space (m ³ /ha), Difference in low flows above/below wetland (%), Wetland contribution to low flows (m ³ /ha/d) Indicateurs biogéochimiques : Net primary productivity (kg/ha/yr), Annual turnover of detritus (kg/ha/yr), Denitrification rate (kg/ha/yr), Soil denitrification enzyme activity (DEA, gN/g/d), Amount of sediment trapped (tons/ha/yr), Sediment accretion rate (cm/yr), Rate of biomass export (kg/ha/yr) Indicateurs habitats : Diversity of native plant species (index, H'), Number of rare or endemic species (count), Species richness of vertebrates (count), Number of species of forest interior birds (count), Density of breeding amphibians (number/ha), Invertebrate biomass (kg/ha), Arthropod species richness (count), Number of species unique or rare in the region (count), Number of food web links (count)
À suivre...		

Tableau 17 : Outils, critères et indicateurs liés aux zones humides (2/2)

- **Collectif RhoMéO (2014)**

Pour chaque indicateur, le document présente une description, un protocole, et une aide à l'analyse et à l'interprétation. On note que le domaine d'applicabilité des indicateurs de cet outil est limité au bassin RMC et utilise la typologie Sdage et les sous-types Rhomeo (milieux de référence).

- **Chambaud et al., 2012**

Cet outil de caractérisation et de délimitation des zones humides permet de travailler à différentes échelles : échelle globale RMC, grands ensembles de zones humides, petite échelle. Il est fondé sur les écorégions (sondage pédologique et relevé de végétation pour valider la cartographie) et propose plusieurs clefs : clefs de reconnaissance des écorégions par étage de végétation et géologie, clef de localisation des zones humides par étage de végétation et géologie, clef d'identification et de diagnostic des sols hydromorphes, clef d'identification et de diagnostic des zones humides par la végétation.

- **Gayet et al. (2016)**

Cet outil vise à l'évaluation des fonctions des zones humides. Concernant les fonctions hydrologiques, il permet de travailler sur le ralentissement des ruissellements (évaluer le ralentissement des écoulements d'eau en surface, flux liquides superficiels), la recharge des nappes (évaluer l'infiltration des eaux de surface en profondeur dans le sol, flux liquides souterrains), la rétention des sédiments (évaluer le captage des sédiments qui transitent avec le ruissellement et la rétention des particules solides présentes dans la zone humide, flux solides érosifs ou particuliers).

On note que la sous-fonction soutien d'étiage n'est pas évaluée faute d'indicateurs fiables.

L'évaluation tient compte non seulement de la zones humides mais aussi de son environnement. Au total, 4 zones sont prises en compte :

- zone contributive : « l'étendue spatiale d'où provient potentiellement l'essentiel des écoulements superficiels et souterrains alimentant le site » ;

PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides

- zone tampon : « l'espace immédiatement au contact du site a un effet tampon sur les écoulements en provenance de la zone contributive » ;
- paysage : « flux d'individus ont lieu entre le site et l'extérieur, avec une influence potentiellement importante sur la fonction d'accomplissement du cycle biologique des espèces » ;
- cours d'eau : « Le fonctionnement hydrologique des sites alluviaux est généralement affecté par la dynamique hydro-sédimentaire du cours d'eau. Les conditions morphologiques du système fluvial (par ex. sinuosité du cours d'eau, incision du lit mineur) doivent donc être prises en compte pour évaluer les sous-fonctions hydrologiques ».

• Forum des Marais Atlantiques (2014)

Cette boîte à outils très complète qui est dédiée à la cartographie, la caractérisation, la protection, la gestion et le suivi des zones humides compte à l'heure actuelle 47 fiches :

- prérequis : définition des ZH, enjeux, réglementation, protection et gestion ;
- communication et échange : acteurs clefs, information, sensibilisation, consultation, concertation ;
- connaissance : enjeux de gestion, prélocalisation, zones anciennement humides, secteurs prioritaires, cartographie des zones humides effectives, délimitation, caractérisation simplifiée, inventaire ;
- action : sélection des ZH prioritaires, diagnostic préalable, objectifs d'actions, programme d'action, suivi des actions ;
- objectifs et actions : soutien et restauration du caractère humide, maintien de l'oligotrophie et diminution de la pollution, ouverture de milieu et maintien, gestion des activités humaines et valorisation socio-économiques, gestion des espèces exotiques envahissantes, végétalisation et renaturation, conversion d'une culture en prairie humide ;
- dispositifs : SAGE, documents d'urbanisme, trame verte et bleue, charte PNR, dispositifs agro-environnementaux, exonération taxe foncière, déclaration d'intérêt générale, zone d'intérêt environnemental particulier et zones stratégiques pour la gestion de l'eau, espaces naturels réglementaires, valorisation touristique, maîtrise foncière, aides financières, animation, volontariat et bénévolat, principe "Éviter, Réduire, Compenser" (ERC), observatoire (ex : plantes exotiques envahissantes), continuité écologique, agriculture en zones humide, chasse.

Cette boîte à outil définit plusieurs concepts très utiles, concernant les notions de descripteurs et d'indicateurs, notamment le modèle "Pressions-État-Réponses" (PER) :

- descripteur : « paramètre simple potentiellement évolutif, qualifiable et quantifiable qui décrit l'évolution d'une composante sans présager de l'ensemble du fonctionnement du système (baromètre partiel). On pourra citer par exemple, le nombre de canaux envasés » ;
- indicateur de suivi : « il vise à informer sur les performances (au sens neutre) d'un système par rapport à un objectif ou à un état de référence (exemple : proportion de canaux envasés par rapport à un objectif donné) » ;
- indicateurs de pression : « ils reflètent la pression exercée par les activités humaines et/ou les processus naturels qui provoquent des changements sur le milieu (exemple : indicateurs du taux de pollution dans les canaux liés aux nombre d'abreuvoirs sauvages) » ;
- indicateurs d'état : « ils offrent une description de la situation environnementale. Ils précisent la situation écologique, physique, socio-économique d'un milieu à un instant donné ainsi que les changements d'état dans le temps (exemple : taux de pollution dans les canaux) » ;
- indicateurs de réponse : « ils permettent d'évaluer les efforts consentis qui doivent être mis en place par la société pour résoudre un problème environnemental (exemple : nombre de pompes à nez installées) ».

Le Tableau 18 et le Tableau 19 donnent des exemples d'indicateurs morphologiques et hydrologiques. Concernant les indicateurs morphologiques (Tableau 18), faute de données Lidar, il est possible de travailler avec les MNT de l'IGN à l'aide de logiciels SIG (ex : ArcGIS, GRASS) disposant d'outils d'analyse spatiale.

Objectifs	Indicateurs morphologiques	Méthodes	Remarques
Analyser le relief de la zone humide	Topographie	Relevés terrestres de géomètre	Pour petites surfaces (relevés longs)
		Mesures par GPS (coordonnées en X-Y-Z)	Pour petites et moyennes surfaces
		Télédétection laser ou Lidar topographique.	Pour grandes surfaces (rapide) mais coûteux
Apprécier la profondeur d'eau	Bathymétrie (profondeur d'eau)	Relevés à la pige ou à l'aide d'une corde plombée	Pour faibles profondeurs et petites surfaces (relevés longs)
		Mesures par un échosondeur (sondeur acoustique)	Pour grandes profondeurs ; sur une embarcation
		Télédétection laser ou Lidar bathymétrique	Pour grandes surfaces (rapide) mais coûteux
Comprendre les phénomènes de sédimentation et d'érosion	Sédimentation	Relevés à l'aide d'une règle graduée (pige)	Mesure de la profondeur totale de sédiments
		Relevés par marquage (dépôt de kaolin) puis carottage	Mesure de la profondeur de sédiments accumulés

Tableau 18 : Exemple d'indicateurs morphologiques (Forum des Marais Atlantiques, 2014)

Le Tableau 20 donne un exemple de fiche utilisée pour évaluer de manière qualitative le potentiel de soutien d'étiage et de recharge de nappe des zones humides. On note qu'il est fait référence à la typologie Sdage.

Objectifs	Indicateurs hydrologiques	Méthodes	Remarques
Analyser les régimes de submersion	Niveaux d'eau	Relevés sur des règles limnimétriques (ou mires)	Pour le niveau des eaux de surface, nécessité d'établir un "zéro"
		Relevés sur des piézomètres	Pour le niveau d'impregnation des sols en eaux, nécessité d'établir un "zéro"
Comprendre les flux circulants	Débits dans les canaux et les cours d'eau	Relevés au "seau"	Pour les faibles débits
		Mesures à l'aide d'un flotteur (mobile flot- tant)	Méthode empirique valable sur une section rectiligne
		Mesures à l'aide d'un courantomètre à hélice (en travers du canal ou du cours d'eau)	Résultats fiables sauf en cas de fortes charges en matière en suspension
		Mesures à l'aide d'un courantomètre de précision (par ultrasons ou à effet Doppler)	Résultats très fiables mais méthode coûteuse
		Dilution chimique par injection de sel ou d'iode	Pour les lits irréguliers, résultats fiables mais méthode lourde et coûteuse
		Mesures à partir d'un déversoir triangulaire ou rectangulaires	Pour les sections aménagées à faibles débits
Apprécier le phénomène de saturation régulière en eau d'une zone humide	Hydromorphie	Relevés des traces d'hydromorphie à l'aide d'une tarière pédologique	Méthode permettant d'évaluer l'engorgement en eau du sol
Apprécier le caractère d'humidité édaphique	Indice d'Ellenberg	Inventaire de la flore et calcul de l'indice d'Ellenberg	Méthode permettant d'évaluer l'humidité du sol pour les zones humides naturelles végétalisées

Tableau 19 : Exemples d'indicateurs hydrologiques (Forum des Marais Atlantiques, 2014)

PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides

Soutien d'étéage des cours d'eaux et recharge des nappes	
Relation aux masses d'eau	Les sorties d'eau doivent se faire vers le cours d'eau ou la nappe
Typologie SDAGE	☐ Plaines alluviales ☐ Zones humides de bas-fond en tête de bassin ☐ Marais et landes humides de plaine et de plateaux ☐ Etangs et plans d'eau ☐ Autre
Sorties d'eau	☐ Cours d'eau ☐ Nappes ☐ Autre
Entrées d'eau en période d'étéage	☐ Cours d'eau ☐ Nappes et sources
Ecoulement dans la zone humide	L'écoulement doit être suffisamment lent pour retenir l'eau avant de la transférer
Présence de drains ou fossés	☐ Non ☐ Oui
Pente de la zone humide	☐ Supérieur à 5%
Recouvrement végétal	☐ Total ☐ Partiel ☐ Absent
Type de formation végétale	☐ Forêt et fourré ☐ Autre
Capacité de stockage	Plus la superficie est importante, plus la quantité d'eau stockée est importante
Superficie de la zone humide ou superficies cumulées de zones humides	Chiffre (uniquement si les sorties d'eau se font vers le cours d'eau ou la nappe et si l'écoulement est lent)
Superficie/longueur des canaux connectés (pour les marais endigués)	
Diagnostic pour la fonction	☐ Importante ☐ Moyenne ☐ Non efficiente ☐ Altérée ☐ Inconnue

Tableau 20 : Soutien des étiages des cours d'eau et recharge des nappes d'eau (Forum des Marais Atlantiques (2014)
Fiche n°18 diagnostic préalable des ZH prioritaires)

PARTIE II

—

Méthodes pour la caractérisation du rôle hydrologique des zones humides

Tout d'abord, il convient de rappeler que cette étude vise à étudier la capacité des zones humides à constituer un stock hydrique et à le libérer de manière déphasée vers les cours d'eau sur la période où leur soutien par les précipitations est le plus faible (généralement en été).

Pour caractériser la fonction de soutien d'étiage propre aux zones humides il est indispensable de bien connaître les modalités de fonctionnement hydrologique de ces milieux particuliers. Pour étudier le fonctionnement hydrologique il convient :

- en premier lieu de définir le type de zone humide en présence (c'est l'objet de la partie I de ce rapport) afin de mieux identifier les interactions possibles entre la zone humide et les autres entités de l'hydrosystème (ex : eaux souterraines, eaux superficielles...) ;
- en second lieu de réaliser un bilan des flux entrants et sortants de la zone humide en ne négligeant pas la manière dont fluctuent les réserves d'eau au cours d'un cycle hydrologique (modalités de remplissage et de drainage du réservoir).

La première section de cette partie présente les variables et paramètres impliqués dans le bilan hydrologique dans le cas général des zones humides. La seconde section aborde le cas des zones humides tourbeuses en exposant leur complexité et les questions et enjeux particuliers relatifs à ces milieux. La troisième section expose les méthodes d'investigations des différentes composantes du bilan hydrologique (entrées/sorties, variations de stock, géométrie et nature du réservoir...).

1. Bilan hydrologique des zones humides

1.1. Principe

L'approche systémique est couramment employée lorsqu'il s'agit de caractériser le fonctionnement hydrologique d'une entité de l'hydrosystème (ex : lac, aquifère, zone humide, rivière...). Elle se présente sous la forme d'un bilan qui recense l'ensemble des flux entrants et sortants. Ce bilan hydrologique, lorsqu'il s'applique aux zones humides s'exprime de la façon suivante (Porteret, 2008 ; Price, 2001) :

$$(P + SWI + GWI) - (ET + SWO + GWO) = \Delta R$$

Avec :

P : précipitations (solides ou liquides)

SWI : débit entrant de surface

SWO : débit sortant de surface

ΔR : variation de stock d'eau

ET : évapotranspiration

GWI : débit entrant souterrain

GWO : débit sortant souterrain

La Figure 30 schématise le bilan hydrologique présenté précédemment. Ce schéma inventorie l'ensemble des flux et interactions possibles entre une zone humide, l'atmosphère, le milieu souterrain et le milieu superficiel.

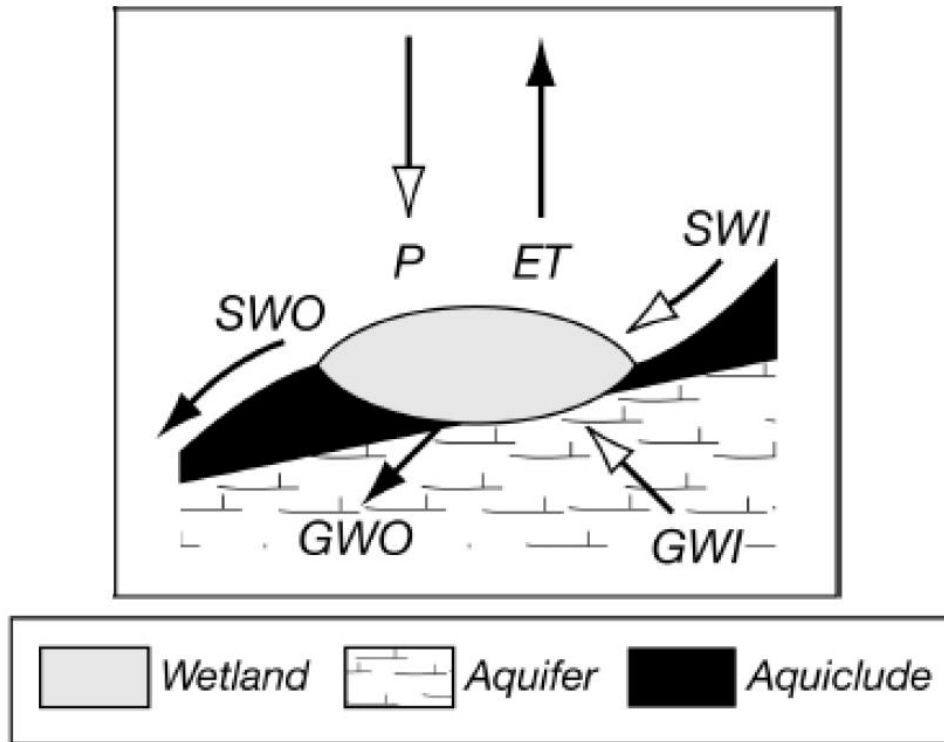


Figure 30 : Schéma du bilan hydrologique appliqué à une zone humide (Gilvear et Bradley, 2009). Cas de figure le plus complexe qui tient compte de l'ensemble des flux et interactions possibles entre la zone humide, l'atmosphère, le milieu souterrain et le milieu superficiel

1.2. Diversité des interactions zones humides, atmosphère, eaux superficielles et eaux souterraines

Dans le cadre de cette étude sur le rôle potentiel de soutien d'étiage des zones humides, les travaux de classification de Gilvear et McInnes (1994) ont été préférentiellement retenus puisqu'ils sont fondés sur des critères hydrologiques pour distinguer les différentes configurations de zones humides. Ils en identifient 12 types distincts suivant l'origine de l'alimentation (ex : eaux météoriques, eaux superficielles issues d'un bassin versant amont et eaux souterraines) et l'importance relative d'une contribution vis-à-vis d'une autre (Figure 31). Ils introduisent les termes :

- d'ombrotrophie pour décrire la prépondérance d'une alimentation par les eaux météoriques (P) ;
- de minérotrophie pour une prépondérance d'une alimentation par les eaux souterraines (GWI) ;
- de rhéotrophie pour une prépondérance d'une alimentation par les eaux superficielles issues d'un bassin versant amont (SWI) ;
- d'omnitrophie lorsque toutes les sources d'alimentation sont présentes (P + GWI + SWI).

Par ailleurs, ces travaux de classification s'intéressent également aux modalités de restitution des eaux transitant dans la zone humide. Les différents exutoires identifiés sont :

- les eaux superficielles à l'aval de la zone humide (SWO) ;
- les eaux souterraines par infiltration à travers la zone humide (GWO) ;
- le retour à l'atmosphère par évapotranspiration (ET).

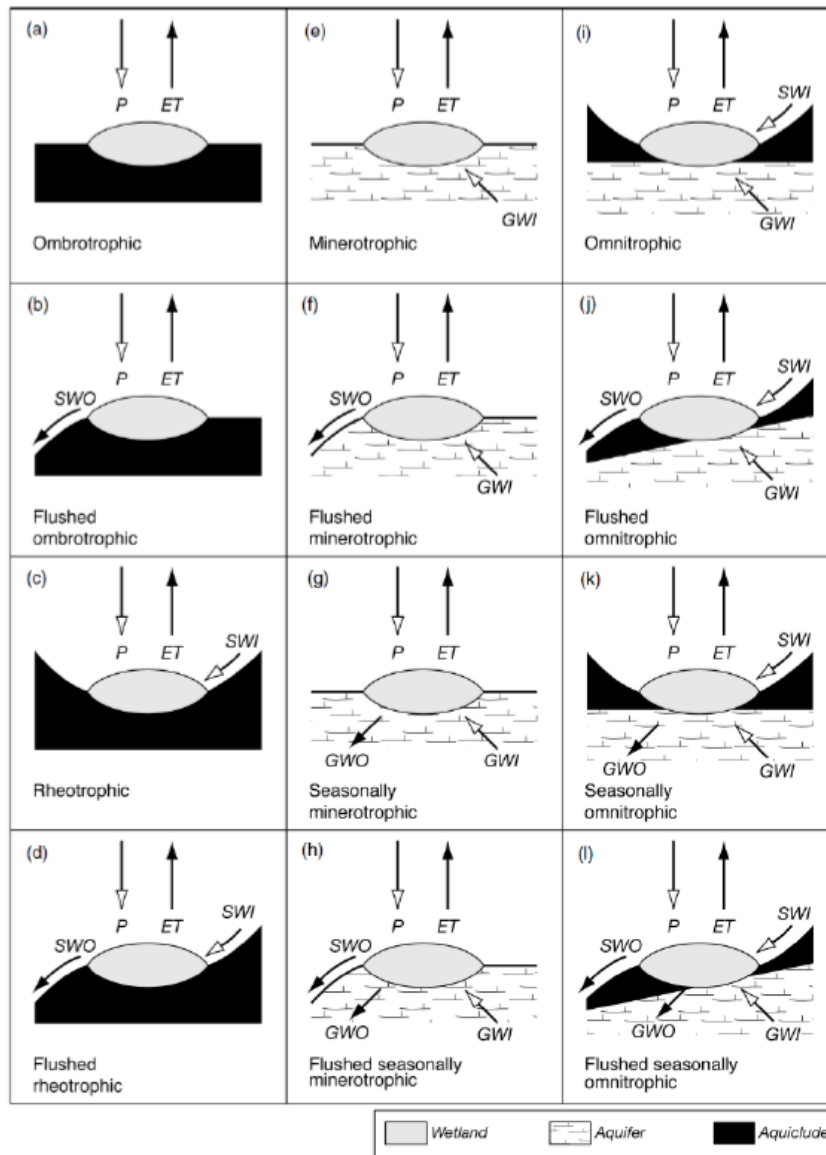


Figure 31 : Schéma de classification de l'ensemble des zones humides suivant leurs modalités d'alimentation et de restitution des eaux (Classification de Gilvear et McInnes (1994) in Gilvear et Bradley (2009))

Les différents flux entrants (SWI, GWI et P) et sortants (SWO, GWO, ET) ayant été identifiés, l'estimation de la variation de réserve (ΔR) est cruciale puisqu'elle intervient directement dans le rôle de stockage et de restitution de l'eau.

1.3. Lien entre capacité de stockage et capacité de restitution des eaux

L'étude du rôle de régulation du régime des cours d'eau par les zones humides (écrêtage de pic de crue et soutien d'étiage) nécessite de bien distinguer les liens entre la capacité de stockage (emmagasinement) et la capacité de restitution (drainage). Ces capacités (stockage et restitution) font intervenir des paramètres intrinsèques à la zone humide, souvent liés à la nature des éléments la constituant, et des variables (dynamiques), souvent liées aux conditions hydrologiques.

Les auteurs, cités précédemment dans ce paragraphe, décrivent précisément l'ensemble des paramètres et variables qui interviennent dans la variation de stock d'eau d'une zone humide (ΔR). Dans le cadre de cette étude, seuls les variables et paramètres d'intérêts vis-à-vis du stockage et de la restitution sont présentés et expliqués.

1.3.1. Stockage

Les **paramètres** d'intérêt sont :

- la *proportion « d'eau libre »* (ou eau gravitaire ou porosité efficace ou encore coefficient d'emmagasinement) *par rapport au volume total*. Cette eau peut circuler facilement sous l'effet de forces gravitaires et peut se renouveler rapidement (à l'échelle d'un cycle hydrologique). Elle peut potentiellement participer au soutien d'étiage.
- la *proportion « d'eau utile »* (réserve disponible pour l'alimentation en eau de la végétation qui ne s'écoule pas par gravité mais qui est retenue par des forces capillaires) *par rapport au volume total*. Cette eau est utilisable directement par la végétation mais ne participe pas au soutien d'étiage et retourne majoritairement à l'atmosphère.
- le *volume total de la zone humide ou des horizons aptes à stocker de l'eau*. Ce dernier paramètre permet de pondérer les deux précédents (« eau libre » et « eau utile »). En effet, plus le volume de la zone humide est important plus son influence sur le stockage sera potentiellement conséquent.

Nb : La porosité totale n'est pas un paramètre pertinent à prendre en compte du fait qu'elle inclut également l'eau liée (eau retenue par des forces d'attraction moléculaire) qui ne participe pas à l'écoulement et n'est donc pas renouvelée (du moins à l'échelle temporelle de cycles hydrologiques). Par exemple, une formation argileuse peut contenir en proportion une grande quantité d'eau (porosité totale importante) mais cette eau est essentiellement sous forme liée.

Les **variables** d'intérêt concernent :

- l'*état des réserves « d'eau libre » et « d'eau utile »*. Le rôle de stockage est une notion relative et dépend de l'état des réserves. Si les réserves (« eau libre » et « eau utile ») sont vides, la zone humide a une capacité de stockage maximale tandis que si les réserves sont saturées, la capacité de stockage est nulle, l'eau non stockée s'évacuant directement par ruissellement.
- la *vitesse de remplissage des stocks*. Cette vitesse est souvent réglée par la capacité maximale d'infiltration des sols et la perméabilité des formations géologiques ou des horizons pédologiques constituant la zone humide. De la même manière, si lors d'un événement pluvieux la quantité d'eau précipitée dépasse la capacité d'infiltration, le surplus s'écoule sous forme de ruissellement.

1.3.2. Restitution

Les **paramètres** d'intérêt sont :

- *la perméabilité du milieu poreux*. Elle définit la capacité du milieu à se laisser traverser par l'eau. Pour assurer un rôle de soutien d'étiage notable, la perméabilité doit se situer dans des gammes intermédiaires. En effet des perméabilités trop fortes ont tendance à favoriser un drainage trop rapide des eaux tandis que des perméabilités trop faibles supposent un soutien d'étiage trop faible pour être significatif.
- *la pente et la morphologie du substratum imperméable*. Elles imposent un gradient de charge hydraulique qui a pour effet de favoriser un drainage gravitaire des parties amont vers les parties aval. C'est la morphologie qui le cas échéant va contraindre la cote de l'exutoire à l'aval.
- *la proportion d'eau libre par rapport au volume totale*. L'eau libre sous l'effet du gradient hydraulique est à même de circuler pour atteindre les exutoires et donc participer au soutien d'étiage.

Les **variables** d'intérêt sont :

- *les gradients hydrauliques de la zone humide*. La répartition de ces gradients dépend de l'état de recharge de la zone humide. L'intensité du gradient intervient également dans la vitesse de drainage de la zone humide.
- *les conditions aux limites au niveau de(s) l'exutoire(s) de la zone humide*. Elles définissent les modalités de drainage de la zone humide après une période de recharge. Elles sont régies notamment par la position altitudinale de l'exutoire vis-à-vis des réserves d'eau (source de déversement, débordement ou de trop plein) mais aussi par la nature de l'exutoire (surface de suintement ou limite à charge imposée).
- *l'état des réserves « d'eau libre »*. L'état des réserves en eau libre renseigne sur le volume d'eau potentiel pour soutenir l'étiage. Ce volume d'eau dépend du remplissage des réserves. L'eau disponible pour l'écoulement n'est mobilisée que si les gradients hydrauliques et les conditions limites à l'exutoire le permettent.

	Stockage	Restitution
Paramètres	Proportion « d'eau libre » Proportion « d'eau utile » Volume de la zone humide	Perméabilité Pente du substratum Proportion « d'eau libre »
Variables	État des réserves (« eau libre » + « eau utile ») Vitesse de remplissage	Gradients hydrauliques dans la zone humide Conditions limites au niveau de l'exutoire État des réserves « d'eau libre »

Tableau 21 : Synthèse des paramètres et variables d'intérêt pour le stockage et la restitution des eaux

Les différences entre stockage et restitution ayant été établies pour le cas général des zones humides, la prochaine section s'intéresse spécifiquement à l'hydrologie des tourbières qui sont très représentées sur les têtes de bassins versants.

2. Hydrologie des zones humides tourbeuses

Cette partie fait principalement références aux travaux de Wastiaux (2008) et Rezanezhad et al. (2016) ainsi qu'à la thèse de Porteret (2008). Elle propose une revue bibliographique traitant aussi bien de la nature et de la structure des sols tourbeux que de l'état de connaissance sur l'hydrologie et sur les propriétés hydrodynamiques de ces milieux.

2.1. Nature

Les sols tourbeux sont très riches en matière organique d'origine végétale. La tourbe peut être classée selon le taux de fibre (fibres végétales, micro et macro-agrégats) qu'elle contient. Trois classes granulométriques principales sont souvent décrites. Il s'agit de la tourbe fibrique ($> 200 \mu\text{m}$), mésique (50 à $200 \mu\text{m}$) et saprique ($< 50 \mu\text{m}$). Gobat et al. (1991) proposent un triangle granulométrique analogue à celui utilisé pour la matière minérale (Figure 32).

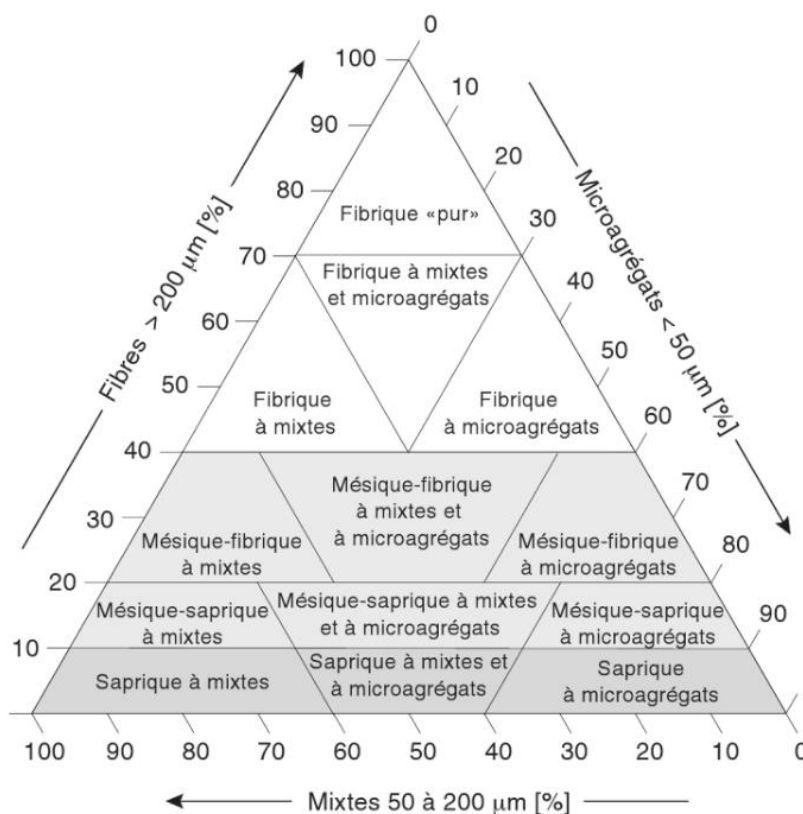


Figure 32 : Triangle des textures organiques (Gobat et al., 1991)

La porosité totale des sols tourbeux excède souvent 80% (Boelter, 1968). Les pores au sein de la tourbe sont assez irréguliers en taille et peuvent être ou non interconnectés (Hayward et Clymo, 1982). La diversité de taille des pores et leur degré d'interconnexion ont une incidence sur la part d'eau libre (facilement mobilisable) et d'eau liée (part immobilisée) que peut contenir un sol tourbeux.

Les caractéristiques de la tourbe sont fortement dépendantes du type de végétation et du degré de décomposition des débris végétaux. Le degré de décomposition et la composition de la tourbe varient selon la profondeur, l'âge, la communauté végétale et le régime de drainage (Boelter, 1969 ; Swanson et Grigal, 1989 ; Schoepfroster et Furbush, 1974).

Le degré de décomposition est généralement évalué en utilisant les 10 classes d'humification de l'échelle de von Post (von Post, 1922) où H1 désigne la tourbe la moins décomposée et H10 la tourbe la plus

décomposée. La classification de von Post est fondée sur la description d'extraits de sol et des résidus de végétaux. Des méthodes de caractérisation supplémentaires ont été développées pour décrire le degré de décomposition. Elles sont notamment fondées sur les fractions de taille, la densité et la teneur en fibres (Boelter, 1969 ; Lynn et al., 1974 ; Lishtvan et Kroll, 1975 ; Malterer et al., 1992). De plus en plus, les approches isotopiques et spectroscopiques sont utilisées pour évaluer la décomposition de la matière organique du sol ainsi que les modifications de la composition moléculaire, des fonctionnalités et de la réactivité de la tourbe qui leurs sont associées (Moers et al., 1990 ; Baldock et al., 1997 ; Macko et al., 1991 ; Menot et Bums, 2001 ; Drexel et al., 2002 ; Grover et Baldock, 2013 ; Cao et al., 2014). Les rapports Carbone/Azote sont également couramment utilisés pour évaluer les états relatifs de décomposition des sols tourbeux (Kuhry et Vitt, 1996 ; Bridgham et al., 1998).

2.2. Propriétés hydrodynamiques des zones humides tourbeuses

La boîte à outils RhoMéO (Collectif RhoMéO, 2014), par exemple, propose des indicateurs de suivi de la « dynamique hydrologique de la nappe » : « piézomètre » (I03) et « substance humiques » (I04). Il s'agit d'indicateurs de suivi du fonctionnement hydrologique et des variations piézométriques des zones humides.

Il existe de nombreuses études qui fournissent des valeurs de perméabilités et de coefficients d'emménagement pour les matériaux tourbeux. Une synthèse récente des paramètres des sols tourbeux est proposée par Rezanezhad et al. (2016) dans le Tableau 22. Cette synthèse référence les travaux d'une soixantaine d'auteurs.

Il est intéressant de noter que la tourbe ne réagit pas comme un matériau poreux classiquement étudié en hydrogéologie (ex : alluvions). Son originalité provient de la combinaison de ses propriétés physiques spécifiques dont une faible densité apparente (0,02 à 0,254 kg.m⁻³), une grande porosité totale (71 à 95,1%), une large gamme de porosité efficace (0,048 à 0,45) et de perméabilité (0,7.10⁻⁵ à 1,3.10⁻² m.s⁻¹), ainsi qu'une capacité à gonfler ou à se rétracter lors de phase d'humidification et de drainage (Rezanezhad et al., 2016).

Les travaux de Porteret (2008) proposent également une synthèse de valeurs de perméabilité pour les sols tourbeux présentée en Tableau 23. Ces valeurs sont classées en fonction du type de tourbière (basse ou bombée), du type de tourbe (à sphaignes, bois, argileuse, à carex ou herbacée), de la texture (fibrique, mésique ou saprique) et du degré de décomposition de von Post.

Comme attendu, les valeurs de conductivité hydraulique les plus importantes sont observées pour des niveaux de décomposition faibles (indices de von Post de 1 à 3) et une texture de type fibrique tandis que les valeurs les plus faibles correspondent aux indices de von Post les plus forts (7,5 à 9) et à des textures de type saprique. Malgré ces grandes tendances, on peut noter la grande variabilité des valeurs de perméabilité pour de mêmes niveaux de décomposition. Cette grande variabilité peut être expliquée par deux facteurs ; d'une part, l'aspect subjectif de la description du degré de décomposition de von Post ; d'autre part, la grande marge d'erreur liée aux mesures in-situ et en laboratoire de la perméabilité (Holden et al., 2001).

La perméabilité semble décroître de manière exponentielle avec la profondeur comme l'illustre la Figure 33 et résulte de la décomposition progressive de la matière organique (Boelter, 1965 ; Hoag et Price, 1995 ; Quinton et al., 2000 ; Beckwith et al., 2003a et b).

Une relation empirique a été formulée par Romanov (1968) permettant de lier la conductivité hydraulique à la profondeur du profil tourbeux :

$$K_{(z)} = A/(z + 1) \times m$$

Avec :

z : profondeur de la tourbe ;

A et m : constantes relatives au type de tourbe.

Properties	Parameters	References
Physical/Hydraulic	- Bulk density: 0.02 - 0.254 g cm⁻³ - Total porosity: 71 - 95.1% - Specific yield: 0.048 - 0.45 - Shrinkage: 18 - 34 mm (from initial thickness = 100 mm) - Compression: 8 - 48 mm (from initial thickness = 100 mm) - Saturated hydraulic conductivity (K_{sat}): 0.7×10^{-5} - 1.3×10^{-2} m s⁻¹ - Unsaturated hydraulic conductivity (K_{uat}): 7.9×10^{-7} - 1.2×10^{-5} m s⁻¹ - Pore diameter: 0.1 - 4.6 mm - Adsorption-desorption partition coefficient: 1.33 - 5400 l g⁻¹ - Diffusion coefficient: 10^{-7} - 10^{-9} m² s⁻¹ - Dispersion coefficient: 0.3×10^{-3} - 9.0×10^{-7} m² s⁻¹ - Mass transfer exchange coefficient: 4.4×10^{-9} - 2.8×10^{-5} s⁻¹	7, 8, 14, 18, 28, 32, 34, 35, 37, 48, 55, 57 21, 22, 35, 46, 47, 48 2, 3, 6, 27, 28, 36, 37, 42, 44, 48, 49 23, 24, 25, 37, 38, 39, 41, 42 1, 11, 12, 17, 30, 34, 43, 50, 58 9, 11, 16, 17, 19, 20, 32, 34, 40, 43, 45

¹Abat et al. (2012); ²Baird (1997); ³Beckwith et al. (2003a,b); ⁴Blodau and Moore (2003); ⁵Blodau et al. (2011); ⁶Boelter (1965); ⁷Boelter (1968); ⁸Boelter (1969); ⁹Boudreau et al. (2009); ¹⁰Bougon et al. (2009); ¹¹Deiss et al. (2004); ¹²Dumontet et al. (1990); ¹³Freeman et al. (1997); ¹⁴Hayward and Clymo (1982); ¹⁵Hill and Siegel (1991); ¹⁶Hoag and Price (1995); ¹⁷Hoag and Price (1997); ¹⁸Hobbs (1986); ¹⁹Jordan et al. (1997); ²⁰Keefe et al. (2004); ²¹Kellner and Hallidin (2002); ²²Kennedy and Price (2005); ²³Kettridge and Binley (2008); ²⁴Kettridge and Baird (2010); ²⁵Kettridge and Binley (2011); ²⁶Koerselman et al. (1993); ²⁷Kruse et al. (2008); ²⁸Lewis et al. (2012); ²⁹Williams and Sparling (1988); ³⁰Lodenius et al. (1983); ³¹Moore and Dalva (1993); ³²Ours et al. (1997); ³³Preston et al. (2012); ³⁴Price and Woo (1988); ³⁵Price and Schlotzhauer (1999); ³⁶Price et al. (2008); ³⁷Quinton et al. (2000); ³⁸Quinton et al. (2008); ³⁹Quinton et al. (2009); ⁴⁰Reeve et al. (2001); ⁴¹Rezanezhad et al. (2010); ⁴²Rezanezhad et al. (2006); ⁴³Rezanezhad et al. (2012a,b); ⁴⁴Robinson (2003); ⁴⁵Rycroft et al. (1975a,b); ⁴⁶Schothorst (1977); ⁴⁷Schothorst (1982); ⁴⁸Schwärzel et al. (2002); ⁴⁹Schwärzel et al. (2006); ⁵⁰Siegel and Glaser (2006); ⁵¹Tindal and Kunkel (1999); ⁵²Todorova et al. (2005); ⁵³Turetsky et al. (2000); ⁵⁴Tveit et al. (2013); ⁵⁵Verry and Boelter (1978); ⁵⁶Weiss et al. (2002); ⁵⁷Wellock et al. (2011); ⁵⁸Zynter et al. (1989); ⁵⁹Bragazza et al. 2013; ⁶⁰Krueger et al.,

Tableau 22 : Différentes gammes de paramètres de sols tourbeux collectées à partir d'études de terrain et en laboratoire (tableau de synthèse in Rezanezhad et al., 2016)

Type de tourbière						Type de tourbe					
Tourbière bombée			Tourbière basse			à sphaignes			bois		
F	1.5 × 10-4	Ivanov (1981)	F	1.4 × 10-3	Baird (1997)	F	4.5 × 10-4	Sarasto (1961)	M	6 × 10-6	Boelter (1968)
F	4 × 10-5	Ivanov (1981)	F	5 × 10-5	Ivanov (1981)	S	3 × 10-6	Sarasto (1961)	M	7 × 10-8	Boelter (1968)
M	5 × 10-7	Ivanov (1981)	F	5 × 10-5	Romanov (1968)	F	1.6 × 10-3	Boelter (1968)	à carex		
F tourbe fibrique M tourbe mesique			M	8 × 10-6	Ivanov (1981)	F	3.8 × 10-4	Boelter (1968)	F	2.8 × 10-4	Sarasto (1961)
			M	8 × 10-6	Romanov (1968)	M	1 × 10-6	Boelter (1968)	S	5 × 10-6	Sarasto (1961)
			S	5 × 10-7	Romanov (1968)	argileuse			herbacée		
			S	tourbe saprique	S	6.3 × 10-8	Hemond (1990)	F	1.3 × 10-4	Boelter (1968)	
Niveau de décomposition - Von Post											
1			3.5			7.5					
F	1 × 10-3	Ryden (1990)	M	6 × 10-7	Ryden (1990)	S	1 × 10-7	Ryden (1990)			
F	2.2 × 10-3	Gafni (1986)	4			8					
F	2.8 × 10-4	Sarasto (1961)	M	5 × 10-4	Gafni (1986)	S	3 × 10-6	Sarasto (1961)			
F	4.5 × 10-4	Sarasto (1961)	M	1 × 10-6	Ryden (1990)	S	5 × 10-6	Sarasto (1961)			
1.5			4.5			8.5					
F	3 × 10-6	Ryden (1990)	M	2.2 × 10-4	Maelstrom (1923)	S	4 × 10-7	Maelstrom (1923)			
2			5			9					
F	1.5 × 10-3	Gafni (1986)	M	2 × 10-4	Gafni (1986)	S	1 × 10-12	Ryden (1990)			
F	8.5 × 10-5	Maelstrom (1923)	M	1 × 10-7	Ryden (1990)	S	1 × 10-7	Maelstrom (1923)			
F	1 × 10-6	Ryden (1990)	6			F tourbe fibrique M tourbe mesique S tourbe saprique					
3			M	3 × 10-5	Gafni (1986)						
F	1.7 × 10-4	Maelstrom (1923)	M	2 × 10-6	Maelstrom (1923)						
F	9 × 10-4	Gafni (1986)	M	6 × 10-8	Ryden (1990)						
F	3 × 10-7	Ryden (1990)	7								
			M	2 × 10-6	Maelstrom (1923)						
			M	6 × 10-6	Gafni (1986)						
			M	1 × 10-9	Ryden (1990)						

Tableau 23 : Valeurs de conductivités hydrauliques suivant le type de tourbière et le degré de décomposition de von Post (tableau de synthèse in de Porteret, 2008)

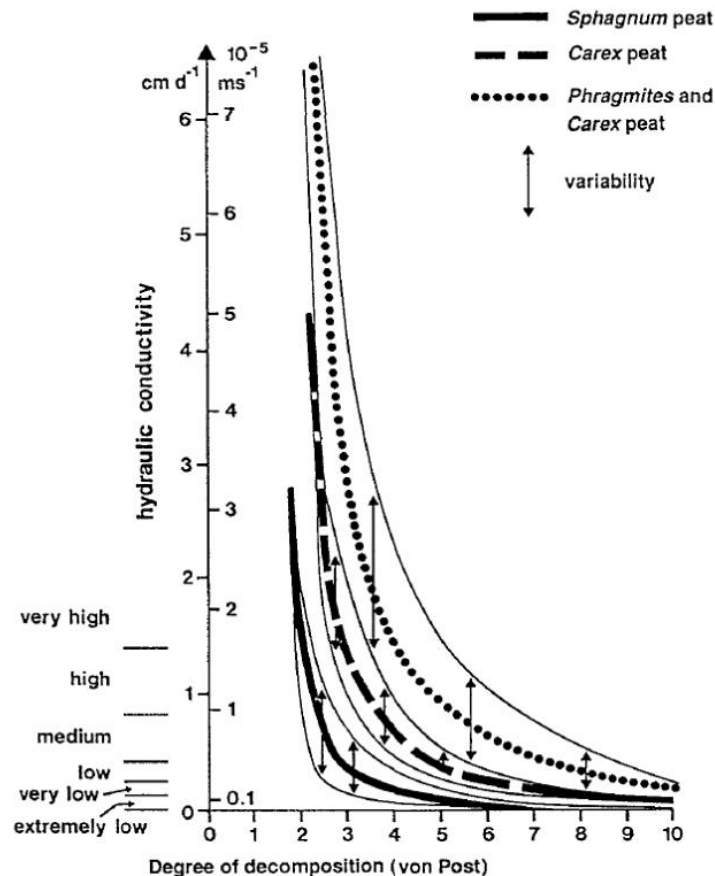


Figure 33 : Conductivité hydraulique en fonction du type de tourbe (Eggelsmann et al., 1993)

2.3. Structuration verticale et modèle diplotelmique

Comme il a été vu précédemment, le degré de décomposition de la tourbe augmente avec la profondeur, tandis que le diamètre des pores et la porosité efficace diminuent simultanément. Une photographie d'une carotte de tourbe présentée en Figure 34 illustre ce phénomène.

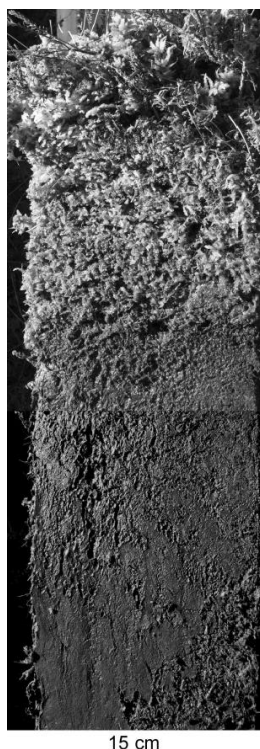


Figure 34 : Partie supérieure d'une carotte de tourbe (in Wastiaux, 2008 ; photo de F. De Vleeschouwer)

La nature organique de la tourbe ainsi que son degré croissant d'humification avec la profondeur lui confère une structure particulière, en deux strates distinctes, schématisée en Figure 35. Cette structure diplotelmique a notamment été décrite par Ingram (1978), Ivanov (1953) et Romanov (1968b) :

- L'**acrotelme** situé en surface dans les quelques premiers centimètres (entre 0 et 50 cm) de tourbe, correspond à la zone de fluctuation de la nappe. Ces fluctuations sont à l'origine de l'alternance de conditions aérobies et anaérobies. C'est dans cette zone active de la tourbière qu'a lieu la décomposition aérobie de la matière végétale qui est responsable de la formation de la tourbe. Cette zone est composée de la végétation vivante et de végétaux morts peu décomposés (Price et al., 2003). Elle est également caractérisée par une faible masse volumique ($< 70 \text{ kg/m}^3$; Van-Seters et Price, 2002), une porosité importante ($> 90\%$; Baird et Waldron, 2003) et une conductivité hydraulique qui peut être élevée ($> 10^{-5} \text{ m.s}^{-1}$; Rycroft, 1975a). Cette strate est variablement saturée en eau et contient en grande partie de l'eau gravitaire (mobilisable). Elle participe activement aux écoulements (stockage et redistribution) mais ne concerne qu'une faible proportion volumique de la tourbière. Cette zone n'est pas pour autant uniforme. En effet, la conductivité hydraulique est divisée par 4 dans les 50 premiers centimètres (Hoag et Price, 1995) restreignant encore davantage la partie hydrauliquement active. Toutefois, ces valeurs sont très variables d'un site à l'autre (Porteret, 2008).
- Le **catotelme** quant à lui occupe l'essentiel du volume de la partie inférieure de la tourbière (sous-jacent à l'acrotelme) et est constamment saturé en eau. Il est essentiellement composé de végétaux morts et demeure en permanence en conditions anaérobies ce qui a pour effet de ralentir les processus de décomposition (Ingram, 1978). L'accumulation de tourbe peut être potentiellement importante (de l'ordre de 7 à 8 mètres ; Porteret, 2008). La masse volumique de cette zone est plus élevée ($> 10 \text{ kg/m}^3$; Van-Seters et Price, 2002) tandis que sa conductivité hydraulique est plus faible ($< 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$; Rycroft, 1975a).

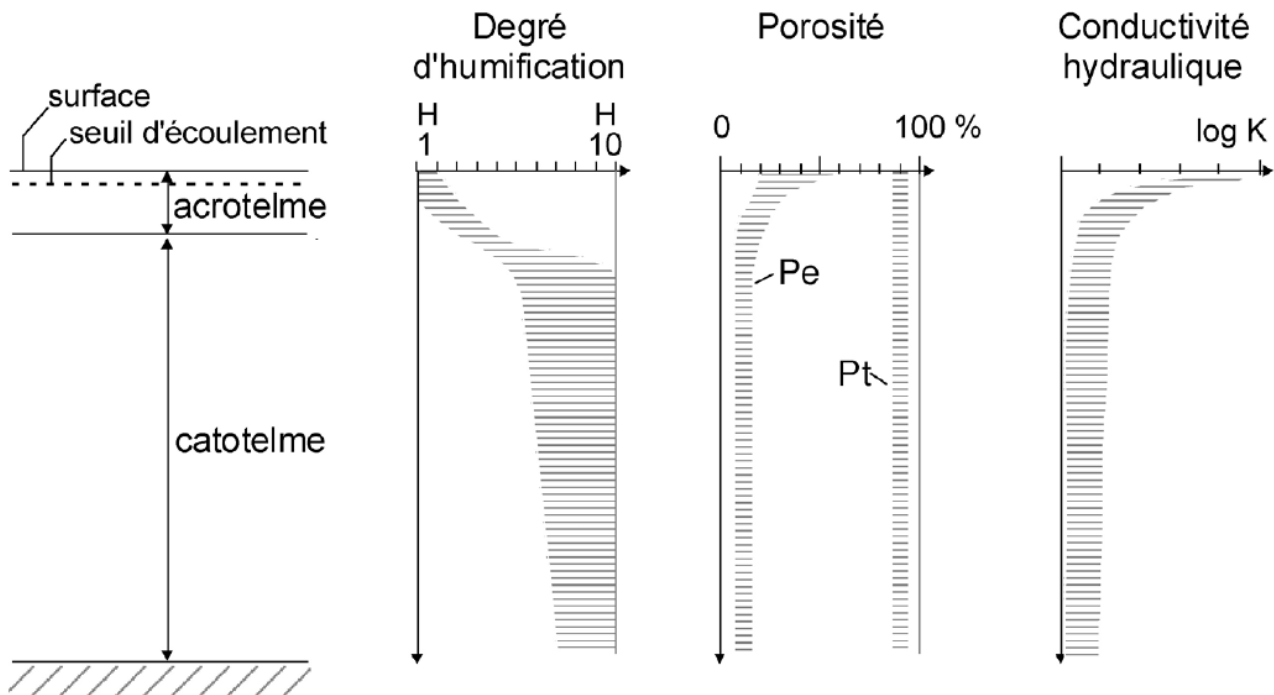


Figure 35 : Profil schématique de structuration d'une tourbière haute et de quelques paramètres hydro-physiques (Wastiaux, 2008)

H : degré d'humification ; K : conductivité hydraulique à saturation ; Pt : porosité totale ; Pe : porosité efficace

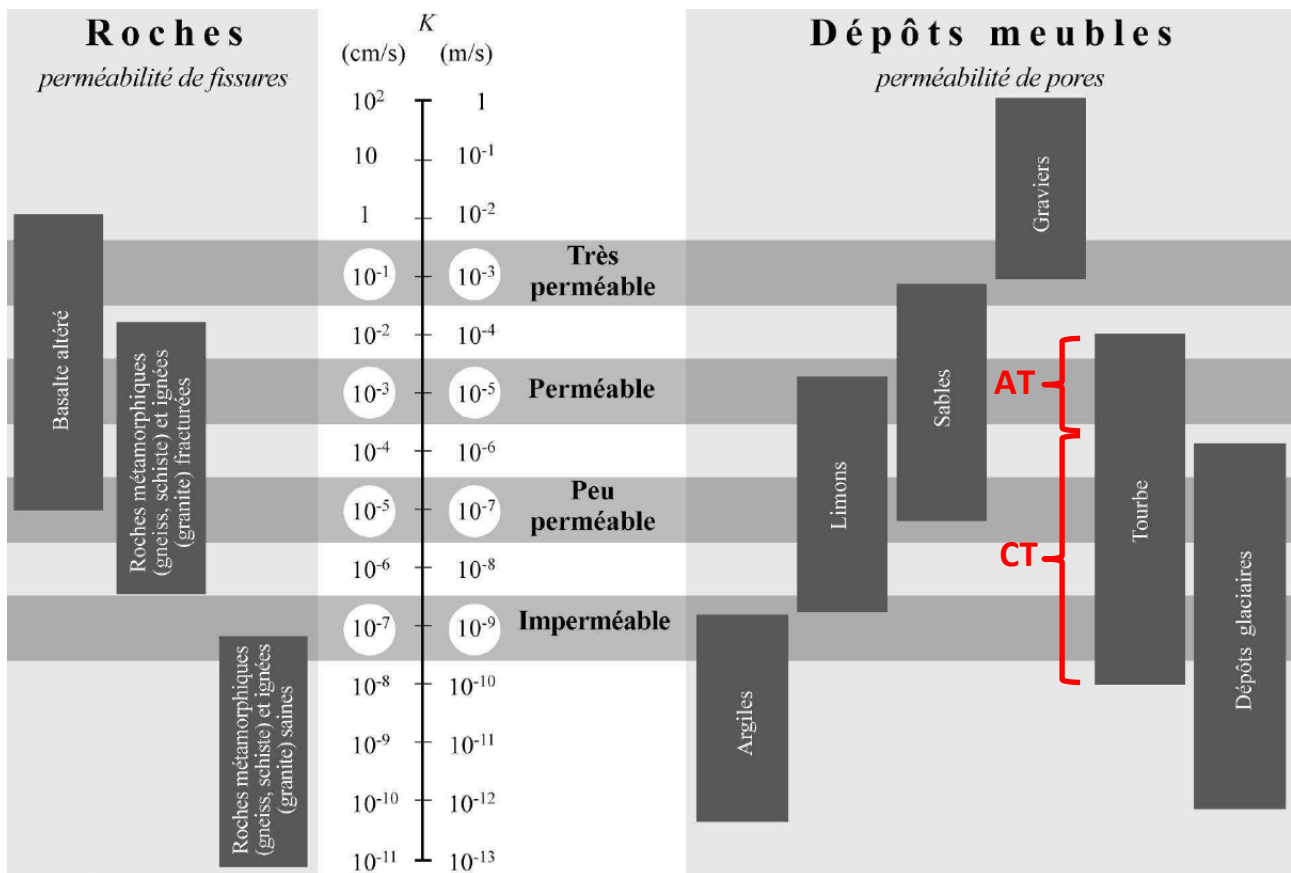


Figure 36 : Comparaison des gammes de perméabilité pour des roches et dépôts meubles (in Porteret (2008) inspiré par Freeze et Cherry (1969))

AT : Acrotelme ; CT : Catotelme

Cette structure en deux couches est couramment admise par la communauté scientifique pour une grande majorité de configurations de tourbières (bombées ou basses) même si quelques auteurs la remettent en cause pour certaines configurations plus complexes (Chason, 1986 ; Baird et al., 1996).

La Figure 36 propose une comparaison des gammes de perméabilité rencontrées dans les sols tourbeux par rapport aux gammes que l'on observe pour des roches d'origine sédimentaire (poreuses), volcanique (fissurées) ou métamorphique (fissurées). L'acrotelme possède des propriétés hydrodynamiques proches de celles que l'on connaît pour certains aquifères sableux (Figure 36). Le catotelme contient essentiellement de l'eau liée (non mobilisable) ne participant pas ou peu à l'écoulement et possède les propriétés hydrodynamiques situées entre l'aquitard et l'aquiclude (Figure 36).

2.4. Évolution temporelle de la tourbe (géométrie, propriétés hydrodynamiques, décomposition)

La tourbe est un matériau plastique qui peut subir d'importantes variations de volume (essentiellement dans l'acrotelme). Ces variations sont associées à une évolution qui est fonction de la saison (pluvieuse ou sèche) et de la quantité d'eau dans la tourbe (Hobbs, 1986). Ces phénomènes sont liés à la compression, au rétrécissement et à l'oxydation de la tourbe. Les deux premiers processus sont partiellement réversibles (Porteret, 2008).

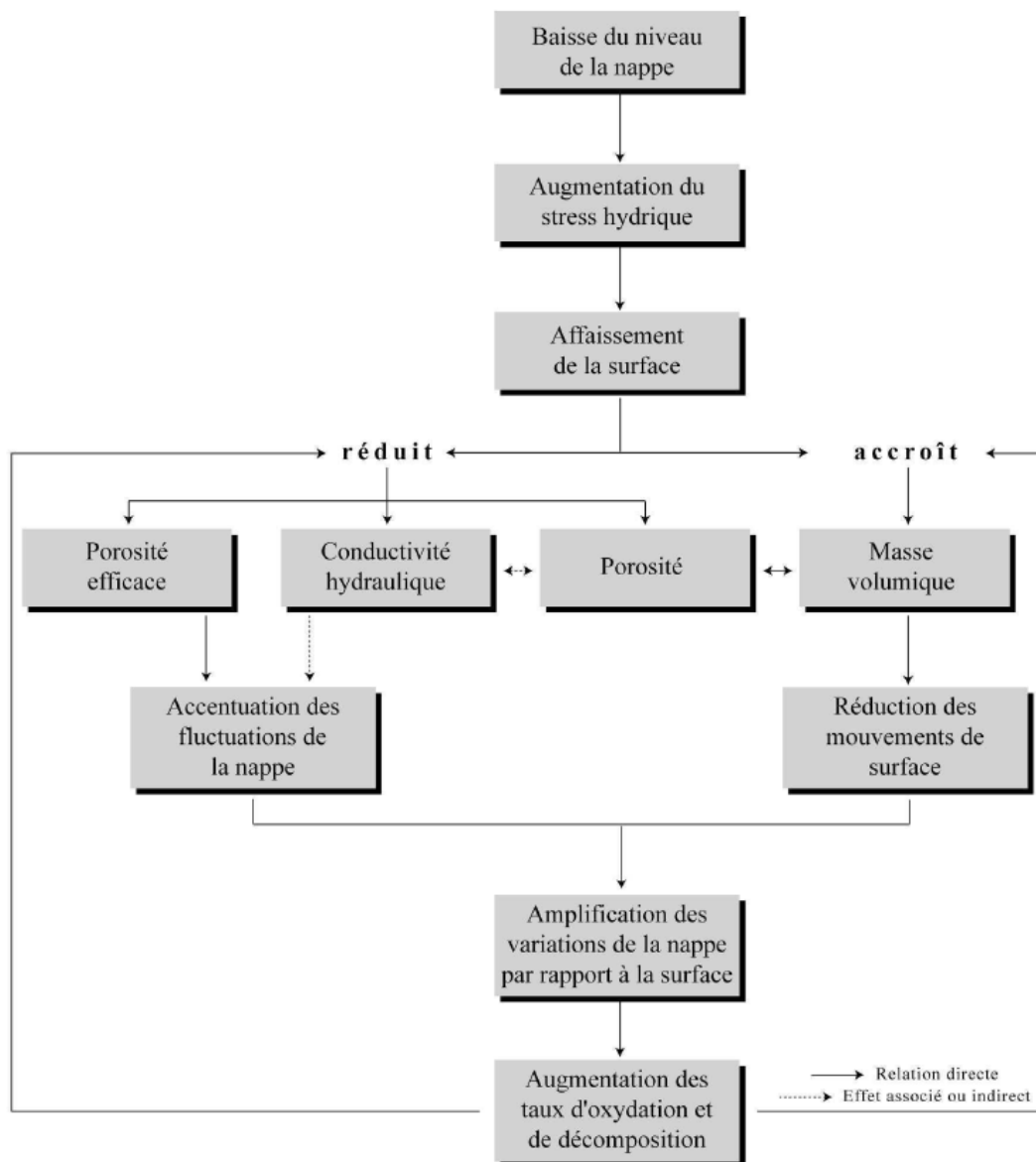


Figure 37 : Impact du changement de volume sur la tourbe (Porteret (2008) inspiré par Whittington (2006))

La compression est liée à la diminution de pression d'eau consécutivement à un drainage (naturel ou non) de la tourbe. Les pores se vident ce qui provoque l'effondrement de la structure de la matrice tourbeuse (Porteret, 2008). Le rétrécissement est lié à la contraction de la matrice en relation avec la tension de l'eau sur la tourbe (Price et Schlotahauer, 1999).

L'oxydation est liée à la mise en place de conditions aérobies lors du drainage et entraîne la décomposition (partielle) de la matière organique. Ce processus irréversible provoque une diminution de la taille des pores et des particules et une libération de carbone (Waddington et Mcneil, 2002 ; Price et al., 2003).

Gilman (1994) a mesuré des variations de hauteur liées au gonflement de la tourbe d'une amplitude supérieure à 10 cm pour les zones humides du Somerset (Royaume-Uni). Ces variations peuvent représenter entre 5 et 12% des battements de nappe dans les tourbières hautes de Welsh (Royaume-Uni). Les variations du niveau du sol liées au gonflement peuvent représenter une grande part du volume de stockage de l'eau. Kellner et Halldin (2002) l'ont estimé à 40% pour une tourbière en Suède, tandis que Price et Schlotzhauer (1999) l'ont mesuré à 70% pour une tourbière restaurée au Canada.

Pour résumer, la baisse du niveau de la nappe dans la zone humide provoque la désaturation en eau des horizons de surface. Ces horizons sont alors soumis à une oxygénation qui conduit à la minéralisation de la matière et consécutivement à un affaissement de la surface.

2.5. Hystérèse séchage/réhumidification

L'alternance de phases de drainage (séchage) et de remplissage (réhumidification) de la tourbe donne lieu à des phénomènes d'hystérèse (Figure 38).

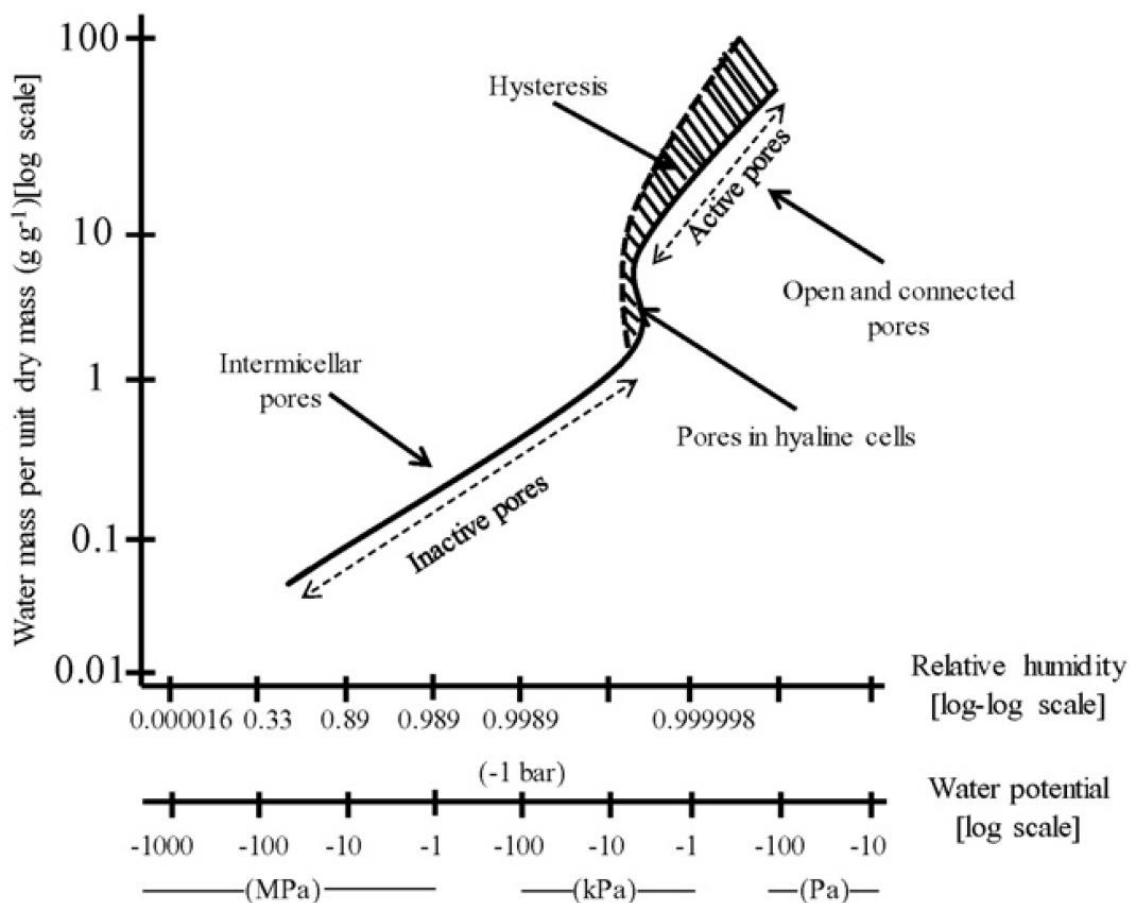


Figure 38 : Courbe de rétention d'eau pendant le séchage et la réhumidification d'un sol tourbeux à sphaignes illustrant le phénomène d'hystérèse (Rezanezhad et al. (2016) d'après les expériences de Hayward et Clymo (1982))

À partir de conditions totalement saturées, les pores de plus grandes tailles (ouverts et connectés) sont drainés en premier pour une force de succion minimale (c'est-à-dire la porosité efficace). Cette première phase de drainage correspond à des forces de succion équivalentes aux forces gravitaires (ressuyage gravitaire). Lorsque la succion augmente (avec des valeurs de pressions de plus en plus négatives), la tourbe connaît une seconde baisse de quantité d'eau qui est liée au drainage des pores partiellement fermés et des cellules hyalines ou hyalocystes (cellules végétales, notamment des sphaignes, permettant le stockage de l'eau). Une augmentation supplémentaire de la succion mobilise enfin l'eau des pores fermés qui étaient jusqu'alors hydrauliquement inactifs (Rezanezhad et al., 2016). L'hystérèse s'observe lors de la réhumidification de la tourbe. En effet, lors du séchage la géométrie du matériau tourbeux, ainsi que ses propriétés hydrodynamiques, ont été modifiées irrémédiablement. Le profil de déshydratation se différencie nettement du profil de réhumidification (hystérèse).

2.6. Anisotropie et hétérogénéité

Comme il a été vu précédemment, la tourbe est un milieu fortement hétérogène bien qu'il soit tout de même possible de prédire, dans la majorité des cas, la manière dont va évoluer la conductivité hydraulique avec la profondeur (Figure 33).

L'anisotropie est héritée principalement de la décomposition de la matière organique. L'orientation préférentielle des pores, qui explique le caractère anisotrope, est acquise pendant le processus de formation de tourbe. D'autres paramètres comme la stratification des débris végétaux et du matériau racinaire interviennent aussi dans ce processus (Kruse et al., 2008).

Beckwith et al. (2003a) ont déterminé des valeurs de conductivités hydrauliques horizontales et verticales saturées (K_h et K_v) sur 400 échantillons provenant de 20 carottes recueillies dans des tourbières en Angleterre. Dans près de 80% des échantillons, ils ont observé que K_h est supérieur à K_v , avec l'anisotropie moyenne, exprimée en rapport K_h/K_v , égale à 3,55. Braham et Strack (2014) ont déterminé des anisotropies (ratio K_h/K_v) beaucoup moins importantes pour les échantillons de tourbe à sphaignes du Canada (Tableau 24). Ceci démontre que d'un site à l'autre la variabilité des propriétés est importante et que chaque zone humide nécessite une caractérisation particulière.

Par conséquent, les sols de tourbe sont des milieux poreux anisotropes et hétérogènes. Les effets individuels et combinés de l'hétérogénéité et de l'anisotropie (perméabilité) affectent fortement le mouvement de l'eau dans les sols de tourbe (Beckwith et al., 2003b).

Peatland	Depth	Bulk density (kg m^{-3})	von Post	K_{satV} (m s^{-1})	K_{satH} (m s^{-1})	Anisotropy
Bog	Top	32 (3.5)	2.33 (0.58)	$4.7 (0.39) \times 10^{-2}$	$4.7 (0.31) \times 10^{-2}$	-0.0020 (0.020)
	Btm	81 (11)	5.17 (0.29)	$5.3 (2.5) \times 10^{-4}$	$8.7 (1.2) \times 10^{-4}$	0.24 (0.22)
	Top	30 (7.3)	1.33 (0.58)	$6.0 (3.5) \times 10^{-3}$	$6.4 (5.6) \times 10^{-3}$	-0.051 (0.15)
	Btm	60 (6.5)	3.50 (0.50)	$1.0 (0.56) \times 10^{-4}$	$2.0 (0.19) \times 10^{-4}$	0.33 (0.27)
Fen	Top	76 (45)	2.50 (0.87)	$1.2 (1.0) \times 10^{-2}$	$7.1 (5.8) \times 10^{-3}$	-0.099 (0.22)
	Btm	85 (24)	4.17 (0.29)	$3.1 (1.8) \times 10^{-4}$	$5.1 (13) \times 10^{-4}$	0.25 (0.28)
	Top	20 (4.9)	0.50 (0.00)	$3.7 (3.1) \times 10^{-2}$	$2.9 (0.23) \times 10^{-2}$	-0.082 (0.044)
	Btm	33 (5.5)	2.50 (0.50)	$5.0 (3.2) \times 10^{-3}$	$4.5 (3.6) \times 10^{-3}$	-0.064 (0.15)
Bog	Top	28 (2.1)	1.67 (0.58)	$5.5 (0.83) \times 10^{-2}$	$4.1 (0.60) \times 10^{-2}$	-0.13 (0.033)
	Btm	110 (55)	5.33 (0.58)	$1.9 (1.3) \times 10^{-3}$	$2.6 (3.5) \times 10^{-3}$	-0.11 (0.36)
	Top	64 (26)	2.33 (0.58)	$6.0 (6.0) \times 10^{-4}$	$5.7 (3.9) \times 10^{-4}$	0.054 (0.13)
	Btm	120 (25)	5.33 (0.58)	$9.1 (3.5) \times 10^{-5}$	$1.3 (0.62) \times 10^{-4}$	0.12 (0.057)
Fen	Top	37 (4.6)	2.00 (0.00)	$2.8 (0.36) \times 10^{-2}$	$1.4 (0.20) \times 10^{-2}$	-0.029 (0.11)
	Btm	59 (4.9)	3.17 (0.29)	$6.7 (0.49) \times 10^{-4}$	$1.0 (0.52) \times 10^{-3}$	0.14 (0.20)
	Top	49 (4.1)	2.83 (0.29)	$2.7 (0.77) \times 10^{-3}$	$2.4 (0.78) \times 10^{-3}$	-0.040 (0.15)
	Btm	53 (4.3)	3.67 (0.58)	$4.6 (1.7) \times 10^{-4}$	$9.2 (5.3) \times 10^{-4}$	0.28 (0.13)

Tableau 24 : Exemple de mesures des propriétés hydrodynamiques de tourbières à sphaignes du Canada (Braham et Strack, 2014).

2.7. Double porosité et transfert de masse

Lorsqu'il est question de transfert de solutés dans les milieux tourbeux (acrotelme), il est nécessaire de prendre en compte un milieu à double porosité (van Genuchten et Wierenga, 1976 ; Figure 39). Le taux d'échange d'un soluté donné entre les régions mobiles (flux advectif) et les régions immobiles s'explique par un terme de transfert de masse linéaire qui suppose que le taux est linéairement proportionnel à la différence de concentration entre les deux régions (diffusion moléculaire). Ainsi, les régions où le flux est immobile (porosité partiellement fermée) peuvent échanger des solutés avec les régions où le flux est mobile (porosité efficace).

Dans le catotelme, la faible perméabilité et la porosité efficace des couches profondes de tourbe limitent les échanges d'eau et de solutés avec les eaux de surface et l'atmosphère.

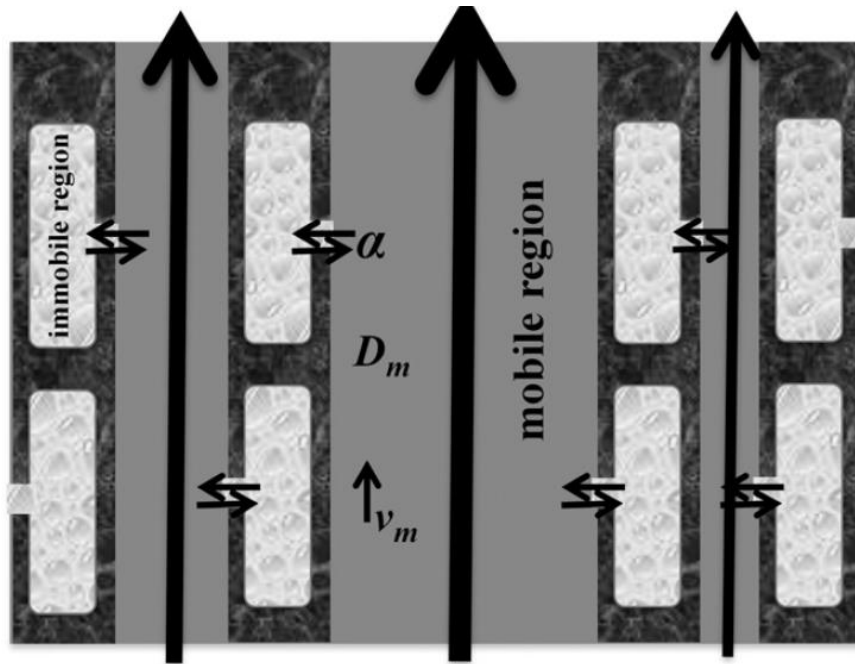


Figure 39 : Schéma conceptuel de la double porosité et du transfert de masse dans un sol tourbeux, incluant une « zone mobile » affectée par des flux advectifs et une « zone immobile » qui échange des solutés avec la région mobile via la diffusion moléculaire (Rezanezhad et al., 2016)

D_m : coefficient de dispersion dans la région mobile ; V_m : vitesse porale de l'eau dans la région mobile ; α : coefficient de transfert de masse de premier ordre régissant le taux d'échange de soluté entre les régions d'eau de pores mobiles et immobiles. Nb : La figure suppose un gradient hydraulique vers le haut.

2.8. Effets de seuils et types d'écoulement

2.8.1. Effets de seuil

Les effets de seuils dépendent du niveau de remplissage de la zone humide et sont liés à la présence ou à l'absence de ruissellement de surface et à la présence ou à l'absence d'écoulements superficiels.

○ Effet de seuil lié au ruissellement

D'une manière générale, la capacité d'infiltration importante de l'acrotelme limite le ruissellement en surface de la tourbière. Toutefois, le ruissellement de surface peut s'observer pour deux situations distinctes :

- par dépassement du seuil d'infiltration (capacité d'infiltration) lorsque l'intensité des précipitations est importante (Porteret, 2008) ;
- par dépassement du seuil de saturation de l'acrotelme, c'est-à-dire, lorsque le milieu est intégralement saturé en eau et que la tourbe ne peut plus emmagasiner le surplus (Porteret, 2008). Le niveau de la nappe correspond alors à la surface de la tourbière.

○ Effet de seuil lié aux écoulements superficiels

L'écoulement à l'exutoire de la tourbière peut être contrôlé par un niveau de seuil d'écoulement (niveau piézométrique) (Romanov 1968a et b ; Tomlinson, 1979 ; van der Schaaf, 1999 ; Wastiaux, 2008). Wastiaux (2000) a suivi l'évolution des niveaux de nappe comparés aux débits d'exutoire d'un massif tourbeux des Hautes-Fagnes (Figure 40). En période pluvieuse (a, Figure 40), les niveaux hydrostatiques restent élevés (proche de la surface), on observe également un écoulement à l'exutoire du massif tourbeux correspondant conjointement : 1) au drainage de l'acrotelme nouvellement rechargé par les précipitations et 2) à l'excédent de précipitations n'ayant pas pu s'infiltrer dans l'acrotelme (ruissellement de surface). Pendant la période sèche (b et d, Figure 40), le niveau hydrostatique s'effondre brutalement (changement de régime de fonctionnement hydrologique) en marquant des paliers descendants (pas de temps journalier). En parallèle, le débit d'exutoire devient rapidement extrêmement faible. L'évapotranspiration est alors à l'origine des baisses du niveau piézométrique. Il est intéressant de noter que sur cette période sèche, les quelques précipitations enregistrées sont intégralement stockées dans l'acrotelme et ne génèrent pas d'écoulement notable à l'exutoire. C'est seulement à partir d'un certain niveau de remplissage de la nappe, appelé seuil d'écoulement rapide (trait horizontal tireté, Figure 40), que l'on retrouve un écoulement à l'exutoire (f, Figure 40).

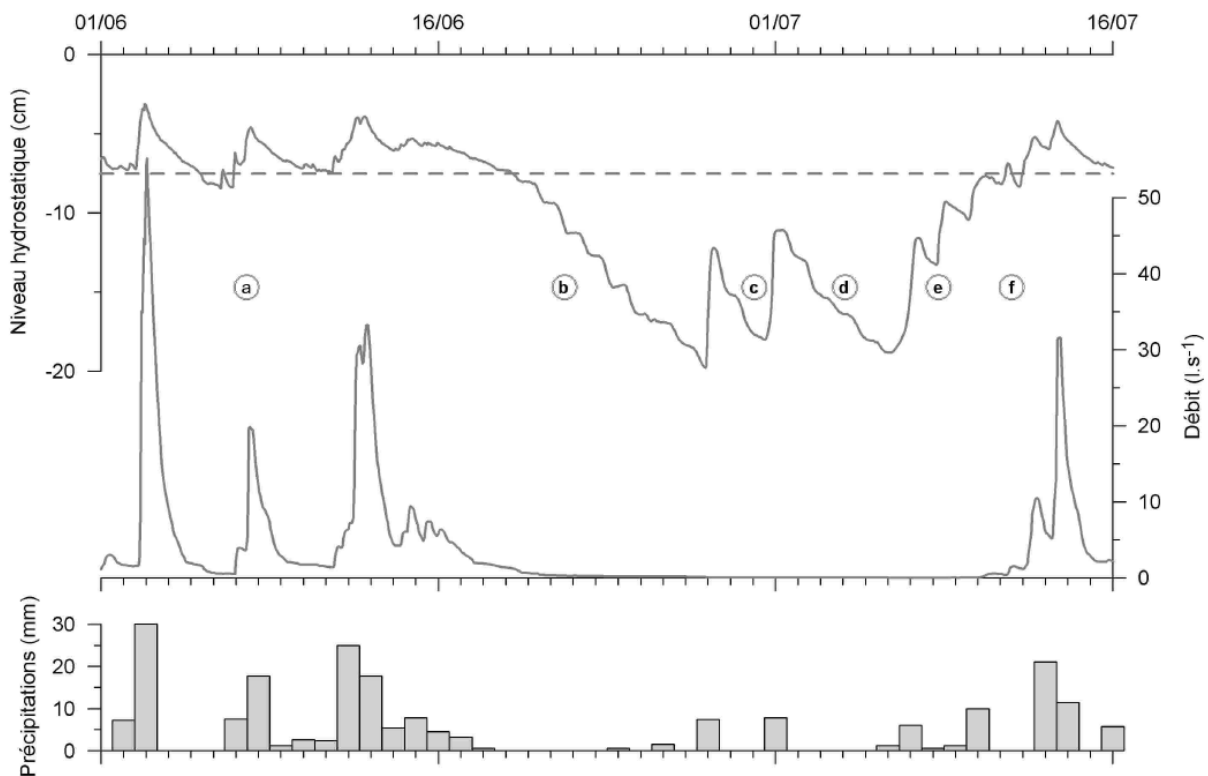


Figure 40 : Évolution parallèle du niveau hydrostatique dans la tourbière et des débits à l'exutoire d'un petit bassin versant tourbeux des Hautes-Fagnes (Wastiaux, 2008)

Sous ce seuil, les écoulements latéraux sont négligeables pour deux raisons :

- la perméabilité de la base de l'acrotelme est trop faible pour permettre un transfert latéral ;
- les forces capillaires en compétition avec les forces gravitaires sont trop importantes pour générer de l'écoulement.

Il est intéressant de noter que « le niveau de seuil d'écoulement rapide est situé plus haut que le contact entre l'acrotelme et le catotelme, ce qui confirme que la conductivité hydraulique diminue très rapidement au sein même de l'acrotelme. Seule la partie superficielle (végétation vivante) possède une perméabilité élevée, susceptible de générer un écoulement lorsque la nappe s'y trouve. Par contre, l'eau du catotelme et de l'acrotelme inférieur est très peu mobile » (Wastiaux, 2008).

2.8.2. Types d'écoulement

Pour cerner la répartition des écoulements dans une tourbière, les seules mesures de terrain de perméabilité (qui concernent une échelle locale) sont inadaptées pour détecter les écoulements préférentiels liés aux hétérogénéités de la matrice tourbeuse, des macropores ou des conduits souterrains (Duranel, 2015). Les écoulements préférentiels dans les zones humides tourbeuses ont été décrits depuis longtemps (Newson, 1976 ; Gilman et Newson, 1980 ; Ingram, 1983 ; Eggelsmann et al., 1993) et peuvent avoir un rôle hydrologique potentiellement important (Duranel, 2015). Par exemple, Holden et Burt (2002) observent que la contribution des écoulements préférentiels au cours d'eau peut varier entre 10 et 30% pour une zone humide de couverture (ombrotrophe).

La décomposition de l'hydrogramme de crue jusqu'au tarissement (loi de Maillet) permet de montrer la vidange de plusieurs réservoirs avec des temps de réponses différents qui semblent correspondre aux variations de niveaux piézométriques et aux niveaux de seuils décrits précédemment (Wastiaux, 2008).

Plusieurs types d'écoulements horizontaux peuvent être observés :

- « Écoulement rapide à sursaturation ». Cet état s'observe lorsque les niveaux piézométriques initiaux correspondent à la cote altimétrique de surface. « *La particularité des tourbières est que l'entière du bassin arrive à saturation au même moment, ce qui va donc provoquer l'évacuation de la totalité des précipitations excédentaires par ruissellement* » (Wastiaux, 2008) ;
- « Écoulement rapide en sous-saturation ». Cet état s'observe pour des niveaux piézométriques initiaux au-dessus du seuil d'écoulement rapide. Cet écoulement correspond au drainage de la partie supérieure de l'acrotelme qui présente les perméabilités les plus favorables ainsi que des voies d'écoulements préférentiels en conduits souterrains ;
- « Écoulement de base lent ». Cet état s'observe pour des niveaux piézométriques initiaux en-dessous du seuil d'écoulement rapide. Cet écoulement correspond au drainage de la partie inférieure de l'acrotelme qui présente des perméabilités beaucoup plus faibles mais suffisantes pour qu'un écoulement significatif puisse être parfois observé. Plus à la marge, on peut également considérer qu'une infime partie du catotelme peut être drainée lors de l'évolution des débits d'exutoire jusqu'au tarissement. Les flux engagés sont très faibles voir négligeables comparativement aux volumes d'eaux drainés par les autres compartiments.

Concernant les écoulements verticaux, ils sont considérés comme négligeables (Ingram, 1982 ; van der Schaaf, 2002). Ceci est notamment expliqué par le fait que le substratum des zones humides est presque toujours imperméable. En effet, un flux vertical descendant s'opposerait aux conditions de mise en place et de maintien de ces milieux (proche de la saturation en eau). De plus, le catotelme étant pas ou très peu perméable, il est souvent isolé des écoulements régionaux (Duranel, 2015).

Cependant, des flux ascendants provenant des aquifères sous-jacents ont été mesurés sur des tourbières hautes (ombrotrophes) en période sèche (Glaser et al., 1997). Dans ces conditions particulières, le substratum n'est pas imperméable, les écoulements verticaux ascendants assurent le maintien en eau de ces tourbières. Ce type d'alimentation, non seulement des tourbières mais des zones humides en général, par les eaux souterraines semble assez fréquent. La Figure 29 (p35 - typologie des milieux terrestre sous dépendance des eaux souterraines) montre différents types où des flux verticaux ascendants sont représentés.

2.9. Capacité de stockage et restitution

2.9.1. Idées reçues qui font l'objet d'une controverse

Pour le grand-public et pour une part de la communauté scientifique non spécialiste de questions relatives à l'hydrologie, les tourbières sont souvent assimilées à des « éponges » aptes à stocker de grandes quantités d'eau et à restituer cette eau progressivement aux ruisseaux et/ou aux aquifères

lorsqu'ils viennent à en manquer l'été. L'analogie qui est faite avec le rôle d'éponges est « *entretenu et relayé par certains ouvrages de vulgarisation, parfois cautionnés par des personnalités scientifiques* » (Wastiaux, 2008).

Ce type d'analogie généralisant est repris par des médias grand public. On peut par exemple citer la page Wikipédia¹⁵ relative au rôle de rétention de l'eau des zones humides tourbeuses : « *les tourbières jouent un rôle de régulation des flux hydriques, en retenant l'eau pendant une période plus ou moins longue avant de la restituer au milieu. Cela est notamment dû aux caractéristiques des sphaignes, qui se comportent comme de véritables éponges. En régulant le débit de l'eau, les tourbières permettent d'adoucir les phénomènes de crue. Et, en restituant progressivement l'eau à son milieu, les tourbières maintiennent un débit d'eau minimal dans les cours d'eau en été (on parle de soutien des débits d'étiage)* ».

Cette section n'a pas pour objectif de réfuter intégralement une telle analogie, mais plutôt d'apporter quelques éléments bibliographiques pour introduire un peu plus de complexité au modèle trop simpliste « d'éponge » mais aussi de moduler certaines conclusions trop hâtives telles que « *adoucir les phénomènes de crue* » et « *les tourbières maintiennent un débit d'eau minimal dans les cours d'eau en été* ».

Cette idée reçue sur le rôle de régulation hydrologique tire probablement son origine dans la confusion qui est communément faite entre la présence (ou l'absence) d'eau et sa disponibilité pour les autres compartiments de l'hydrosystème. En d'autres termes, il s'agit de distinguer l'eau qui circule de manière effective et qui est renouvelée à l'échelle d'un cycle hydrologique, de l'eau qui est stockée et non renouvelée à l'échelle de temps saisonnière.

On peut avancer une seconde explication à cette confusion souvent faite, « *les données hydrologiques des tourbières sont encore rares en France* » (Porteret, 2011), « *les véritables études hydrologiques restent relativement rares et elles traitent essentiellement des effets des travaux de drainage et de la reforestation* » (Martin et al., 2007).

2.9.2. Rôle hydrologique des zones humides tourbeuses : questions et enjeux particuliers relatifs à ces milieux

Le rôle hydrologique des zones humides a été étudié pour : 1) la capacité de stockage des eaux qui peut présenter un intérêt pour la régulation des crues (ex : Acreman et al., 2011 ; Acreman et Holden, 2013 ; Asp, 2009 ; Bragg, 2002 ; Gleason et al., 2007 ; Holden et Burt, 2003 ; Jaenicke et al., 2010 ; Juliano et Simonovic, 1999 ; Krasnostein et Oldman, 2004 ; Oberlin, 2000 ; Quinton et al., 2003 ; Shantz et Price, 2006 ; Zukowski et al., 2015) et 2) la capacité de restitution progressive des eaux qui peut présenter un intérêt pour le soutien d'étiage des cours d'eau (ex : Acreman et Holden, 2013 ; Baden et Eggelsmann, 1964 ; Bay, 1969 ; Demissie et Khan, 1993 ; Eggelsmann, 1971 ; Evans et al., 1999 ; Ivanov, 1981 ; Ingram, 1983 ; Martin et al., 2007 ; Martin et al., 2008 ; Nys, 1962 ; Porteret, 2011 ; Price, 1992 ; Romanov, 1968 ; Uhden, 1965 ; Wastiaux, 2008). Cette liste d'exemples bibliographiques n'est pas exhaustive et sera complétée dans les phases ultérieures du projet.

L'University of Leeds Peat Club (2017) propose un article qui catalogue dix questions communément posées sur le rôle des tourbières dans les domaines de l'écohydrologie, la dynamique du carbone, les services écosystémiques et les archives paléoenvironnementales. Parmi ces questions, l'une concerne l'analogie souvent faite entre les tourbières et les éponges. Ils invitent les scientifiques à « *s'efforcer d'expliquer comment les tourbières fonctionnent réellement sur le plan hydrologique* » et les incitent à admettre « *les problèmes liés à l'analogie avec les éponges* ». Ils ajoutent qu'il est nécessaire de « *reconnaître que toutes les tourbières ne se comportent pas de la même manière et que leur configuration topographique et géologique, leur végétation et leur gestion peuvent influencer leur fonctionnement hydrologique* ».

○ Rôle de stockage

Les travaux de Wastiaux (2000) sur une tourbière des Hautes-Fagnes montrent une « *fréquence élevée de saturation des bassins tourbeux* » (Figure 41). En effet, plus de 60% du temps, la tourbière présente des niveaux hauts (b, Figure 41). Cette situation est particulièrement défavorable pour le stockage d'eau

¹⁵ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Tourbi%C3%A8re> (Page consultée en décembre 2017)

puisque l'espace disponible est minime une grande partie de l'année. Ainsi, « la capacité de stockage est nulle lorsque la nappe atteint le seuil d'écoulement rapide, ce qui se produit pendant plus de 250 jours par an, soit toute la période hivernale et lors des périodes pluvieuses estivales » (Wastiaux, 2008).

Cette capacité devient maximale une très courte partie de l'année lorsque l'évapotranspiration fait baisser le niveau piézométrique sous le seuil d'écoulement rapide, « elle n'excède 40 mm que pendant une dizaine de jours, tandis que des valeurs de 60 mm ont été observées que tout à fait exceptionnellement. Dans ces conditions, la probabilité qu'une pluie importante soit totalement absorbée par la tourbière s'avère très faible, et l'impact de la tourbière sur l'écêtement de crues (provoquées par des pluies exceptionnelles) restera très limité » (Wastiaux, 2008).

Cette fréquence élevée de niveaux piézométriques hauts est observée également sur les tourbières de couverture du Yorkshire (Royaume-Uni) dans les travaux d'Holden (2006) qui montrent que 75% du temps la nappe se trouve à moins de 10 cm de la surface.

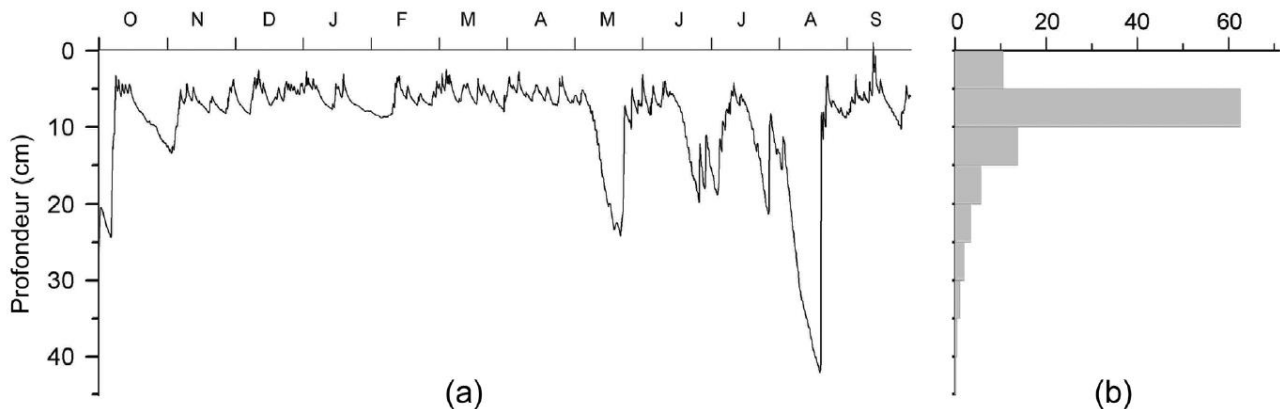


Figure 41 : (a) Exemple de fluctuations du niveau hydrostatique dans une tourbière des Hautes-Fagnes pendant une année hydrologique ; (b) Durée de résidence du niveau hydrostatique dans cette même tourbière : histogramme de fréquence par niveau de 5 cm, résumant 4 années de mesures (Wastiaux, 2008).

Les travaux de Martin et al. (2007) sur la tourbière des Sagnes, qui est située dans la partie nord-ouest du Mont-Lozère, rapportent un rôle d'écêtement pour les crues les plus fortes par « l'amortissement des débits instantanés de pointe de crue, sans provoquer une diminution du volume total des écoulements en crue ». Ce qui signifie que le stockage dans la tourbière est transitoire et particulièrement court (restitution très rapide). En état initialement saturé, la tourbière ne semble jouer aucun rôle tandis qu'en état initial de basses eaux, Martin et al. (2007) observent un « allongement des temps de réponse » d'une dizaine d'heures qui est lié à la capacité de stockage et de restitution de la tourbière, mais aussi à des effets de « ralentissement des écoulements par la microtopographie de surface » (Porteret, 2011). En somme, dans ces exemples les tourbières jouent un rôle très relatif dans l'écêtement des crues.

Les travaux de Porteret (2011) sur la tourbière de la Prenarde (minérotrophe) située dans le massif du Forez montrent que cette zone humide présente des volumes d'acrotelme deux fois supérieurs à ceux du catotelme (respectivement 13 396 m³ contre 6 903 m³). Porteret (2011) a estimé que pour une position médiane de la nappe, la capacité de stockage maximal est de 64,5 mm (en équivalent lame d'eau). L'auteur tempère toutefois ces résultats : « si la porosité et le niveau de saturation de l'acrotelme peuvent conférer aux tourbières un rôle important dans le stockage supplémentaire de l'eau, ces propriétés ne sont véritablement efficaces que de manière ponctuelle et aléatoire au cours de l'année hydrologique ». Il précise également qu'en période humide les niveaux de nappes étant hauts, la capacité de stockage demeure assez faible. En période plus sèche, lorsque la capacité de stockage est maximale, l'intensité de certains épisodes pluvieux (orage dont l'intensité est supérieure à 9 mm.h⁻¹) peut dépasser la capacité d'infiltration (4 mm.h⁻¹) de la zone humide. La capacité de stockage n'est alors pas entièrement exploitée, le surplus d'eau qui ne s'est pas infiltré part directement en ruissellement.

➔ Pour les exemples cités précédemment, le rôle de stockage est assez modeste et très ponctuel dans l'année. Durant les périodes de pluie ou de fonte des neiges, la plupart des tourbières évacuent rapidement l'eau entrante parce qu'elles ont peu de capacité de stockage de réserve (Bragg, 2002 ; Holden et Burt, 2003 ; Quinton et al., 2003). Cependant, certains auteurs soulignent que le rôle de stockage peut être non négligeable pour des tourbières de dépression ou de fond de vallon qui sont alimentées latéralement par des eaux souterraines (Jaenicke et al., 2010 ; Acreman et al., 2011 ; Acreman et Holden, 2013). Dans ce cas, la capacité de stockage/déstockage de la tourbière prend en compte la capacité du réservoir souterrain. Il pourra alors être difficile confusion dans l'estimation des capacités de stockage entre celles liées à la tourbières et celles liées aux nappes en relation

○ Rôle de stockage/restitution

Porteret (2011) note qu'entre la fin du printemps et durant l'été (année 2007), pour le bassin versant tourbeux, 31% des averses de faible intensité ($\leq 3 \text{ mm.h}^{-1}$) n'entraînent pas d'augmentation de débit à l'exutoire tandis que pour un bassin versant voisin non tourbeux, « *la sensibilité aux petits épisodes pluvieux est beaucoup plus forte puisque, sur la même période, 9 % seulement des averses n'entraînent pas d'augmentation du débit* ». Cet effet de filtre d'une partie des précipitations amène à s'interroger sur le devenir de cette eau. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées. À titre d'exemple, deux hypothèses sont proposées ci-dessous, l'une en faveur du rôle de soutien d'étiage l'autre en défaveur :

- *L'eau est stockée de manière transitoire dans l'acrotelme pour s'écouler progressivement vers le cours d'eau à l'exutoire.* Cette hypothèse penche en faveur du soutien d'étiage des cours d'eau.
- *L'eau est récupérée directement par les plantes et évacuée par évapotranspiration ou piégée dans les horizons tourbeux mais sans possibilité de restitution.* Cette possibilité n'est pas un facteur favorable au soutien d'étiage.

Classiquement, la partie saturée d'un l'aquifère est souvent isolée du sol du fait de la présence d'une zone non saturée (dont la puissance est plus ou moins importante). Le prélèvement d'eau de la végétation se fait directement dans le sol (zone racinaire) et non dans la nappe. Pour les zones humides tourbeuses, le sol et la nappe sont très souvent confondus. Ceci est lié à la faible épaisseur de l'acrotelme, à des niveaux statiques généralement hauts et à la nature même de ce milieu poreux (pas de matrice minérale et donc pas d'horizon de transition matière organique/matière minérale). Cette considération peut avoir des conséquences importantes puisque la végétation prélève directement son eau dans la nappe (Figure 40). Le stock d'eau ainsi consommé par les plantes ne participera pas au soutien d'étiage. Il est donc important de bien quantifier l'ETP dans les bilans hydrologiques.

Martin et al. (2007) ont comparé deux bassins versants présentant de nombreuses similitudes, la principale différence étant la présence ou l'absence de zones humides tourbeuses. Ils observent que la présence de la tourbière des Sagnes dans le bassin versant « *n'est pas un facteur favorable au soutien des étiages* ». Pour expliquer cette dernière observation, Martin et al. (2007) font l'hypothèse que la tourbière topogène des Sagnes constitue « *une zone très favorable à l'évapotranspiration en été* ».

Riddell et al. (2013) pour la zone humide de Craigieburn-Manalana située en Afrique du Sud en tête de bassin versant, réfutent l'hypothèse selon laquelle « *les zones humides augmentent les débits d'étiage* ». L'évapotranspiration estimée par scintillométrie pendant la saison sèche donne des valeurs qui varient entre 2,3 et 3,5 mm.j⁻¹ pour la zone humide tandis que pour le reste du bassin versant les valeurs se situent entre 0,9 et 2,2 mm.j⁻¹ alors même que les écoulements du cours d'eau ont cessé. Leur interprétation est qu'en période sèche, l'eau de la zone humide retourne préférentiellement à l'atmosphère plutôt qu'à l'alimentation du cours d'eau.

D'autres résultats présentés ci-après permettent d'apprécier la part de l'écoulement lent pouvant participer au soutien d'étiage.

Wastiaux (2000), pour une lame d'eau annuelle de 1141 mm enregistrée à l'exutoire d'un petit bassin versant tourbeux (minérotrophe) des Hautes-Fagnes, estime que « 1053 mm correspondent à de l'écoulement rapide tandis que seulement 88 mm correspondent à de l'écoulement de base, soit moins de 8% du volume total écoulé ».

Un autre exemple est donné par Holden (2003), pour une tourbière de couverture (ombrotrophe). Cet auteur estime que la part de ruissellement représente 81% du volume d'eau écoulé. La part d'eau circulant dans les couches les plus transmissives de l'acrotelme représente 17% et seulement 2% de l'écoulement est produit par les couches plus profondes de tourbe.

D'autres études, au contraire, mettent en avant le rôle positif des zones humides pour le soutien d'étiage. Martin et al. (2008), par exemple, semblent créditer la thèse d'Oberlin (2000) selon laquelle les tourbières joueraient « *un rôle positif dans le soutien des débits d'étiage* ». Ils avancent plusieurs arguments :

- Le premier porte sur la fermeture des milieux tourbeux et le remplacement par la forêt qui entraîne une augmentation de l'évapotranspiration et donc une diminution des écoulements, surtout en été (Robinson et al., 1998). Ceci sous-entend que les zones humides tourbeuses seraient préférables à une forêt en ce qui concerne le soutien d'étiage.
- Le second porte sur les tourbières ombrotrophes de haut de versant qui « *alimentent des débits d'étiage relativement abondants dans la partie apicale de certains ruisseaux* » (Martin et al., 2002) et pour lesquelles il conviendrait d'entamer de véritables études hydrologiques.

➔ Les méthodes d'approche employées par les différents auteurs pour qualifier les potentialités de soutien aux étiages des zones humides sont variées. Certains auteurs comparent des bassins versants avec et sans tourbière, d'autres comparent une proportion d'écoulement rapide par rapport à des écoulements lents et d'autres enfin comparent la demande en évapotranspiration de différents couverts végétaux. Toutefois sur la base des résultats obtenus, la majorité des auteurs s'accordent à dire que le rôle de soutien d'étiage est plutôt faible (Baden et Eggelsmann, 1964 ; Evans et al., 1999 ; Price, 1992). Le bilan peut même être négatif lorsque l'eau contenue dans les zones humides tourbeuses est reprise par évapotranspiration durant la période sèche. Certains auteurs relativisent l'importance de l'évapotranspiration en comparaison avec d'autres couvertures végétales dont la demande en eau serait plus importante.

○ Comparaison entre tourbières intactes et tourbières drainées

Les travaux de drainage ont été particulièrement dévastateurs pour les zones humides. La modification des niveaux d'eau liée au creusement de fossés drainants a une incidence directe sur certaines communautés végétales comme les sphaignes. « *Dans ces circonstances, elles perdent leur avantage compétitif face à d'autres végétaux comme la molinie qui envahit les zones affectées* » (Wastiaux, 2008). Ces changements de communautés végétales s'accompagnent également de dégradations de la tourbe, « *l'acrotelme disparaît et la tourbière ainsi dégradée ne se compose plus que d'un catotelme, à la tourbe fortement humifiée* » (Wastiaux, 2008) qui est surmonté par une nouvelle végétation (constituée de molinie). Wastiaux (2008) souligne que les conséquences hydrologiques du drainage sont assez variables selon les auteurs, ceci étant lié au fait qu'il est difficile « *d'isoler la seule influence du drainage de celle d'autres paramètres* » (végétation, niveau de dégradation...).

Les tendances qui semblent se dégager sont notamment une accélération des temps de transfert et une augmentation des débits de pic crue (Holden et al., 2004 ; Martin et al., 2008 ; Mbuyu, 1989 ; Robinson et al., 1991). Ces considérations sont à moduler suivant l'état de dégradation de l'acrotelme, certains auteurs mettant en avant des résultats contradictoires, par exemple, Baden et Eggelsmann (1964) observent plutôt une atténuation des débits de pointe.

Les opérations de drainage entraînent un abaissement du niveau statique de la tourbière qui peut libérer de l'espace disponible pour le stockage même si Robinson (1986) considère que le gain d'espace de stockage est négligeable. Cet abaissement des niveaux hydrostatiques permet également un soutien d'étiage plus efficace. Cette situation est transitoire et ne dure que pendant une période plus ou moins

longue après les travaux de drainage. En effet, la disparition de l'acrotelme a un effet nocif sur la capacité de stockage et le soutien d'étiage du fait qu'il constitue la couche hydrologiquement active de la tourbière. Martin et al. (2008) observent que « *le drainage des tourbières de fond de dépression a pour conséquence une accentuation des écoulements en étiage* » par comparaison avec une tourbière intacte (tourbières des Sagnes). Ils notent que cette tourbière drainée est elle-même largement soutenue par une nappe d'arène granitique qui permet de pérenniser ces conditions. La présence d'une nappe d'accompagnement pose la question du rôle respectif de la tourbière et de la nappe dans le soutien d'étiage.

➔ Cette comparaison entre des tourbières drainées et des tourbières intactes est intéressante puisqu'elle permet de mieux apprécier les vulnérabilités de ces milieux.

○ Interaction avec les aquifères : comparaison entre tourbières minérotrophes et ombrotrophes vis-à-vis du rôle hydrologique

Duranel (2015) met en avant le rôle très important des apports souterrains pour la tourbière minérotrophe des Dauges (Massif Central). Une modélisation numérique des interactions entre la nappe d'arène granitique et la tourbière a été mise en œuvre. Elle a été calibrée à partir d'un suivi hydrologique pluriannuel. Ce travail montre qu'en moyenne, 92% des apports de la tourbières sont issus des eaux souterraines (formations d'altération du granite). Ces apports latéraux en eaux souterraines « *constituent une part quantitativement importante et fonctionnellement essentielle de la balance hydrique de la zone humide* ». Duranel (2015) souligne « *l'importance d'une meilleure caractérisation des formations d'altération du granite dans tout le bassin versant pour la compréhension et la modélisation du fonctionnement hydrologique de ce type de zone humide* ».

Ainsi, pour les tourbières minérotrophes (Figure 42), cette proximité des aquifères amène à s'interroger sur le rôle hydrologique réel de la zone humide :

- *Est-elle un simple relais de la nappe en relation sans en modifier la signature hydrologique ?* La tourbière n'aurait alors aucun rôle, seule la nappe d'accompagnement serait responsable du stockage et de la restitution. Le débit d'exutoire et les variations de niveaux dans la tourbière ne seraient que le reflet du signal de la nappe.
- *Joue-t-elle un rôle hydrologique qui se surajoute à celui des nappes en relation ?* Ce cas s'apparenterait à la vidange de ces nappes en relation (quelle que soit leur nature) dans la nappe constituée par la tourbière (essentiellement l'acrotelme). Le débit à l'exutoire intègre le stockage lié à la zone humide et celui lié à la nappe en relation. Les contrastes des conductivités hydrauliques et des coefficients d'emménagement ainsi que les gradients hydrauliques régleraient alors les conditions d'échanges entre ces nappes.
- *Limite-t-elle la vidange de la nappe du fait du fort contraste de perméabilité à l'interface nappe/acrotelme (effet de bouchon/verrou) et d'une cote altimétrique de débordement haute (qui correspond grossièrement au niveau de seuil d'exutoire de la zone humide) ?* Une situation sans zone humide (ou à défaut sans seuil d'exutoire) supposerait une cote d'émergence de la nappe plus basse et probablement un drainage favorisé et donc plus rapide. Le rôle sur la modification des écoulements de cette position particulière qu'ont les tourbières basses dans les bassins versants avait été souligné par Porteret (2007) pour la tourbière de la Prenarde (42), « *de par ses caractéristiques hydrauliques (faible vitesse de circulation de l'eau dans la tourbe) et sa position en fond de vallon, la tourbière de la Prenarde constitue un véritable verrou. En freinant les écoulements de la nappe contenue dans les arènes, elle permet le maintien d'un niveau d'eau constant à la base du versant* ». L'auteur note également que « *la description de ce phénomène et la quantification de l'impact de la tourbière doivent encore être affinées* ».

Il va de soi que pour les tourbières purement ombrotrophes (Figure 42), le débit d'exutoire correspond directement à la transformation du signal des précipitations à travers la tourbière. Autrement dit, l'analyse de la relation entre les précipitations et les débits à l'exutoire de la tourbière (décomposition de

l'hydrogramme) revient à caractériser directement les différentes composantes de l'écoulement (de crue, rapide et lent) ce qui permet de statuer plus aisément sur le rôle de stockage et sur le soutien d'étiage.

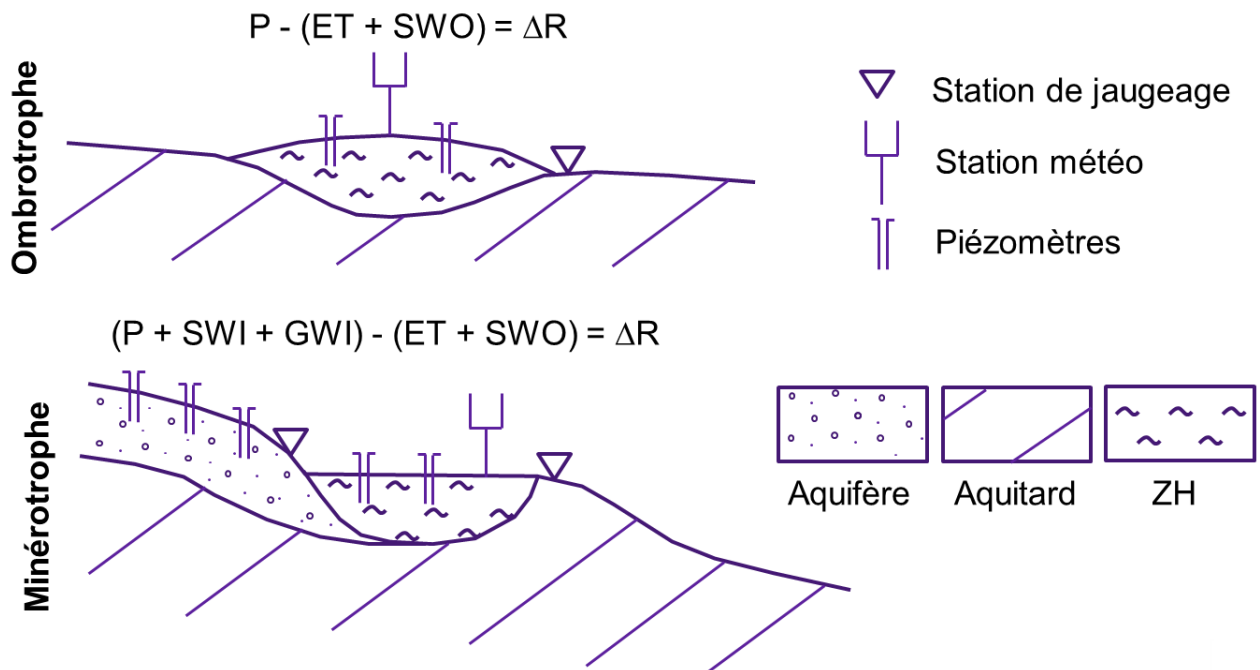


Figure 42 : Schéma simplifié de deux configurations de zones humides (ombrotrophe et minérotrophe) et de l'instrumentation qu'elles imposent pour un suivi hydrologique (bilan hydrologique)

→ Une des conditions indispensable au développement et à la pérennité des zones humides tourbeuses est le maintien de niveaux saturés hauts qui supposent une alimentation en eau abondante et régulière toute l'année. Ces niveaux doivent être maintenus hauts afin de se prémunir de leur désaturation en eau et du stress hydrique de la végétation (prélèvement d'eau directement dans la nappe) mais aussi afin de limiter la décomposition de la matière organique par oxydation. La vulnérabilité par rapport au manque d'eau se traduit différemment suivant le type de zones humides tourbeuses (ombrotrophe/minérotrophe).

Pour les tourbières minérotrophes, l'alimentation est essentiellement assurée par des apports souterrains latéraux (nappe). Ces tourbières sont donc très dépendantes de l'état hydrique des nappes. Un déficit de recharge de ces nappes pendant la période humide pourra potentiellement avoir des conséquences sur leurs capacités à maintenir les niveaux d'eau dans la zone humide pendant la période sèche.

Pour les tourbières ombrotrophes, l'alimentation en eau est assurée par les précipitations au droit de la zone humide. Ainsi, les précipitations doivent être assez régulières au cours de l'année pour éviter des assecs trop prolongés qui menaceraient l'intégrité du milieu (décomposition accélérée par oxydation et minéralisation de la matière organique).

○ Séparation des contributions pour isoler le rôle propre de la zone humide

Pour un cours d'eau quelconque, l'étude du tarissement jusqu'à l'étiage est assez bien documentée. On peut notamment citer les travaux de thèse de Lang (2007) qui s'attache à la définition statistique précise des débits d'étiage (grandeurs de l'étiage : QMNA, VCN10, débit modal, etc.), à la caractérisation statistique des chroniques de pluies qui mènent à une situation d'étiage, à une analyse des lois de tarissement et de séparation d'hydrogramme pour identifier les différents apports souterrains, mais aussi à formuler des préconisations pour la modélisation hydrologique (Annexe 9) pour une meilleure prise en compte et compréhension de l'étiage. Les difficultés principales de ces travaux résident notamment dans l'identification de périodes non influencées par les précipitations (notamment en

régime océanique) et la séparation des différentes contributions souterraines qui ont des dynamiques propres (coefficients de tarissements) qui se superposent sur l'hydrogramme.

Ces problèmes sont analogues au cas d'un cours d'eau connecté à une zone humide. En effet, comme il a été vu précédemment, le débit mesuré à l'exutoire n'est pas nécessairement le reflet direct et exclusif du rôle hydrologique de la zone humide (sauf pour une tourbière ombrotrophe). Le cours d'eau peut collecter à la fois les eaux souterraines d'une nappe d'accompagnement et également les eaux d'un bassin versant amont. Cette séparation des contributions constitue un enjeu majeur pour traiter des cas de minérotrophie qui concernent une très large majorité des tourbières en France.

○ **Références objectives pour caractériser la qualité du soutien d'étiage**

L'une des difficultés qui peut expliquer la diversité des résultats et des interprétations est le manque de références objectives pour juger de l'importance ou non (qualité) du soutien d'étiage des tourbières. En effet, pour pouvoir statuer sur la qualité du soutien d'étiage il est nécessaire de définir des classes (ex : très bon, bon, moyen, faible, très faible, négligeable, négatif) et des valeurs quantitatives pour lesquelles on passe d'une classe à une autre. La création de ces classes doit se baser sur des comparaisons selon des critères objectifs. Ces comparaisons peuvent se faire :

- Par rapport à l'influence des propriétés hydrodynamiques (K, S) du matériau poreux sur la dynamique du tarissement (coefficients et courbes de tarissement) pour une période dépourvue de précipitations. Il s'agit de comparer la situation de la tourbe (acrotelme) par rapport à des textures minérales poreuses (ex : graviers, sables grossiers, sables moyens, sables fins, limons, argiles) classiquement décrites et reconnues en hydrogéologie.
- Par rapport à des bassins versants avec ou sans zones humides. Il s'agit de confronter deux bassins versants dont la géographie physique (contextes géologique, hydrologique, climatique, morphologique...) est analogue ou proche mais où l'un est dépourvu de zones humides tandis que l'autre en contient (Martin et al., 2007 ; Porteret, 2011).
- Par rapport à la demande en eau du couvert végétal. Il s'agit de comparer différents couverts végétaux plus ou moins gourmands en eau (ex : forêt, prairie, surface libre, végétation de zones humides...) en considérant que pour les zones humides tourbeuses, le prélèvement d'eau se fait directement dans la nappe, le réservoir constitué par le sol étant absent.

○ **Diversité des zones humides tourbeuses et conditions de généralisation des résultats**

Les conditions de mise en place de la turfigenèse¹⁶ et du maintien dans le temps d'une zone humide résultent de la « *combinaison de facteurs climatiques, morphostructuraux, géomorphologiques, hydrologiques et anthropiques* » (Cubizolle et al., 2013). Cette combinaison de facteurs varie d'un site à l'autre, conférant aux zones humides une singularité propre. Cette grande diversité de tourbières est probablement en partie à l'origine des divergences de résultats que l'on peut trouver dans la littérature pour ce qui concerne le rôle hydrologique. À propos des tourbières du Massif Central, Porteret (2011) relève que « *situées aux marges méridionales de leur aire optimale de développement dans l'hémisphère nord* », elles correspondent à « *des contextes climatiques et géomorphologiques très différents des sites étudiés dans la littérature anglo-saxonne* ».

Comme il a été vu précédemment, l'hétérogénéité des méthodes pour caractériser le rôle de stockage et de restitution peut également nuire à la comparaison entre sites. Dès lors, se pose la question de la pertinence de la généralisation des résultats obtenus dans d'autres pays et pour d'autres contextes. *Le rôle hydrologique est-il spécifique à chaque zone humide ?* Auquel cas, il serait nécessaire de réaliser une étude sur chacun des sites rencontrés. *Quels traits communs peut-on identifier d'un site à l'autre et quels enseignements peut-on tirer sur la généralisation du rôle hydrologique ?* Il serait alors intéressant de hiérarchiser les caractères spécifiques qui sont prépondérants concernant le rôle de soutien étiage.

¹⁶ Production de tourbe par la végétation dite alors turfigène (voir Tableau 11, p27)

3. Méthodes d'investigation et de mesures

L'étude du rôle de stockage et de restitution d'une zone humide nécessite un suivi hydrologique de l'ensemble des flux entrants (SWI, GWI, P) et des flux sortants (SWO, GWO et ET) ainsi que des variations de stock au cours d'un ou plusieurs cycles hydrologiques. Les paramètres et variables à mesurer sont présentés dans la liste ci-dessous. Le design de l'instrumentation et des modèles qui sera mis en œuvre en phase 2 doit répondre aux principales questions soulevées dans la section précédente de cette partie (Partie II.2).

3.1. Design de l'instrumentation, des mesures et des modèles déterministes

Les tableaux suivants résument les points essentiels pour l'élaboration du design de l'instrumentation, des mesures et des modèles déterministes. La mesure ou l'estimation de variables et de paramètres importants nécessaires pour la quantification du soutien d'étiage s'appuie sur une méthodologie interdisciplinaire (Tableau 25). La mise en œuvre de modèles déterministes s'appuie sur des solutions analytiques et numériques. Les objectifs du travail de modélisation vise à : 1) créer des classes de référence pour le soutien d'étiage ; 2) travailler sur des scénarios de modélisation tenant compte du contexte territoriale de la zone humide ; 3) tester la sensibilité de paramètres d'importance (Tableau 26).

Paramètres et variables de la zone humide à mesurer	Méthodes
Flux entrants/sortants	- Suivi hydrologique (station de jaugeage des flux d'eaux superficiels entrants et sortants) - Suivi météorologique (station météo, P et ETP) - Suivi hydrogéologique des aquifères bordant la zone humide et de la zone humide elle-même (piézomètres le long de transects pour déterminer les sens d'écoulement et l'intensité des gradients et les évolutions de niveaux de nappe dans le temps en relation avec ceux de la zone humide)
Propriétés hydrodynamiques	- Pédologie (carottage pour caractérisation qualitative des horizons constitutifs de la zone humide) - Caractérisation hydrogéologique (essais d'infiltration)
Géométrie	- Géophysique (interface zone humide/encaissant) - Pédologie (continuité horizontale des horizons constitutifs de la zone humide) - Cartographie (délimitation de la surface de la zone humide et topographie de surface)
Variation de stock	- Suivi hydrogéologique (réseaux de piézomètres)
Origine de l'alimentation (précipitations, eaux superficielles et eaux souterraines)	- Biologie (origine rhéotrophe, ombrotrophe ou minérotrophe de l'alimentation) - Géochimie (discrimination eaux superficielles, eaux souterraines, précipitations) - Thermie (contrastes de températures entre eaux souterraines et eaux superficielles)

Tableau 25 : Design de l'instrumentation et des mesures

Types de modèle	Objectifs de modélisation
Solutions analytiques	- Création de classes et de références pour statuer sur la qualité du soutien d'étiage des ZH (coefficient de tarissement, K, S, etc.)
Solutions numériques	- Création et mise en œuvre de scénarios de modélisation balayant différentes configurations de zones humides (géomorphologiques, typologies minérotrophe/ombrotrophe, présence ou absence de tourbière, etc.) pour en évaluer l'influence sur le soutien d'étiage - Test de sensibilité des paramètres (K, S, épaisseur acrotelme, hauteur de l'exutoire, pente, ETP, précipitations, etc.)

Tableau 26 : Design des modèles déterministes

À partir des éléments présentés dans les deux tableaux précédents, nous avons réalisé une recherche bibliographique non exhaustive dont les références identifiées (présentées ci-après) n'ont pas encore été étudiées de manière approfondie en phase 1. Ces références bibliographiques sont relatives à différentes méthodes d'investigation (ex : suivi hydrologique, caractérisation biologique, géochimique, pédologique, cartographique...). Le protocole définitif (instrumentation et mesures de terrain, acquisition de données) ainsi que l'ensemble des méthodes (analyse des données) seront décrits précisément dans la phase 2. Les références les plus pertinentes sont listées ci-après et ordonnées de manière thématique.

3.2. Flux entrants/sortants, variation de stock et origine de l'alimentation des zones humides

3.2.1. Fonctionnement hydrologique des zones humides

Acreman M., Holden J., 2013. How wetlands affect floods. *Wetlands*, 33 (5). 773-786. 10.1007/s13157-013-0473-2, 44p.

Bragg, O.M., 2002. Hydrology of peat-forming wetlands in Scotland. *Sci. Total Environ.* 294, 111–129.

BURGEAP, 2010. Étang des loups à Brénod (01) Étude du fonctionnement hydrologique. Rapport final à l'attention du et CREN Rhône-Alpes, 48p.

BURGEAP, 2012. Tourbière du lac de Chailloux : Expertise du fonctionnement hydrologique. Rapport provisoire à l'attention du et CREN Rhône-Alpes, 60p.

Demissie M., Khan A., 1993. Influence of wetlands on streamflow in Illinois. Contract report 561 prepared for the Illinois Department of Conservation. ISSN 0733-3927, 57p.

Juliano K., Simonovic S. P., 1999. The impact of wetlands on flood control in the red river valley of Manitoba. Final Report to International Joint Commission, 75p.

Labadz J., Allott T., Evans M., Butcher D., Billett M., Stainer S., Yallop A., Jones P., Innerdale M., Harmon N., Maher K., Bradbury R., Mount D., O'Brien H. & Hart R. 2010. Peatland Hydrology. Draft Scientific Review commissioned by the IUCN UK Peatland Programmes Commission of Inquiry on Peatlands. 52p.

Maréchal J., 2016. Étude préalable à une meilleure connaissance du fonctionnement hydrologique des zones humides du Plateau des Bornes. Rapport de stage – ENS2, Bordeaux INP ENSEIGID et Asters CEN Haute-Savoie, 111p.

Martin C., Didon-Lescot J.-F., 2007. Influence d'une tourbière de moyenne montagne sur les écoulements : le cas de la tourbière des Sagnes sur le Mont-Lozère. *Études de géographie physique* 34 : 27-41.

Martin C., Dugueperoux F., Didon-Lescot J.-F., 2008. Fonctionnement hydrologique d'une tourbière drainée: la plaine de la Sénégrière (Lozère). *Études de géographie physique* 35 : 3-23.

Oberlin G. 2000. Le contrôle des crues. In : Fonctions et valeurs des zones humides (FUSTEC E., LEFEUVRE J.C. et coll.), Édit. DUNOD, Paris, p. 83-105.

Porteret J., 2008. Fonctionnement hydrologique des têtes de bassin versant tourbeuses du Nord-Est du Massif central. Thèse de doctorat, Université de Saint-Etienne, 413p.

Price J. S., 2001. L'hydrologie (Chapitre 5), dans *Écologie des tourbières du Québec-Labrador* - Presses Université Laval, 621p.

Price J. S., Branfireun B. A., Waddington J. M., Devito K. J., 2005. Advances in Canadian wetland hydrology, 1999–2003. *Hydrol. Process.* 19, 201–214 (2005) DOI: 10.1002/hyp.5774, 14p.

Richardson J.L., Arndt J.L., Montgomery J.A., 2001. Hydrology of wetland and related soils. In *Wetland soils - Genesis, hydrology, landscapes, and classification* (eds J.L. Richardson & M.J. Vepraskas), pp. 35–84. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.

Siegel D.I., Glaser, P., 2006. The hydrology of peatlands. In *Boreal peatland ecosystems Ecological Studies*. (eds R.K. Wieder & D.H. Vitt), pp. 289–311. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany.

U.S. EPA, 2015. Connectivity of streams & wetlands to downstream waters : A review & synthesis of a scientific evidence. Report EPA/600/R-14/475F, Office of Research and development, NCEA, NERL,

NHEERL, 408p.

Wastiaux C. 2000. Facteurs hydrologiques de la dégradation des tourbières hautes à sphaignes (Hautes-Fagnes, Belgique). Thèse de doctorat en Sciences géographiques, Université de Liège, 223 p.

3.2.2. Stockage et bilan hydrologique des zones humides

Asp K., 2009. *Water Storage Capacity and Flow Dynamics in a Papyrus Wetland, Uganda*. – *Implications for Studies of Water Treatment Effects*. Degree project work in environmental science. University of Kalmar School of Pure and Applied Natural Sciences, 36p.

Daniels W. L., Cummings A., Schmidt M., Fomchenko N., Speiran G., Focazio M., Fitch G. M., 2000. *Evaluation of methods to calculate a wetlands water balance*. Virginia Tech Department of Crop and Soil Environmental Sciences and Virginia Transportation Research Council, 70p.

Gleason R. A., Tangen B. A., Laubhan M. K., Kermes K. E., Euliss Jr., Ned H., 2007. *Estimating Water Storage Capacity of Existing and Potentially Restorable Wetland Depressions in a Subbasin of the Red River of the North*. USGS Northern Prairie Wildlife Research Center. Paper 89, 45p.

Krasnostein A. L., Oldman C. E., 2004. *Predicting wetland water storage*. Water Resources Research, Vol. 40, W10203, Doi:10.1029/2003wr002899, 12p.

Minke A. G., Westbrook C. J. Van Der Kamp G., 2010. *Simplified Volume-Area-Depth Method for Estimating Water Storage of Prairie Potholes*. Wetlands (2010) 30:541–551 DOI 10.1007/s13157-010-0044-8, 11p.

Niering W., Novitzki R., 1987. *Wetland Hydrology*. Proceedings of the National Wetland Symposium, Chicago Illinois, 346p.

Porteret J., 2010. *Capacité de stockage de l'eau et rôle des tourbières basses minérotrophes dans le fonctionnement des têtes de bassin versant*. Coll. Tourbières, Ann. Sci. Rés. Bios. Trans. Vosges du Nord-Pfälzerwald — 15 (2009-2010) : 207 – 229, 23p.

Riddell E. S., Everson C., Clulow A., Mengistu M., 2013. *The hydrological characterisation and water budget of a South African rehabilitated headwater wetland system*. <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v37i4.18>, 10p.

Shantz M. A., Price J. S., 2006. *Characterization of surface storage and runoff patterns following peatland restoration, Quebec, Canada*. Hydrol. Process. 20, 3799–3814 (2006) DOI: 10.1002/hyp.6140, 16p.

Skalbeck, J.D., Reed, D.M., Hunt, R.J., Lambert, J.D., 2009. *Relating groundwater to seasonal wetlands in southeastern Wisconsin, USA*. Hydrogeol. J. 17, 215–228.

Wastiaux C., 2008. *Les tourbières sont-elles des éponges régularisant l'écoulement ?*. Bulletin de la Société géographique de Liège, 50, 2008, 57-66, 10p.

Zukowski J., Bennett R., Beaver C., Hervieux J-Ph., MacLaine J., 2015. *Quantifying the Wetland Water Storage Potential of the Eastern Slopes in Alberta, Canada*. Environmental Science 502, 31p.

3.2.3. Caractérisation biologique et thermique de l'origine de l'alimentation des zones humides

Amoros C., Bornette G., Henry C. P., 2000. A Vegetation-Based Method for Ecological Diagnosis of Riverine Wetlands. Environmental Management Vol. 25, No. 2, pp. 211–227, 17p.

Dehédin A., 2012. Changements globaux et assèchement des zones humides fluviales : conséquences sur les processus biogéochimiques et les communautés d'invertébrés. Thèse de doctorat soutenue à l'Université de Lyon, 256p.

Guyonneau J., 2005. Étude de la végétation et de l'hydrologie du marais des Levresses, réserve naturelle régionale des tourbières de Frasne. Les nouvelles archives de la flore jurassienne, 3, 2005 – Société Botanique de Franche-Comté, 51p.

House R., Sorensen J. P. R., Gooddy D. C., Newell A. J., Marchand B., Mountford J. O., Scarlett P., Williams P. J., Old G. H., 2015. Discrete wetland groundwater discharges revealed with a three-dimensional temperature model and botanical indicators (Boxford, UK). *Hydrogeology Journal* (2015) 23: 775–787, DOI 10.1007/s10040-015-1242-5.

Price J. S., Waddington J. M., 2000. Advances in Canadian wetland hydrology and biogeochemistry. *Hydrol. Process.* 14, 1579 – 1589, 11p.

Spicuzza-Mocellin H., 2010. L'apport de l'étude des diatomées aux diagnostics écologique et hydrologique de la tourbière de Gimel (Pilat, Loire). Mémoire de Master 1 écologie et éthologie, Université Jean Monnet, 87p

Wheeler B.D., Shaw S., Tanner K., 2009. A wetland framework for impact assessment at statutory sites in England and Wales. Science report, SC030232, Environment Agency, Bristol, UK.

3.2.4. Instrumentation et suivi hydrologique d'une zone humide

Anibas C., Verbeiren B., Buis K., Chormanski J., De Doncker L., Okruszko T., Meire P., Batelaan O. 2012. *A hierarchical approach on groundwater-surface water interaction in wetlands along the upper Biebrza River, Poland*. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 2329–2346, 2012. DOI:10.5194/hess-16-2329-2012, 18p.

Finlayson C. M., Davidson N. C., Stevenson N. J., 1998. *Wetland inventory, assessment and monitoring — practical techniques and identification of major issues: Summary*. Proceedings of Workshop 4 2nd International Conference on Wetlands and Development, Dakar, Senegal, 8–14 November 1998, 7p.

Gichuki N. N., Oyieke H. A., Ndiritu G. G., 1998. *Assessment and monitoring of wetlands for conservation and development in dry lands: A case study of Kajiado District, Kenya*. Proceedings of Workshop 4 2nd International Conference on Wetlands and Development, Dakar, Senegal, 8–14 November 1998, 15p.

Hunt R. J., Krabbenhoft D. P., 1996. *Groundwater inflow measurements in wetland systems*. *Water Resources Research*, vol. 32, no. 3, pages 495-507, 13p.

Minnesota Board of Water & Soil Resources, 2013. *Hydrologic Monitoring of Wetlands*. Rapport technique, 45p.

Noble C., 2006. *Water Table Monitoring Project Design*. Technical Notes Collection, ERDC TN-WRAP-06-02. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

Porteret J., 2014. *La connaissance de l'hydrologie pour la gestion des zones humides*. Cahiers techniques du CEN Rhône-Alpes, 24p.

Saynor M. J., Finlayson C. M., Eliot I., Spiers A., 1998. *Monitoring coastal wetlands in a highly dynamic tropical environment*. Proceedings of Workshop 4 2nd International Conference on Wetlands and Development, Dakar, Senegal, 8–14 November 1998, 9p.

Sprecher S. W., 2000. *Installing Monitoring Wells/Piezometers in Wetlands*. Technical Notes Collection, ERDC TN-WRAP-00-02. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

Sprecher S.W., 2008. *Installing monitoring wells in soils (Version 1.0)*. National Soil Survey Center, Natural Resources Conservation Service, USDA, Lincoln, NE.

U.S. Army Corps of Engineers, 2005. *Technical standard for water-table monitoring of potential wetland sites*. Technical Notes Collection, ERDC TN-WRAP-05-2. U. S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

U.S. EPA. 2002. *Methods for Evaluating Wetland Condition: #20 Wetland Hydrology*. Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA-822-R-02-014

UK Environment Agency, 2003. A guide to Monitoring Water Levels and Flows at Wetlands Sites. Rapport technique, 32p.

Weng P., Coudrain-Ribstein A., Kao C., Bendjoudi H., De Marsily G., 1999. *Mise en évidence de fortes circulations verticales temporaires entre zones humides et aquifères alluviaux et régionaux*. C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes / Earth & Planetary Sciences 1999 329,257-263, 7p.

3.2.5. Évapotranspiration des zones humides

Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. FAO irrigation and drainage paper, 56, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.

Drexler J.Z., Snyder R.L., Spano D., Paw U., Tha K., 2004. *A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration*. Hydrological Processes, 18, 2071–2101.

Eggelsmann R., Heathwaite A.L., Grosse-Brauckmann G., Kuster E., Naucke W., Schuch M., Schweick V. 1993. *Physical processes and properties of mires*. In Mires: process, exploitation, and conservation (eds A.L. Heathwaite & K. Göttlich), pp. 171–262. Wiley, Chichester, UK.

Gilman K., 2002. *A review of evapotranspiration rates of plant communities on mires and their catchments, with particular reference to Cors y Llyn NNR*. CCW Contract Science Report, 504, Countryside Council for Wales, Bangor, UK.

Holden J., 2006. *Peatland hydrology*. In Peatlands: Evolution and records of environmental and climate changes (eds I.P. Martini, A. Martinez Cortizas & W. Chesworth), pp. 319–346. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.

Kim J., Verma S.B., 1996. *Surface exchange of water vapour between an open Sphagnum fen and the atmosphere*. Boundary-Layer Meteorology, 79, 243–264.

Lott, R.B., Hunt, R.J., 2001. *Estimating evapotranspiration in natural and constructed wetlands*. Wetlands 21, 614–628.

Schouwenaars J.M., 1993. *Hydrological differences between bogs and bog-relicts and consequences for bog restoration*. Hydrobiologia, 265, 217–224.

Wastiaux C., 2000. *Facteurs hydrologiques de la dégradation des tourbières hautes à sphaignes des Hautes-Fagnes*. Thèse de Doctorat, Université de Liège, Liège, Belgique.

3.2.6. Méthodes géochimiques appliquées aux zones humides

Brenot A., Négrel P., Millot R., Bertin C., 2014. *Using ion and isotope characterization to design a frame of protection of a wetland system (Massif Central, France)*. Applied Geochemistry 40 (2014) 104–118, 15p.

Clay, A., Bradley, C., Gerrard, A.J., Leng, M.J., 2004. *Using stable isotopes of water to infer wetland hydrological dynamics*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 8, 1164–1173.

Cubizolle, H., Bonnel, P., Oberlin, C., Tourman, A., Porteret, J., 2007. *Advantages and limits of radiocarbon dating applied to peat inception during the end of the late glacial and the Holocene: the example of mires in the eastern Massif Central (France)*. Quaternaire 18, 187–206.

Gourcy L., Brenot A., 2015. *Multiple environmental tracers for a better understanding of water flux in a wetland area (La Bassée, France)*. Applied Geochemistry DOI: 10.1016/j.apgeochem.2011.07.012

Hogan, J.F., Blum, J.D., Siegel, D.I., Glaser, P.H., 2000. *⁸⁷Sr/⁸⁶Sr as a tracer of groundwater discharge and precipitation recharge in the Glacial Lake Agassiz Peat lands, northern Minnesota*. Water Resour. Res. 36, 3701–3710.

Maréchal J-C., Braun J-J., Riotte J., Bedimo Bedimo J-P., Boeglin J-L., 2011. *Hydrological processes of a rainforest headwater swamp from natural chemical tracing in Nsimi watershed, Cameroon*. Hydrol. Process. 25, 2246–2260, 15p.

Matheney, R.K., Gerla, P.J., 1996. *Environmental isotopic evidence for the origins of ground and surface water in a prairie discharge wetland*. Wetlands 16, 109–120.

Négrel P., Millot R., Brenot A., Bertin C., 2010. *Lithium isotopes as tracers of groundwater circulation in a peat land*. Chemical Geology 276 (2010) 119–127, 9p.

Shotyk, W., 1988. *Review of the inorganic geochemistry of peats and peat land waters*. Earth Sci. Rev. 25, 95–176.

Sikdar, P.K., Sahu, P., 2009. *Understanding wetland sub-surface hydrology using geologic and isotopic signatures*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 13, 1313–1323.

3.3. Propriétés hydrodynamiques et géométrie des zones humides

3.3.1. Méthodes géophysiques appliquées aux zones humides

Desplanque C., Garambois S., 2010. *Caractérisation de la paléotopographie de la tourbière ombrotrophe du Luitel au moyen de méthodes géophysiques*. Coll. Tourbières, Ann. Sci. Rés. Bios. Trans. Vosges du Nord-Pfälzerwald — 15 (2009-2010) : 305 – 315, 11p.

Duranel A., 2016. *Hydrologie et modélisation hydrologique des tourbières acides du Massif Central (France)*. Thèse de doctorat soutenue à l'Université de Saint-Etienne, 535p.

Hydrophy, 2014. Marais de Névache (05) Étude Hydrogéophysique. Rapport à la demande et pour le compte du Conseil Général des Hautes Alpes, 55p.

Wastiaux C., Halleux L., Schumacker R., Streel M., Jacqmotte J-M., 2000. *Development of Hautes-Fagnes peat bogs (Belgium) : new perspectives using ground-penetrating radar*. Finnish Peatland Society – Helsinki 2000, 6p.

3.3.2. Pédologie et propriétés hydrodynamiques des zones humides

Baird, A.J., 1995. *Hydrological investigations of soil water and groundwater processes in wetlands*. In: Hugues, J., Heathwaite, A.L. (Eds.), *Hydrology and Hydrochemistry of British Wetlands*. Wiley, Chichester, pp. 111–129.

Duhaut C-B. 2012. *Atelier Identification des Zones humides sur critères pédologiques*. AESN

Duranel A., 2016. *Hydrologie et modélisation hydrologique des tourbières acides du Massif Central (France)*. Thèse de doctorat soutenue à l'Université de Saint-Etienne, 535p.

Porteret J., 2014. *La connaissance de l'hydrologie pour la gestion des zones humides*. Cahiers techniques du CEN Rhône-Alpes, 24p.

Quinton W. L., Hayashi M., *The flow and storage of water in the wetland-dominated central mackenzie river basin: recent advances and future directions*. Prediction in Ungauged Basins: Approaches for Canada's Cold Regions

Von Post L., 1922. *Swedish geological peat survey with the results obtained so far*. Svenska Mosskulturföreningens tidskrift, 36, 1–27.

3.3.3. Cartographie et télédétection appliquées aux zones humides

Cubizolle H., Etlicher B., Porteret J., 2013. Modélisation de la répartition géographique des tourbières à partir des données géologiques, topographiques et géomorphologiques : application au Massif central oriental (France). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 19 - n° 2 | 2013, 9p.

Gabrielsen C. G., Murphy M. A., Evans J. S., 2016. Using a multiscale, probabilistic approach to identify spatial-temporal wetland gradients. *Remote Sensing of Environment* 184 (2016) 522–538, 17p.

Lane C. R., D'Amico E., 2010. Calculating the Ecosystem Service of Water Storage in Isolated Wetlands using LiDAR in North Central Florida, USA. *Wetlands* (2010) 30:967–977, DOI 10.1007/s13157-010-0085-z, 11p.

Mazagol P-O., Martin R., Porteret J., Thyriot C., Etlicher B., 2008. Prédétermination de zones humides sur le bassin Loire-Bretagne. SIG 2008 : Conférence francophones ESRI, Oct 2008, Versailles, France. 20p.

Montreuil O., 2008. Relation entre l'ordre des bassins versants, l'organisation spatiale et le fonctionnement hydrologique et hydrochimique des zones humides riveraines. Thèse de doctorat soutenue à l'Ecole nationale supérieure d'agronomie de Rennes, 75p.

Rapinel S., 2012. Contribution de la télédétection à l'évaluation des fonctions des zones humides : de l'observation à la modélisation prospective. Thèse de doctorat soutenue à l'Université de Rennes, 385p.

Töyrä J., Pietroniro A., Martz L. W., Prowse T. D., 2002. A multi-sensor approach to wetland flood monitoring. *Hydrol. Process.* 16, 1569–1581 (2002), DOI: 10.1002/hyp.1021, 13p.

Wastiaux C., Schumacker R., 2002. Topographie de surface et de subsurface des zones tourbeuses des réserves naturelles domaniales des Hautes-Fagnes. Rapport de synthèse pour le compte du Conseil de l'Europe, 128p.

3.4. Traitements et analyses des données hydrologiques

3.4.1. Modélisation des zones humides

Duranel A., 2016. *Hydrologie et modélisation hydrologique des tourbières acides du Massif Central (France)*. Thèse de doctorat soutenue à l'Université de Saint-Etienne, 535p.

Golden H. E., Lan C. R., Amatya D. M., Bandilla K. W., Kiperwas H. R., Knightes C. D., Ssegane H., 2014. *Hydrologic connectivity between geographically isolated wetlands and surface water systems: A review of select modeling methods*. *Environmental Modelling & Software* 53 (2014) 190-206, 17p.

Grapes T. R., Bradley C., Petts G. E., 2006. *Hydrodynamics of floodplain wetlands in a chalk catchment: The River Lambourn, UK*. *Journal of Hydrology* 320 (2006) 324–341, 18p.

Kadlec R. H., 2000. *The inadequacy of first-order treatment wetland models*. *Ecological Engineering* 15 (2000) 105–119, 15p.

Kennedy G. W., Price J. S., 2005. *A conceptual model of volume-change controls on the hydrology of cutover peats*. *Journal of Hydrology* 302 (2005) 13–27, 15p.

Krasnostein A. L., Oldman C. E., 2004. *Predicting wetland water storage*. *Water Resources Research*, Vol. 40, W10203, Doi:10.1029/2003wr002899, 12p.

Mansell R. S., Bloom S. A., Sun G., 2000. *A model for wetland hydrology description and validation*. *Soil Science* 0038-075C/OO/16505-384-397, 14p.

3.4.2. Solutions analytiques

Boussinesq, J., 1877. Essai sur la théorie des eaux courantes du mouvement non permanent des eaux souterraines. Acad. Sci. Inst. Fr. 23, 252–260.

Boussinesq, J., 1903. Sur un mode simple d'écoulement des nappes d'eau d'infiltration à lit horizontal, avec rebord vertical tout autour lorsqu'une partie de ce rebord est enlevée depuis la surface jusqu'au fond. C. R. Acad. Sci. 137, 5–11.

Boussinesq, J., 1904. Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources, J. Math. Pure Appl., 10, 5-78.

Dewandel B., Lachassagne P., Bakalowicz M., Weng Ph., Al-Malki A. 2002. Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs, Application to the Oman ophiolite hardrock aquifer, Journal of hydrology, 274, 248-269.

3.4.3. Séparation des contributions

Chapman T.G., Maxwell A., 1996. Baseflow separation – comparison of numerical methods with tracer experiments. Institute Engineers Australia National Conference. Publ. 96/05, 539-545.

Coutagne, A., 1948. Météorologie et hydrologie - Etude générale des débits et des facteurs qui les conditionnent, La Houille Blanche, 3, 228-245, doi:10.1051/lhb/1948035.

Eckhardt, K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation, Hydrol.Process., 19(2), 507-515, doi:10.1002/hyp.5675.

Gustard A., Demuth S., 2008. Manual on Low-Flow Estimation and Prediction, Operational Hydrology Report n°50 - WMO n°1029.

Lang C., 2007. Étiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. Université de Metz, 375p.

Maillet E., 1905. Essais d'hydraulique souterraine et fluviale, pp. 218, Librairie Sci., A. Hermann, Paris. ISBN-13: 978-1161872910

Mangin, A., 1970. Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrues et tarissement, Annale de spéléologie 25(3), 581-610.

Tison, G., 1960. Courbe de tarissement, coefficient d'écoulement et perméabilité du bassin. Mém. IAHS, Helsinki, 229–243.

PARTIE III

—

Synthèse bibliographique et enseignements

Cette synthèse est organisée en deux grandes parties. La première reprend les éléments importants et acquis du travail bibliographique présentés dans les Parties I et II de ce rapport. La dernière partie vise à enrichir cette synthèse à l'aide d'éléments issus des échanges avec les partenaires et personnes impliquées dans le projet ZHTB (Annexe 5) lors de réunions et/ou de visites de terrain (Annexe 3). Par ailleurs, le support de présentation type utilisé lors de ces réunions et le poster de présentation du projet sont disponibles respectivement en Annexe 7 et en Annexe 6.

1. Synthèse partie I : définitions et typologies

1.1. Définitions des zones humides : des entités plurielles et polymorphes en interaction avec l'hydrosystème

Les définitions identifiées mettent en lumière la forte diversité de milieux humides et leur forte potentialité biologique (réservoir de biodiversité). Elles soulignent qu'il n'est pas forcément simple de définir, d'identifier, de délimiter et de caractériser ces milieux selon le point de vue adopté : « *scientifique, gestionnaire, juriste ou politique* ». La France, par exemple, distingue milieux humides et zones humides pour éviter la confusion entre le zonage lié aux conventions internationales et celui lié au droit français.

La présence et le maintien des zones humides sont fortement influencés par les contextes climatiques, hydrographiques et géomorphologiques. La présence d'eau permanente ou temporaire est un facteur prépondérant. Les zones humides ne sont pas des entités isolées. Elles sont en lien hydraulique avec d'autres entités de l'hydrosystème (ex : cours d'eau, nappes, réseaux de zones humides, zones hydrographiques, ...). Ainsi, les zones humides peuvent : 1) être alimentées par les cours d'eau et des arrivées d'eau souterraine et/ou 2) participer au soutien du débit des cours d'eau à l'étiage ou à la recharge des aquifères.

La notion d'étiage liée principalement au cours d'eau, mais aussi aux nappes d'eaux souterraines, est fondée sur l'analyse des fréquences des faibles débits. L'origine de la notion de soutien d'étiage est associée à l'origine à la gestion des ouvrages hydrauliques. Elle est utilisée par analogie pour les zones humides qui peuvent assurer des fonctions de stockage/déstockage d'eau, mais aussi de prévention des inondations et d'épuration des eaux.

Les têtes de bassins versants sont des entités difficiles à cartographier précisément, notamment à l'échelle fine. En effet, les têtes de bassins versants couvrent de fortes emprises spatiales sur lesquelles la cartographie du réseau hydrographique est non exhaustive (nombreux cours d'eau, chevelu parfois dense, présence de cours d'eau temporaire...). Les zones humides de têtes de bassins versants semblent principalement représentées par des tourbières à l'exception de têtes de bassins versants des cours d'eau karstiques (secteurs infiltrant où les zones humides sont souvent rares) où les zones humides (ex : tufières) sont associées aux émergences. Si les zones humides constituent des milieux à enjeux et à préserver, il en est de même pour les têtes de bassins versants. Les zones humides de têtes de bassins versants constituent donc des milieux très sensibles à très forts enjeux.

La littérature scientifique, ou non, sur les zones humides est abondante et largement interdisciplinaire (ex : analyse du signal, écologie, géochimie, géomorphologie, hydrologie, hydrogéologie, télédétection,

géophysique, pédologie, géomatique...). L'étude de ces milieux porte sur des problématiques et des approches diversifiées (ex : modélisation, gestion, fonctions, services, typologies...).

1.2. Typologies des zones humides : importance de l'approche hydrogéomorphologique

Comme pour les définitions, il existe de nombreuses typologies des zones humides. Celles-ci peuvent être fondées sur des critères, uniques ou combinés, d'espèce (faune-flore), d'habitat, de végétation et de phytosociologie, de sol, de milieu ou de fonction (ex : hydrologique, épuratrice, écologique, ...) voire de service (ex : régulation des inondations, amélioration de la qualité de l'eau, diminution de l'érosion, soutien d'étiage, maintien de la biodiversité, réduction des émissions de GES, développement économique et socio-culturel, ...). Ces typologies sont communément utilisées dans le cadre réglementaire, notamment pour la protection des zones humides, ou de référentiels. Il existe des clefs de détermination permettant d'identifier les zones humides à partir du ou des critères impliqués.

La classification (ou typologie) hydrogéomorphologique est celle qui nous apparaît la plus en adéquation avec les objectifs du projet ZHTB. Elle permet un système de classification des zones humides fondé sur des critères et des propriétés géomorphologiques, hydrologiques et hydrodynamiques, et sur un système d'indicateurs visant à caractériser et à estimer les fonctions des zones humides. Il s'agit d'un système de classification hiérarchique fondé sur trois facteurs fondamentaux pour identifier les fonctions des zones humides : 1) la configuration géomorphologique, définie par la localisation de la zone humide dans le paysage et la topographie (ex : dépression, vallée, plaines, géologie, têtes de bassins, ...); 2) la source principale ou dominante d'alimentation en eau, c'est-à-dire l'origine de l'eau alimentant la zone humide (ex : précipitations, apports de surface et sub-surface, apports d'eau souterraine, ...) intégrant les effets retard concernant le ruissellement, le débordement et le transit souterrain ; 3) l'hydrodynamique, définie comme la direction, l'importance et les variations des flux d'eau de surface et de sub-surface dans la zone humide (les mouvements peuvent être horizontaux et verticaux).

1.3. Focus sur les tourbières : milieux humides emblématiques des têtes de bassins versants

Les tourbières semblent être des milieux humides très intéressants dans le cadre du projet ZHTB car ce sont des zones humides très fréquentes sur les têtes de bassins versants. Ces milieux très étudiés sont décrits par un vocabulaire précis reflétant : la structuration verticale ou spatiale, le type, les modes d'alimentations en eaux, les modalités de mises en place et la vie biologique. La classification formelle des tourbières est fondée principalement sur l'origine de l'eau et le fonctionnement hydrologique, notamment les transferts d'eau. Les principaux critères de classification sont les suivants : 1) type d'alimentation hydrique dépendant fortement de la géomorphologie et du climat (ex : ombrotrophique ou minerotrophique) ; 2) importance et nature des précipitations (ex : fréquence, intensité, acidité, charge en ions) ; 3) gradient climatique (ex : pluviométrie, température, contrastes saisonniers) dépendant fortement de l'altitude, de la latitude, de la saisonnalité qui influencent la surface, la forme et le fonctionnement des tourbières ; 4) chimisme de l'eau et de la tourbe liés à l'alimentation hydrique ; 5) gradient hydrique lié au stade évolutif de la tourbière.

1.4. Outils et indicateurs pour l'étude de la fonction de soutien d'étiage

Ils existent de nombreux travaux visant à créer et à mettre en œuvre des outils, indicateurs ou critères pluridisciplinaires liés à la classification et à la compréhension du fonctionnement des zones humides. Toutefois, il ne semble pas exister à l'heure actuelle d'indicateurs fiables pour le soutien d'étiage. Il existe donc un fort besoin en termes de développement d'indicateurs et de méthodologies visant à caractériser et à quantifier le rôle de soutien d'étiage des zones humides. De tels indicateurs pourraient aussi permettre d'identifier simplement les zones humides ou les réseaux des zones humides favorables ou potentiellement favorables au soutien d'étiage.

2. Synthèse partie II : méthodes de caractérisation du soutien d'étiage

2.1. Bilan hydrologique : approche simple mais difficile à mettre en œuvre pour une quantification précise du soutien d'étiage

L'étude du soutien d'étiage des zones humides de têtes de bassins versants nécessite l'établissement d'un bilan hydrologique qui requiert de bien connaître la typologie du site étudié afin d'identifier les modalités d'alimentation (SWI, GWI, P) et de restitution (SWO, GWO, ET) des eaux. La grande diversité des interactions entre les différentes composantes de l'hydrosystème souligne l'intérêt de disposer d'une classification hydrologique précise et la plus exhaustive possible. Il est également indispensable que le bilan hydrologique (flux entrants et sortants, stock) soit étudié de manière dynamique, c'est-à-dire en considérant les variations temporelles. Le soutien d'étiage d'une zone humide peut être envisagé comme sa faculté à constituer un stock hydrique lorsque les précipitations sont abondantes (période humide) et à le restituer de manière déphasée vers les cours d'eau lorsque les précipitations viennent à manquer (période sèche). Dès lors, la perméabilité (régulant les vitesses de transfert) et le coefficient d'emménagement (régulant la part d'eau gravitaire stockée) des matériaux constituant la zone humide, sont des éléments déterminants pour statuer sur le rôle de soutien d'étiage. D'autres paramètres et variables sont à prendre en compte : teneur en eau libre, teneur en eau utile, volume de réserve, pente, gradient hydraulique, conditions aux limites, ... Au final, si le bilan hydrologique s'appuie sur des principes simples, sa mise en œuvre l'est moins d'autant plus dans un objectif de quantification. Le nombre de variables et paramètres impliqués augmentent les incertitudes sur le calcul de ce bilan.

2.2. Zones humides tourbeuses : milieux poreux particuliers dont le rôle hydrologique est difficile à appréhender

Les liens entre les propriétés des zones humides tourbeuses et leur rôle hydrologique fait ressortir une grande complexité de ces milieux qui présente deux traits caractéristiques : porosité et hydrodynamisme.

Les zones tourbeuses sont des milieux poreux originaux. Le matériau poreux est constitué principalement de matière organique (d'origine végétale) dont le degré de décomposition varie selon la profondeur, l'âge, la communauté floristique et le régime de drainage (battement de nappe). La particularité de ce matériau réside dans sa faible densité apparente, sa grande porosité totale, ses très larges gammes de porosité efficace et de perméabilité dont les valeurs décroissent de manière exponentielle avec la profondeur et qui sont en constante évolution. Cette évolution est liée à l'état de décomposition de la matière organique, mais aussi à l'état de saturation en eau du matériau qui peut gonfler ou se rétracter. Ces deux phénomènes (décomposition et variation de saturation) sont à l'origine de la structuration diplotelmique des zones humides tourbeuses qui comprend : 1) sur la frange supérieure, un acrotelme (quelques centimètres de profondeur) qui est la zone hydrologiquement active du fait de la présence d'eau gravitaire (mobilisable) ; 2) sur la partie inférieure, un catotelme (de quelques centimètres à plusieurs mètres) qui est constamment saturé en eau essentiellement sous forme piégée (non mobilisable). Ce milieu poreux organique se démarque notamment du milieu poreux minéral par son évolution rapide, à l'échelle saisonnière (gonflement/rétractation) ou pluriannuelle (croissance végétale/décomposition) qui peut affecter sa géométrie et par voie de conséquence ses propriétés hydrodynamiques (K, S).

Les propriétés et la structure d'un tel milieu poreux rendent son rôle hydrologique difficile à appréhender. La structuration diplotelmique et le niveau de la nappe ont une influence directe sur les écoulements. On en distingue trois types : 1) l'écoulement rapide à saturation (ou de crue) lorsque la nappe est affleurante et que le surplus d'eau ruisselle ; 2) l'écoulement rapide lorsque la nappe est au-dessus du seuil d'écoulement rapide ; 3) un écoulement lent lorsque la nappe est en dessous du seuil d'écoulement rapide. Pour ces trois types d'écoulements, c'est presque exclusivement la faible épaisseur

de l'acrotelme qui est sollicitée. Même si ce modèle de répartition des écoulements semble simple et bien contraint, statuer définitivement sur le rôle hydrologique des zones humides tourbeuses n'est pas chose aisée. Bien que la majorité des auteurs s'accordent sur le fait que le rôle de stockage est assez modeste et occasionnel et que le rôle de soutien d'étiage est faible voire négatif (évapotranspiration forte et prélèvements directement par la végétation dans la nappe).

2.3. Questions soulevées par l'étude bibliographie du rôle de soutien d'étiage

Comme le fait ressortir la revue bibliographique présentée précédemment, le rôle hydrologique des zones humides tourbeuses est difficile à appréhender du fait de la diversité des sites étudiés et des résultats parfois divergents (effet positif, aucun effet, effet négatif). Plusieurs problèmes particuliers ont été soulevés et méritent d'être traités au cours du projet. Ils font référence :

- à la difficulté pour séparer les différentes contributions issues des différents compartiments de l'hydrosystème (ex : zone humide, nappe d'accompagnement, eau de surface issue d'un bassin versant amont, eau de ruissellement local...) en direction du cours d'eau. Pour les tourbières en partie alimentées par les eaux souterraines, ce problème revient à isoler le rôle propre de la zone humide. C'est-à-dire s'intéresser à la dynamique (circulation lente ou rapide) et au devenir (retour à l'atmosphère ou alimentation du cours d'eau) des eaux transitant dans la zone humide.
- aux difficultés pour généraliser les résultats concernant le soutien d'étiage étant donné la diversité des méthodes employées et celle des zones humides tourbeuses selon les contextes climatique, hydrologique, géologique, géomorphologique, morphostructurale et anthropique. Ce problème pose la question suivante : *Quels sont les caractères favorisant ou défavorisant le soutien d'étiage et quelle est leur importance relative les uns vis-à-vis des autres (prépondérance) ?*
- à la nécessité de disposer de références sous forme de classes de valeurs pour déterminer la qualité du soutien d'étiage imputable aux zones humides tourbeuses. Ce problème pose la question de l'objectivité et de la pertinence des références choisies.
- aux différentes dynamiques selon qu'il s'agisse de tourbières ombrotrophes ou minérotrophes. Ces différences posent plusieurs questions : 1) pour les tourbières minérotrophes : *La position dans les bassins versants limite-t-elle la vidange des nappes d'accompagnement en maintenant des niveaux hydrostatiques hauts ?* 2) pour les tourbières ombrotrophes, plus régulièrement alimentées par les précipitations : *Limitent-elles le ruissellement en ressuyant progressivement l'eau stockée vers le cours d'eau ?* Ces différences ont une influence sur la vulnérabilité intrinsèque de ces deux types de zones humides.

2.4. Rôle de régulation des débits : tableau de synthèse

Sans disposer encore de valeurs chiffrées précises, un essai de synthèse est proposé dans le Tableau 27 pour illustrer de manière qualitative les effets positifs ou négatifs des zones humides tourbeuses (en relation avec une nappe ou un cours d'eau) sur leur rôle hydrologique (stockage et restitution). Ce tableau fait ressortir : 1) des « facteurs communs » à toutes les zones humides tourbeuses « en tout temps » (« facteurs permanents ») ; 2) des facteurs qui peuvent présenter des variations interannuelles ou pluriannuelles (« facteurs transitoires ») et 3) des facteurs qui dépendent des particularités de la zone humide (par exemple minérotrophe/ombrotrophe) qui peuvent varier d'un site à l'autre (« facteurs conditionnels »).

	Types de facteurs	Stockage : écrêtage et ralentissement dynamique des crues <i>Facteurs pris en compte</i>	Restitution : soutien d'étiage <i>Facteurs pris en compte</i>
FAVORISANT	Permanents	- Propriétés hydrodynamiques (S) des parties supérieures de l'acrotelme (forte macroporosité) - Forte capacité d'infiltration de l'acrotelme (liée à la forte macroporosité de surface) - Microtopographie de surface (ralentissement du ruissellement)	- Propriétés hydrodynamiques (K / S) des parties inférieures de l'acrotelme (perméabilité intermédiaire entre 10^{-3} et 10^{-5} m.s⁻¹)
	Transitoires	- Forte ETP (libère de l'espace disponible pour le stockage en période sans précipitation) - Travaux de drainage (effet seulement à court terme)	- Travaux de drainage (effet seulement à court terme)
	Conditionnels	- Si fort volume de l'acrotelme (l'épaisseur étant toujours faible, la compensation peut se faire par des grandes surfaces)	- Configuration géométrique des tourbières minérotrophes (cote altimétrique haute de l'exutoire ralentissant potentiellement la décharge des nappes d'accompagnement) - Si fort volume de l'acrotelme (l'épaisseur étant toujours faible, la compensation peut se faire par des grandes surfaces) - Si pente du substratum faible (<5%)
DÉFAVORISANT	Permanents	- Faible épaisseur de l'acrotelme (faible volume disponible pour le stockage) - Propriétés hydrodynamiques (S) du catotelme (faible capacité de stockage)	- Propriétés hydrodynamiques du catotelme (perméabilités faibles et eau pas ou peu mobilisable) - Forte ETP et prélèvement des végétaux directement dans la nappe (l'eau reprise par les plantes n'est plus disponible pour le cours d'eau ou la nappe) - Faible épaisseur de l'acrotelme / Faible battement de nappe (donc faible déstockage)
	Transitoires	- Fréquence élevée de hauts niveaux piézométriques (peu d'espace de stockage disponible) - Travaux de drainage (effet à long terme)	- Travaux de drainage (effet à long terme)
	Conditionnels	- Si présence d'écoulement préférentiel en conduits souterrains (écoulement souterrain rapide)	- Si pente du substratum forte (>5%) - Si présence d'écoulement préférentiel en conduits souterrains (écoulement souterrain rapide)

Tableau 27 : Synthèse des effets positifs ou négatifs des zones humides tourbeuses (en relation avec une nappe ou un cours d'eau) sur le rôle hydrologique (stockage et restitution)

3. Enseignements tirés de la phase 1 et perspectives pour la phase 2

Cette partie fait le lien entre les éléments bibliographiques présentés en Parties I et II (voir synthèse ci-avant) et les éléments de discussion entre partenaires du projet ZHTB lors de réunions et/ou de visites de terrain. L'objectif est ici de bien ancrer les acquis et enseignements de la phase 1 et de souligner les points et questions potentiels à développer et à approfondir en phase 2.

3.1. Typologies des zones humides

Les essais de typologies des zones humides proposent une nomenclature reposant sur des caractéristiques souvent bien différenciés et tranchées. Sur le terrain, il n'est pas toujours possible d'associer une zone humide à un type particulier (des situations mixtes sont relativement courantes). Il existe en effet des configurations intermédiaires entre 2 ou plusieurs types (ex : milieux mixtes). De plus, nombre de zones humides présentent des milieux ou des habitats (principalement caractérisés par la végétation) dits « en mosaïque » qu'il n'est pas forcément simple de caractériser car composés d'un

patchwork d'habitats de taille souvent réduite. À Frasné, par exemple, on trouve plusieurs types de tourbières (ex : soligènes, limnogènes, ombrogènes...). On observe aussi des tourbières ombrotrophes qui se développent sur des milieux minérotrophes. De plus, la caractérisation de ces milieux peut évoluer en fonction de la connaissance que l'on en a. De tels milieux peuvent aussi évoluer dans le temps de manière naturelle ou du fait des activités anthropiques liées à des aménagements comme par exemple à Frasné.

3.2. Soutien d'étiage des zones humides et interactions avec l'hydrosystème

L'étiage, dans son acception la plus courante, est une notion statistique et hydraulicienne qui correspond à la période de l'année durant laquelle le débit d'un cours d'eau (ou d'une nappe souterraine) atteint son niveau le plus faible (basses eaux). Pour rappel, le projet vise à évaluer la faculté des zones humides à constituer un stock hydrique et à le restituer de manière déphasée vers les cours d'eau qui les drainent sur la période pendant laquelle leur soutien par les précipitations est le plus faible (étiage estival et pas hivernal).

L'analyse préliminaire de la bibliographie fait ressortir que le rôle de soutien d'étiage des zones humides tourbeuses est potentiellement faible voire très faible. Plusieurs publications issues de travaux réalisés en Belgique, aux Pays-Bas, en Allemagne et en Angleterre remettent en cause le rôle attribué aux tourbières de capacité de stockage de l'eau et de déstockage différé. Pour les tourbières, seul l'acrotelme semble avoir un rôle dans le stockage/déstockage d'eau. Dans le cadre du projet ZHTB, il convient donc d'une part de confirmer ou non ces constatations sur les sites d'étude sélectionnés (Partie IV).

Pour que le soutien d'étiage soit efficace, il faut s'assurer que l'eau stockée dans la zone humide lors d'épisodes pluvieux puisse être restituée progressivement au(x) cours d'eau qui la draine(nt) (exutoire), c'est-à-dire suffisamment décalée dans le temps (déphasée) pour que l'apport soit significatif pendant la période d'étiage du cours d'eau. Il est également important de définir des critères pour définir ce qui est un soutien significatif par rapport à un soutien négligeable. Dans la suite des travaux (phase 2 du projet ZHTB), il va donc être important de : 1) préciser la ou les méthodes de mesure (ou d'estimation) (ex : bilan hydrologique, ratios de restitution en m^3/ha , modélisation, ...) pour quantifier le soutien d'étiage et 2) déterminer des critères quantifiables pour définir la qualité du soutien d'étiage.

Pour répondre à la première question : « *Comment mesure-t-on le soutien d'étiage ?* », il est nécessaire de définir sur quelle base on mesure le rôle de soutien d'étiage et son importance (qualité). *Est-ce un pourcentage du débit d'étiage ou de basses eaux du cours d'eau ? Doit-on comparer les débits mesurés en sortie de tourbière aux débits spécifiques (qui prennent en compte la surface du bassin versant drainé) communément retrouvés sur le même territoire hors tourbières ? Comment considérer le caractère dynamique du tarissement (coefficient de tarissement) ? Doit-on pondérer ces débits en fonction du régime climatique du bassin versant considéré ? Doit-on pondérer en fonction de la surface, de l'épaisseur et des caractéristiques hydrodynamiques de la zone humide (ex : tourbe) ?*

Pour répondre à la seconde question : « *Sur quelles bases définit-on la qualité du soutien d'étiage ?* » (ex : définition de classes qualitatives (très bon, bon, moyen, faible, très faible, négligeable) ou semi-quantitatives, il est nécessaire de définir des valeurs pour lesquelles on passe d'une classe à une autre. Pour ce faire, plusieurs pistes sont envisageables, comme par exemple, la comparaison par rapport à des aquifères standards ou à des textures de matériaux poreux (ex : graves, sables, limons, argiles).

La question du soutien d'étiage semble de plus fortement dépendante du contexte :

- *Contribution des eaux souterraines* - Les sites en vase clos [pluie → stockage ZH → restitution Esu] n'existent pas ou quasiment pas (ex : Tourbière de l'Étui dans le massif des bois noirs (42), cas rare de tourbière uniquement ombrotrophe). Il y a souvent des apports par suintement des nappes latérales (Eso). Il semble donc important d'inclure dans le soutien d'étiage au cours d'eau les apports d'eau souterraine transitant par une zone humide.

- *Régulation des flux hydrologiques* - La question du soutien d'étiage est fortement dépendante du temps de circulation des flux dans les zones humides (transmissivité) et d'effets de retardement (tampon, crues, durée de piégeage de l'eau, durée ou persistance du phénomène de restitution...). Ce temps peut dépendre de la localisation de la zone humide (altitude, latitude, climat), de son type, des périodes de l'année, de la végétation et du microclimat généré par la présence de cette même zone humide (ex : effet sur la nébulosité). Ainsi, le rôle de soutien peut être plus ou moins important. On observe souvent une désynchronisation des signaux : les gros apports des zones humides au cours d'eau ne se faisant pas forcément à l'étiage. Hors étiage, il est fort probable que sur les phases d'alimentation importantes depuis les zones humides vers les cours d'eau ne consistent qu'en une simple retransmission du signal pluie à l'exutoire.
- *Pondération en fonction du contexte climatique et des enjeux* - La notion de soutien d'étiage mériterait, dans une phase ultérieure du projet, d'être aussi caractérisée en fonction du contexte et des enjeux locaux en distinguant : 1) les secteurs où la pluviométrie est abondante et bien répartie pour lesquels la question du soutien d'étiage est vraisemblablement mineure (*Faut-il relativiser les résultats des études réalisées en Belgique ou en zone de montagne ?*) ; 2) les secteurs pour lesquels la question du soutien d'étiage est cruciale (ex : zone méditerranéenne) en période de sécheresse. Dans de tels contextes d'étiage sévère et de forte sécheresse, il peut être intéressant de considérer le soutien d'étiage même faible d'une zone humide, ou d'intégrer de manière cumulative le soutien d'étiage de nombreuses zones humides (même petites) à l'échelle de bassins versants. L'étude de la vulnérabilité de ces secteurs en contexte de changement climatique est prépondérante [variation future de la pluviométrie et du ratio l'ETP/ETR (la demande climatique sera plus importante et la capacité à céder de l'eau à l'atmosphère par évapotranspiration probablement supérieure à l'ETP, effet oasis)].

3.3. Tourbières et autres types de zone humides de têtes de bassins versants

La phase 1 a porté une attention particulière aux zones humides de type tourbières. Par la suite, il sera intéressant de creuser la question pour d'autres types de zones humides de têtes de bassins versants et par exemple, les prairies humides notamment les prairies à molinies (ex : code Eunis E3.511 (Louvel et al., 2013)), les marais paratourbeux (ex : code Eunis F4.11 (Louvel et al., 2013)), les mégaphorbiaies (ex : code Eunis E5.51 (Louvel et al., 2013)),... Il serait donc intéressant de disposer d'un état des lieux des types de zones humides de têtes de bassins versants. Il est fort probable que des milieux différents des tourbières contiennent moins d'eau piégée. Ces milieux pourraient avoir un effet tampon différent par rapport à des zones humides déjà/toujours saturées. Il faudrait déterminer l'importance du rôle du substratum (Nature ; Épaisseur ; Paléoformes : verrous, cote des exutoires... ; Hydrologie : drainance, infiltration, apport), les effets du sol et notamment des histosols (propriétés hydrodynamiques), les effets des variations du niveau de nappe sur cette propriété tampon.

La question de l'échelle de travail prend ici toute son importance. *L'étude de tels milieux « en mosaïque » doit-elle reposer sur une typologie emboîtée (étude des entités zones humides en réseau à l'échelle d'un bassin versant) ou sur une typologie englobante (étude globale des zones humides d'un bassin versant à leur exutoire aval) pour estimer la contribution des zones humides au cours d'eau à l'étiage à l'échelle d'un bassin versant ?*

3.4. Difficultés rencontrés pour l'étude hydrologique des tourbières

L'étude des tourbières pose différents problèmes :

- la géométrie change en fonction de l'emménagement. Plusieurs facteurs peuvent intervenir :
 - 1) alternance assèchement/saturation de la matière organique liée aux variations saisonnières,
 - 2) capacité au champ (stockage maximum de la tourbe) et point de flétrissement permanent (Pf 4.2 l'eau absorbée par la tourbe n'est plus disponible pour les végétaux, les forces de rétention de la tourbe étant plus fortes que les forces de succion des plantes),
 - 3) évolution du milieu (accumulation/décomposition de la matière organique sur des temps longs) ;
- le catotélme n'est généralement pas homogène ce qui entraîne une variation de ses propriétés hydrodynamiques. L'analyse pédologique de carottes de tourbes est nécessaire afin de déterminer et caractériser ces variations ;

- l'acrotelme composée de sphaignes peut se comporter comme une petite zone non-saturée [*Comment varie la saturation ? Comment l'eau de pluie s'infiltre vers la tourbe en fonction de la saturation (rapide, lent, transparence du signal de réponse) ? Y a-t-il ruissellement ? Existe-t-il des niveaux préférentiels de circulation d'eau dans la tourbe (structure des matériaux organiques et propriétés) ?*];
- l'implantation, l'ancrage de piézomètres et l'isolement des surfaces traversées les unes par rapport aux autres sont souvent problématiques pour pouvoir tirer des enseignements fiables à partir de ces équipements ;
- le type de tourbe peut perturber les investigations géophysiques ;
- ...

Compte-tenu des difficultés posées par les investigations de terrain, il paraît intéressant en complément du travail d'acquisition et d'analyse de données, de travailler sur des approches par modélisation simplifiée pour des configurations types (avec des données réelles ou non). La modélisation pourrait apporter des informations intéressantes concernant la circulation des flux d'eau et la transformation du signal hydrologique (Lowry et al., 2009).

Dans le cas des tourbières, la modélisation pourrait donner des éléments de réponse complémentaires à l'approche terrain pour apprécier leur rôle hydrologique potentiel dans le soutien d'étiage. Il est fort probable que les données qui seront acquises dans le cadre du projet ZHTB ne permettent pas de couvrir toutes les situations pour permettre de statuer de manière définitive et de façon univoque sur le rôle hydrologique des zones humides. La modélisation numérique peut donc s'avérer un outil utile car il serait possible de tester un grand nombre de scénarios (configurations géomorphologiques, typologies minérotrophe/ombrotrophe, présence ou absence de tourbière, ...) et d'évaluer leur influence sur le soutien d'étiage. Grace aux approches par modélisation numérique, il serait aussi possible de tester la sensibilité des paramètres (K, S, épaisseur acrotelme, hauteur de l'exutoire, pente, ETP, précipitations...) pour hiérarchiser la prépondérance de ces facteurs vis-à-vis des autres.

De plus, il est intéressant de signaler que de nombreuses zones humides (par exemple les tourbières de plateaux de la montagne ardéchoise) sont d'origine anthropique. De telles zones humides sont apparues suite au comblement (atterrissement) d'un plan d'eau artificiel (ex : barrage, seuil, retenue collinaire, carrière...). Les zones humides n'en restent pas moins très vulnérables aux impacts anthropiques : drainage, urbanisation, évolution de l'occupation de l'espace, déconnexion avec le bassin versant, pollution, ... Leur destruction ou leur dégradation met en péril des fonctions et services.

3.5. Indicateurs hydrologiques

Dans un premier temps, l'accent sera mis sur la détermination d'indicateurs hydrologiques appropriés liés aux caractéristiques et aux paramètres clefs (Tableau 27, p77) des zones humides étudiées. Ces indicateurs doivent viser à caractériser : 1) l'intérêt du site pour le soutien d'étiage ; 2) la vulnérabilité du site ; 3) le risque ou le niveau de dégradation.

À terme, il conviendra de mener une réflexion conjointe sur la transférabilité de ces indicateurs à d'autres sites et à d'autres échelles (ex : sous-bassin versant voire bassin-versant). Le lien avec d'autres types d'indicateurs (ex : indicateurs écologiques notamment végétation et odonates) pourra aussi être étudié, ainsi que leurs potentialités à évaluer les services écosystémiques des zones humides.

De plus, on pressent que les changements climatiques, marqués aujourd'hui davantage par une augmentation des températures plus que par une évolution du régime des précipitations, auront un effet sur les zones humides. Ainsi, certains types seront vraisemblablement résilients et/ou résistants (*lesquels ?*) d'autres voués à disparaître (*lesquels ?*). Il serait intéressant de disposer d'indicateurs de résilience des zones humides aux changements climatiques. La nature de l'alimentation des zones humides (Précipitations, ESO et/ou ESU) apparaît alors comme déterminante.

PARTIE IV

—

Choix des sites et instrumentation prévue

Cette partie présente les critères pertinents sélectionnés (Annexe 4) pour décrire les spécificités des sites de zones humides potentiellement intéressants pour l'étude du soutien d'étiage. Ces critères ont permis de hiérarchiser ces sites par ordre de pertinence par rapport à la problématique et aux contraintes liées à la mesure et aux incertitudes.

Environ 25 gestionnaires du bassin versant RMC ont été contactés (Annexe 5) pour décrire les sites dont ils ont la charge à l'aide de nos critères. Au total, une trentaine de sites potentiels ont été évalués. Au final, 5 sites ont été retenus pour des visites de terrain, puis hiérarchisés à leurs tours.

Une trentaine des sites de zones humides a été évaluée selon les critères de sélection (pour plus de précisions, voir la grille de choix des sites disponible sur le cloud ZHTB¹⁷). Les sites sont les suivants (Tableau 28).

Nom du site	Départements	Communes
Marais de Vaux	Ain (Bugey)	Hauteville en Lompnes, Cormaranche en Bugey
Tourbière de Rougemont	Ain (Bugey)	Brenod
Marais de Prodon	Ain (Pays de Gex)	Divonne-les-bains, Grilly
Marais des Bidonnes	Ain (Pays de Gex)	Divonne-les-bains
Zones humides du bassin versant de l'Aude	Aude	-
Grandes Seignes	Doubs	Les Granges-Narboz/Houtaud
Tourbière de Frasne	Doubs	Frasne, Bouverans
Marais des Boulignons	Drôme	Beaurières
Marais de Manteyer	Hautes-Alpes	Manteyer, Roche-des-Arnauds, Gap
Marais de Névache	Hautes-Alpes	Névache
Marais du Bourget	Hautes-Alpes	Cervière
Plateau de Bayard	Hautes-Alpes	Saint-Laurent du Cros, Col Bayard, Gap, Champsaur
Chavannes	Haute-Savoie	Les Gets
Lossy	Haute-Savoie	Cranves-sales
Plateau de Beuregard	Haute-Savoie	La Clusaz, Thônes, Manigod
Tourbière de Sommand	Haute-Savoie	Mieussy
Tourbières du Plateau des Glières	Haute-Savoie	Le Petit-Bornand-les-Glières, Thorens-Glières
Zones humides de Megève	Haute-Savoie	Megève
Tourbière de Praubert	Haute-Savoie (Plateau de Gavot)	Saint-Paul-en-Chablais
Marais du Chenet	Haute-Savoie (Plateau des Bornes)	Arbusigny
Plateau de Chambaran	Isère	Roybon, Montrigaud
Tourbière de Luitel	Isère	Séchilienne, Chamrousse
Marais de Val Coisin	Isère, Savoie	Sainte-Hélène-du-Lac, Saint-Pierre-de-Soucy, Villaroux
Lac des Bouillouses	Pyrénées-Orientales	D'Angoustrine-Villeneuve-des-Escalades, Les Angles
Tourbière de Couty	Rhône (Beaujolais)	Chenelette
Les Creusates	Savoie (Massif des Bauges)	Saint-François de Sales

Tableau 28 : Liste des sites présélectionnés

¹⁷ <https://seafire.emse.fr/d/b2cb20daf4/>

1. Critères de choix des sites

Les critères de sélection des sites présentés ci-après (Tableau 29) ont été déterminés à partir de l'analyse bibliographique sur l'hydrologie des zones humides et les bilans hydriques (faisabilité des mesures, incertitudes). Un critère « activités humaines » a été ajouté pour prendre en compte leur influence sur l'hydrologie et les bilans. De plus, la disponibilité de compétences et de données est évaluée.

Critères	Sous-critères
Contexte géologique et climatique	Cristallin / métamorphique Sédimentaire
Localisation	Têtes de bassins versants Bassin hydrogéographique RMC
Dimension	Surface : 10 à 100 ha Impluvium : >100 ha ; 10 à 200 l/s Exutoires bien identifiés Épaisseur : 1 à plusieurs mètres
Flux d'eau – modalités d'alimentation	Contexte simple Apports aux limites connus Ombrotrophe vs minérotrophe Géochimie [date] Autres
Connaissances, données et équipements	Station météo, Piézomètres, Station de jaugeage [nombre] Sondages géophysique et pédologique, topographie [nombre] Paramètres hydrodynamiques
Activités humaines / Enjeux	Restauration Aménagements/ Activités
Autres	Équipes de recherche impliquées Accès

Tableau 29 : Critères de sélection des sites

2. Spécificités des sites sélectionnés : Instrumentation des sites et acquisition de données

En fonction des besoins pour le projet et sur la base du croisement des différents critères, la décision a été prise avec l'Agence de l'eau de visiter 5 sites apparaissant comme les plus pertinents à étudier. Les sites visités ont ainsi été classés par ordre de pertinence pour servir de support à la réalisation du projet. à la problématique, à l'existence de données et aux possibilités d'instrumentation.

Le Tableau 30 présente les principales spécificités des sites visités (pour plus de précisions voir Annexe 3) et reflète la diversité de leurs configurations (géologie, hydrogéomorphologie, hydrologie, habitats).

Les points suivants présentent de manière synthétique les caractéristiques principales de chacun des sites. Les tableaux de synthèse (Tableau 31, Tableau 32, Tableau 33, Tableau 34, Tableau 35) mettent en avant : 1) leur adéquation avec la problématique (points positifs), 2) les contraintes particulières (questionnements), 3) les investigations et l'instrumentation envisagées (à finaliser en phase 2 du projet ZHTB).

L'organisation et l'ordonnancement des équipements complémentaires et des travaux envisagés seront présentés dans un pré-planning général d'ordonnancement en phase 2 sur les sites retenus pour instrumentation. Ce planning sera ensuite validé (complété, modifié) lors de réunions bilatérales avec les personnes impliquées sur chacun des sites (gestionnaires et chercheurs).

Spécificités / Site	Tourbière de Luitel	Tourbière de Frasne	Tourbière de Praubert	Marais de Vaux	Tourbière de Montselgues
Altitude (m)	1200	850	900	750	1000
Climat					
Surface (ha)	10	230	23	120	<10
Type de zone humide	Tourbière bombée Tourbière à radeaux flottants	Tourbière bombée Tourbière active Tourbière boisée	Bas-marais alcalin Tourbière acide	Plan d'eau Tourbière alcaline Tourbière acide Organo-minéral	Landes tourbeuses Tourbières acides
Acrotelme (K, S, Z)					
Catotelme (K, S, Z)					
Géologie régionale	Métamorphique	Calcaires karstifiés	Métamorphique et sédimentaire	Calcaires karstifiés	Cristallin et sédimentaire
Hydrogéomorphologie (interaction ZH/encaissant)	Héritage glaciaire (moraines)	Héritage glaciaire (moraines de fond et cordons morainiques)	Héritage glaciaire (moraines, fluvio-glaciaire)	Héritage glaciaire (moraine de fond)	Arène granitique, grès triasique
Flux – alimentation	1 Apports de versant 2 Ruisseaux temporaires 3 Pluie	1 Pluie 2 Apports de versant ??	1 Ruisseaux 2 Apports de versant 3 Pluie	1 Apports de versant (sources karstiques) 2 Ruisseau 3 Pluie	1 Apports latéraux et perchés 2 Pluie
Autres spécificités à compléter et à préciser...					

Tableau 30 : Spécificités des 5 sites visités

Les points suivants sont des préalables indispensables pour une bonne organisation et un bon ordonnancement :

- réaliser les campagnes géophysiques avant les carottages et les sondages ;
- valoriser la réalisation de carottes par des investigations allant plus loin que la simple description (à déterminer) ;
- déterminer à l'amont le type de matériel à utiliser en fonction des tourbières et de leurs caractéristiques (ex : la conductivité de l'eau peut interférer avec certaines méthodes géophysiques) ;
- déterminer les modalités de partage des données pour chaque site dans un premier temps, puis envisager la mise en œuvre d'un outil de centralisation des données.

Au final, les deux sites principaux qui ont été sélectionnés sont la tourbière de Luitel et la tourbière de Frasne. C'est sur ces deux sites que l'effort d'instrumentation et de mesures sera le plus intense en phase 2. Trois sites complémentaires (la tourbière de Praubert, le marais de Vaux et la Tourbière de Montselgues) seront étudiés sur la base des données existantes.

2.1. Tourbière de Luitel (Isère, Séchilienne, 1200 m)

Ce site est constitué principalement de tourbières acides à sphaignes :

- tourbière bombée (au col, 8 ha) dont l'épaisseur varie entre 0 et 11m ;
- lac tourbière à radeaux flottants ou tremblants (2 ha) dont la profondeur varie de 0 à 16 m.

Le contexte géologique est métamorphique (amphibolites, gneiss). Le relief est hérité des glaciations (moraines, farines glaciaires imperméables) et la structure très faillée et fissurée.

La tourbière est alimentée par les pluies, les eaux superficielles, essentiellement les ruisseaux de la forêt de Séchilienne (dont beaucoup sont temporaires) et les eaux souterraines. À l'amont du site, il existe un réseau de tourbières. Il s'agit d'un bassin versant en cascade depuis les crêtes (2 500 m) jusqu'au site de Luitel (1 200 m). On observe des pertes (infiltration avec résurgence ; 5 l/s le jour de la visite de terrain) du ruisseau de Fontfroide.

Points positifs	Équipements complémentaires et travaux envisagés
- Facilité d'accès et appui technique - Site bien circonscrit et de taille réduite - Surface et un volume intéressant de tourbe - Géométrie et pédologie connues - Exutoires bien identifiés - Nombreuses données et études existantes (Lidar, piézométrie...) - Site déjà bien équipé - Équipes de recherche impliquées - 1 stage en cours	Hydrologie - Mise en place d'un seuil jaugé (PVC, triangulaire, 2 sondes CTD) à la surverse du Lac - Évaluation de l'influence du niveau du lac par rapport aux débits à l'exutoire (sous-écoulements ?) - Surveillance des débits à l'aval de l'exutoire du lac (proche fontaine du Mulet ; 1 107 m) - Évaluation des apports du bassin versant amont à la tourbière (1 piézomètre) - Évaluation des fuites d'eau liées au substratum Géochimie / traçage - Traçage pertes ruisseau de Fontfroide (Biju-Duval, 1983, 1994, 2001) - Traçage amont - Datation des eaux Géophysique - Nouveaux profils pour compléter l'existant - Analyse plus fine de l'acrotelme et du catotelme - Affinage de la géométrie du lac (acoustique, bateau) - Détermination de la nature de la moraine à l'exutoire du lac (étanchéité ?)
Questionnements	
- Piézomètres pas toujours ancrés dans le substratum - Possibles apports de versant - Relations moraine/tourbière - Contexte faillé	Pédologie - Carottages pour déterminer les propriétés hydrodynamiques de la tourbe et caler la géophysique - Sondages pédologiques pour caler la géophysique Topographie - Dispositif suivi gonflement tourbière (repère gradué, station géodésique) ? Écologie - Général - Analyse des données existantes

Tableau 31 : Synthèse - Tourbière de Luitel

2.2. Tourbière de Frasne (Doubs, Frasne, 850 m)

Ce site est constitué de tourbières acides qui échappent à l'alimentation du bassin versant et d'un bas-marais alcalin dont le rajeunissement est lié à l'exploitation passée de la tourbe. Il y a plusieurs secteurs de tourbières (230 ha en tout) :

- tourbière bombée ;
- tourbière vivante (active) : très instrumentée, hot spot botanique avec plus de 30 espèces protégées ;
- tourbière boisée et Forbonnet.

La géologie sous-jacente est sédimentaire. Elle est constituée de calcaires karstifiés (présence de dolines), sur lequel repose des buttes morainiques et des moraines de fond héritées du passé glaciaire. On trouve les tourbières dans les dépressions. Le site de Frasne est situé sur la dernière marche glaciaire du Würm. Les plus vieilles tourbières du secteur sont âgées d'environ 7 000 ans. Leur épaisseur varie de 1 à 7 m.

Le secteur est essentiellement alimenté par les pluies et principalement drainé par la Vallée du Drugeon. On note la présence de doline (Creux du Lard) fonctionnant en pertes sur une partie restreinte du site et pouvant potentiellement fonctionner en alimentation pour des événements ponctuels et exceptionnels (potentiel émissif à confirmer).

Points positifs	Questionnements	Équipements complémentaires et travaux envisagés
- Appui technique envisageable - Site bien circonscrit et volume intéressant - Site très encadré scientifiquement - Inscription du projet dans le Plan de Gestion de la réserve - Site déjà bien instrumenté - Nombreuses données structurées (Lidar, piézométrie...) - Apports latéraux potentiellement très limités	- Contexte karstique/glaciaire : zones de perte, apports et pertes diffuses potentiels - Site partiellement équipé et difficultés sans doute pour reconstituer le débit à l'exutoire à partir des hauteurs mesurées sur la station hydrométrique - Connaissance de la géométrie et de la pédologie à améliorer - Intégration du projet dans les actions de l'Université de Besançon et d'Orléans	Hydrologie - Installation d'un seuil jaugé à section triangulaire et 2 sondes CTD à l'exutoire (améliorer le seuil existant pour améliorer les courbes de tarage) - Installation de 2 sondes CTD dans la doline du Creux du Lard et au Lac de l'Entonnoir Géochimie / traçage - Datation des eaux de la tourbe (la tourbe est datée selon les endroits de 1 000 à 4 000 ans) - Autres traceurs naturels et artificiels (à déterminer) Géophysique - Compléter les profils existants Pédologie - Carottages pour déterminer les propriétés hydrodynamiques de la tourbe et caler la géophysique - Sondages pédologiques pour caler la géophysique Topographie - Imagerie aéroportée ? Écologie - Général - Analyse données existantes

Tableau 32 : Synthèse - Tourbière de Frasne

2.3. Tourbière de Praubert (Haute-Savoie, Saint-Paul en Chablais, 900 m)

Les zones humides du Plateau de Gavot sont organisées en réseau. L'ensemble du site de Praubert (23 ha pour la zone centrale pour une épaisseur de tourbe d'environ 5 m) est constitué de bas-marais alcalin, de tourbière basse alcaline, de tourbière de transition et de tourbière haute acide.

La géologie du plateau de Gavot (environ 40 km²) est marquée par les glaciations (contexte de marge glaciaire avec des formations morainiques déposées par le glacier lémanique). Sa structure est héritée de l'histoire glaciaire du quaternaire : retrait et avance des glaciers, dépôts fluvio-lacustres et fluvio-glaciaires. Les formations du quaternaire déposées sur le substratum (schistes, calcaires...) ont une épaisseur d'environ 200 m à Saint-Paul-en-Chablais et 500 m à Évian. On note les éléments suivants :

- le substratum est « beurré » par un placage de moraines de fond imperméables ;
- le plateau de Gavot est constitué d'une alternance : 1) de placages de moraines de fond imperméables sur lesquelles on trouve les zones humides ; 2) de dépôts fluvio-glaciaires perméables permettant l'infiltration (pluie, zone de pertes pour les cours d'eau) et la recharge. À l'interface, on trouve des sources ;
- d'une manière générale, le haut du plateau est plus infiltrant ;
- des moraines latérales et des cordons morainiques sont présents sur le plateau de Gavot, leur perméabilité est variable.

Le site de Praubert est alimenté par : 1) des apports d'eau de surface du ruisseau de Rully et de ruissellement diffus (lac de la Beunaz, Lac Noir, Etang comblé, Marais de chez Gaillet, Mont Bénand) ; 2) de probables émergences de nappes.

Points positifs	Questionnements	Équipements complémentaires et travaux envisagés
- Appui technique, assistance de terrain et compléments financiers envisageables - Facilité d'accès - Site bien circonscrit avec une surface et un volume intéressant - Bonnes connaissances géomorphologiques - 2 stages de master en cours	- Pas ou peu d'équipements - Peu de données existantes - Difficulté pour estimer les apports du bassin versant - Inconnues sur d'éventuelles fuites à travers les cordons morainiques à perméabilités variables - Station météo éloignée du site - Pas de géométrie précise de la zone humide	Hydrologie (pris en charge par CCPEVA et SAEME) - Installation de sondes si forage de nouveaux piézomètres dans la tourbière - Installation de sondes si forage de nouveaux piézomètres à l'interface encaissant/ZH (estimation des fuites des lacs du bassin versant) - Mise en place de 2 seuils jaugés (ruisseau de Coppy et ruisseau de Rully) - Estimation de la perméabilité des cordons morainiques (essais d'infiltration) Géochimie / traçage - Estimation de la perméabilité des cordons morainiques (traçage) Géophysique - Pédologie - Topographie - Écologie - Suivi odonates (Frapna) / couplage avec l'étude hydro Général - Analyse de données (sous réserve de l'équipement du site)

Tableau 33 : Synthèse - Tourbière de Praubert

2.4. Marais de Vaux (Ain, Haute-Ville Lompnes, 750 m)

Les zones humides du secteur sont constituées d'un plan d'eau aménagé (Les Lésines, 15 ha) et d'un marais de 120 ha (tourbière alcaline, résidus de tourbière acide, organo-minéral) dont l'épaisseur varie de 0 à 3 m.

La géologie sédimentaire est composée de calcaires karstifiés (nombreux gouffres et grottes sur le bassin versant) remodelés en surface par les glaciers.

Le site est complexe du point de vue des modalités d'alimentation. On note la présence d'au moins 10 émergences karstiques intermittentes ou non, de nombreux apports diffus, d'apports superficiels (bief de Vuïres et déversoir d'orage de Cormaranche en Bugey) et de pertes karstiques.

Points positifs	Questionnements	Équipements complémentaires et travaux envisagés
- Appui technique - Un exutoire bien identifié - Études hydrologiques et pédologiques - Projet de restauration hydraulique : possibilité de travailler sur l'effet des travaux sur le soutien d'étiage - Données préalables existantes (piézométrie et Lidar notamment)	- Site moyennement instrumenté et difficile à équiper (station de jaugeage) - Bassin versant très étendu et karstifié : infiltration potentielle des eaux sur la partie aval ; nombreux apports par sources et diffus - Projet de restauration hydraulique : difficulté pour le positionnement durable de l'instrumentation - Pas de géométrie de la zone humide	Hydrologie - Géochimie / traçage - Géophysique - Pédologie - Topographie - Écologie - Général - Analyse des données existantes - Appui aux gestionnaires si besoin sur des questions hydro (état de lieux avant restauration - travaux prévus en 2019) / effet du projet de restauration au bout de 5 ans) - Analyse par critères simplifiés en contexte karstique (phase 2 / phase 3)

Tableau 34 : Synthèse - Marais de Vaux

2.5. Tourbière de Montselgues (Ardèche, Montselgues, 1000 m)

La lande tourbeuse du plateau de Montselgues est morcelée en une multitude de petites tourbières dont les dimensions sont assez limitées (souvent < 10 hectares). Les épaisseurs de tourbe sont très modestes (de quelques centimètres à moins d'un mètre).

Le substratum géologique est cristallin, il est surmonté par places par des formations sédimentaires gréseuses (Trias). La configuration géomorphologique laisse supposer une relation hydraulique privilégiée entre les petites zones humides et l'encaissant rocheux (arène granitique). Les formations gréseuses (potentiellement aquifères) en position latérale et/ou surplombante par rapport aux zones humides jouent un rôle d'alimentation de ces dernières.

Points positifs	Questionnements	Équipements complémentaires et travaux envisagés
- Appui technique - Données existantes - 1 doctorat en cours	- Épaisseur faible des horizons tourbeux - Petites tourbières dont la superficie est très faible - Relations privilégiées avec les formations gréseuses - Exutoires diffus - Site difficile à équiper	Hydrologie - Géochimie / traçage - Géophysique - Pédologie - Topographie - Écologie - Général - Analyse des données existantes - Appui aux gestionnaires si besoin sur des questions hydro (estimation du réservoir) - Analyse par critères simplifiés en contexte sédimentaire et cristallin (phase 2 / phase 3)

Tableau 35 : Synthèse - Tourbière de Montselgues

Au final, l'ordre de classement des sites du plus pertinent au moins pertinent est le suivant :

1. Tourbière de Luitel ;
2. Tourbière de Frasne ;
3. Tourbière de Praubert ;
4. Marais de Vaux ;
5. Tourbière de Montselgues

Dans un premier temps, en phase 2, l'effort d'instrumentation et d'investigation sera mis en œuvre sur les sites de Luitel et de Frasne.



Figure 43 : Lac tourbière de Luitel (décembre 2016)



Figure 44 : Tourbière vivante de Frasne (mars 2017)

CONCLUSION

Cette conclusion est divisée en trois parties qui présentent de manière synthétiques :

- le bilan du travail effectué en phase 1 du projet ZHTB (avancement et points clefs) ;
- les objectifs de mise en œuvre de la phase 2 ;
- les perspectives pour la phase 3.

1. Bilan du travail de la phase 1

1.1. Avancement et taux de réalisation

La plupart des tâches prévues dans la phase 1 ont été réalisées entièrement, sinon en partie (Tableau 36). La bibliographie qui regroupe environ 200 références devra être approfondies et complétée sur la question de l'instrumentation des zones humides et sur celle des zones humides non tourbeuses. Le plan d'instrumentation des sites et le choix des variables et paramètres à étudier seront finalisés en début de phase 2 pour un démarrage en mars 2018. Les compétences nécessaires en géophysique, en géochimie et en pédologie ont d'ores et déjà bien été identifiées et mobilisées.

Seul le document de valorisation prévu n'a pas été réalisé. Nous avons toutefois rédigé une fiche de synthèse pour la Zabr (Annexe 2).

Tâches	Taux de réalisation	Remarques
État de l'art sur l'hydrologie des zones humides et les différentes typologies de zones humides	80%	À compléter en phase 2 (zones humides non tourbeuses et instrumentation pluridisciplinaire)
Contacts avec les gestionnaires et acteurs locaux	100%	-
Présélection des sites ayant déjà fait l'objet d'investigations et d'acquisition de données	100%	Sites complémentaires à sélectionner pour la phase 3
Reconnaissance de terrain sur les sites les plus intéressants	100%	-
Choix des sites	100%	-
Choix des variables et paramètres à étudier	90%	À finaliser en début de phase 2
Établissement d'un plan de suivi et d'instrumentation (protocole expérimental)	50%	À finaliser en début de phase 2
Livrables		
Rapport	100%	-
Document de valorisation du travail bibliographique	0%	Fiche Zabr phase 1
Consortium		
Sélection des compétences pour la suite du projet	90%	Compétences en écologie et en économie ?

Tableau 36 : Taux de réalisation des tâches de la phase 1

1.2. Bilan et synthèse : points clefs et points à développer

Le Tableau 37 présente de manière synthétique les points clefs pour l'étude du potentiel de soutien d'étiage des zones humides de têtes de bassins versants. Il met aussi en avant les points de vigilance et les points à développer lors de la phase 2 du projet, voire de la phase 3.

Pour la phase 2, les sites sélectionnés sont des tourbières de têtes de bassins versants. Le travail vise à établir des bilans hydrologiques de ces zones humides dans l'objectif de quantifier le soutien d'étiage. Une telle approche nécessite de bien connaître les types de zones humides qui vont être étudiées et

Conclusion

instrumentées, ainsi que leurs interactions avec l'hydrosystème afin d'estimer au mieux les sources d'alimentation en eau (flux entrant) et d'export (flux sortant). La bonne connaissance de la structure et de la géométrie 3D des zones humides étudiées est un préalable indispensable pour estimer leur potentiel de stockage/restitution d'eau au cours d'eau. L'apport de la modélisation dans ce travail pourra être prépondérant. Une fois le bilan hydrologique « bouclé », il restera encore à statuer sur le soutien d'étiage à partir d'un référentiel non encore déterminé et à construire. Dès lors, il sera possible de raisonner en termes d'indicateurs (cf : 3.5 Indicateurs hydrologiques p80).

	Points clefs	Points à développer ou de vigilance
Zones humides	- forte diversité de milieux - forte potentialité biologique - présence d'eau permanente ou temporaire	- différence zones humides / milieux humides - définitions différentes selon l'approche
Typologies de zones humides	- nombreuses typologies (espèce, milieu, habitat, végétation, pédologie, fonction...) - l'approche hydrogéomorphologique est la plus adaptée au projet ZHTB - le bilan hydrologique des zones humides nécessite une bonne connaissance des typologies	- types intermédiaires (milieux mixtes, mosaïques) - évolution/nouvelles des typologies - changement de type en fonction de l'évolution de la connaissance du milieu
Contexte	- présence et maintien des zones humides fortement influencés par le contexte : climatique, hydrographique, géomorphologique - fort lien hydraulique entre les zones humides et l'hydrosystème (cours d'eau, eau souterraine, réseaux de zones humides, entité hydrogéologique, zone hydrographique...)	- développement d'indicateurs contexte dépendant
Têtes de bassins versants	- milieux sensibles (notamment zones humides tourbeuses) et zones à forts enjeux - importance de l'échelle considérée	- entités difficiles à cartographier
Étude des zones humides et du soutien d'étiage	- approche interdisciplinaire - importance des approches suivantes : géomorphologie (reliefs hérités, paysage, topographie), hydrologie (origine de l'eau alimentant la zone humide, effet retard), hydrodynamique (direction, importance et variation des flux), modélisation, pédologie, géophysique et géochimie - problématiques et approches diversifiés	- à l'heure actuelle, à notre connaissance, il n'existe pas d'indicateur fiable du soutien d'étiage
Bilan hydrologique	- flux d'eau (dynamique) entrant et sortant de la zone humide - modalités d'alimentation (eau de surface, eau souterraine, pluie) / constitution d'un stock d'eau dans la zone humide en période humide - modalités de restitution (eau souterraine, eau de surface, évapotranspiration) / restitution du stock d'eau de la zone humide en période sèche - paramètres et variables d'importance : perméabilité, coefficient d'emmagasinement, teneur en eau libre, teneur en eau utile, volume de réserve, pente, gradient hydraulique, conditions aux limites...	- principe simple, mais difficultés de mise en œuvre pour les zones humides compte-tenu du grand nombre de paramètres et variables - fortes incertitudes possibles sur la quantification du soutien d'étiage
Rôle hydrologique des tourbières	- milieu poreux original : matière organique, degré de décomposition variable en fonction de la profondeur, du temps, de la végétation - caractéristiques du milieu : faible densité, grande porosité totale, larges gammes de perméabilité et de porosité efficace (décroissance exponentielle en fonction de la profondeur), structure diplotelmique (acrotelme et catotelme) - évolution du milieu (gonflement/rétraction) : temps pluriannuel (croissance végétale/décomposition), temps cyclique (variation saisonnière de la saturation en eau) / cette évolution affecte la géométrie du milieu et ses propriétés hydrodynamiques	- rôle hydrologique sujet à controverse (seul l'acrotelme semble jouer un rôle) - importance de l'interface tourbière/versant - importance de l'interface acrotelme/catotelme - importance de bien connaître la géométrie et la structuration 3D de la tourbière - rôle hydrologique d'autres types de zones humides
Soutien d'étiage et quantification	- notion hydraulicienne, fonction et service écosystémique des zones humides - lié au stockage/restitution d'eau par les zones humides - importance du soutien d'étiage en période de basses-eaux	- difficulté à séparer les contributions des différents compartiments de l'hydrosystème - difficulté à généraliser les résultats d'un site à un autre - nécessité de disposer d'un référentiel sur la qualité/quantité du soutien d'étiage - développement d'indicateurs de zones humides ou de réseaux de zones humides favorables au soutien d'étiage - intérêt de la modélisation

Tableau 37 : Synthèse des travaux de la phase 1 : points clefs et points de vigilance

2. Mise en œuvre de la phase 2

2.1. Articulation interdisciplinaire et moyens mobilisables

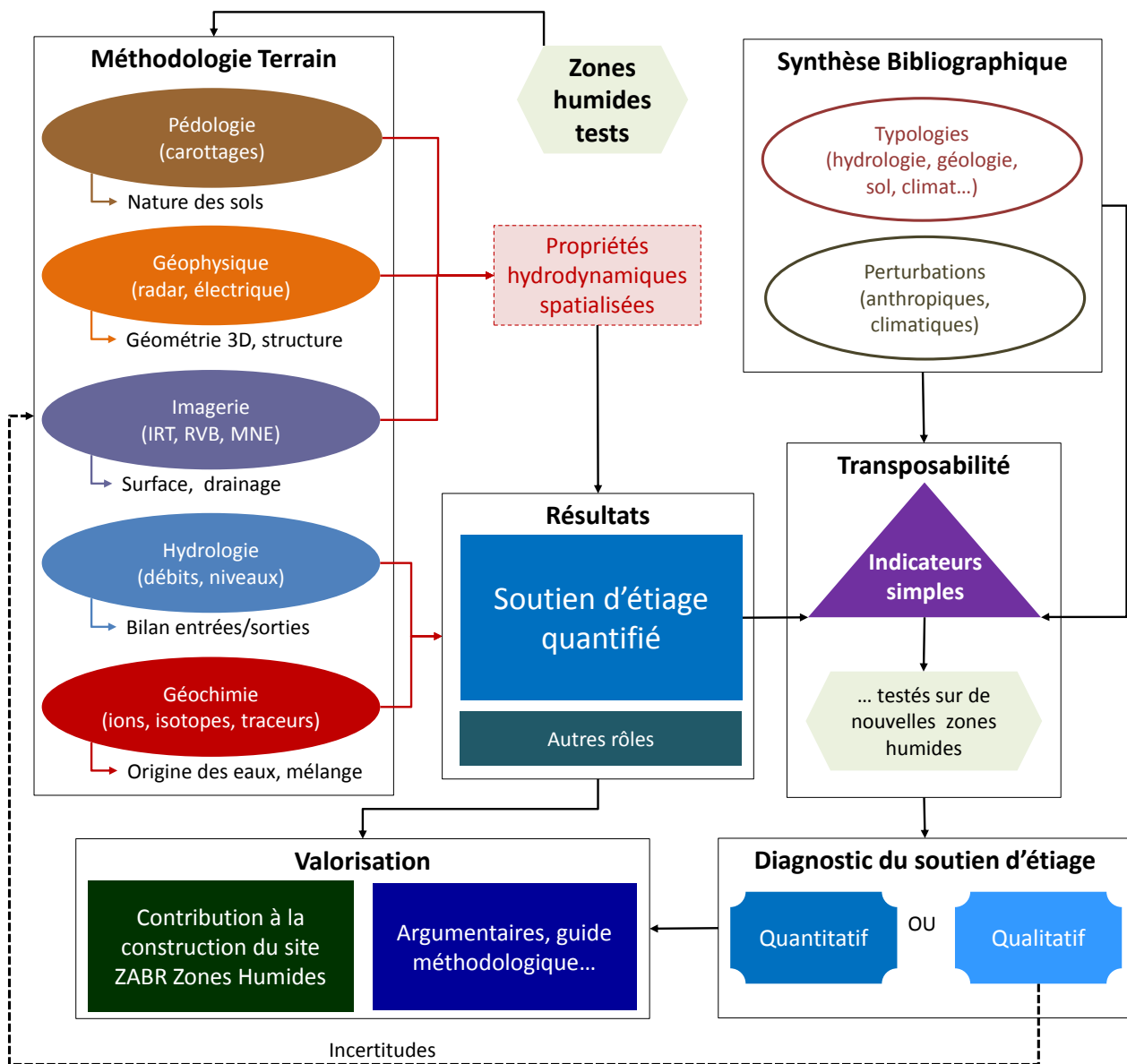


Figure 45 : Articulation interdisciplinaire de la phase 2

2.2. Valorisation des données existantes, mesures et instrumentation sur les sites d'études

Les trois grands objectifs de la phase 2 du projet ZHTB sont les suivants :

- traitement et exploitation des données hydrologiques, hydrogéologiques et biologiques (ex : odonates) existantes pour les 5 sites sélectionnés : bilans hydrologiques, corrélations statistiques spatiales et temporelles à partir des chroniques disponibles ;
- plan d'instrumentation et d'expérimentation sur les 2 sites principaux (Luitel et Frasné) pour l'acquisition d'information hydrologique/hydrogéologique, géophysique, géochimique et pédologique et début d'exploitation des données ;
- modélisation du stockage/restitution d'eau au cours d'eau des zones humides (cas théoriques ou réels si les données nécessaires sont disponibles).

2.3. Conduite des objectifs à terme

Le déroulement de la phase 2 du projet ZHTB est intégré dans la réalisation d'objectifs à terme. Ces objectifs sont les suivants :

- **Élaboration de types fonctionnels conceptuels des zones humides de têtes de bassins :**
 - typologies des zones humides de têtes de bassins versants ;
 - coupes schématiques fonctionnelles ;
 - flux entrants/flux sortants - stockage/restitution.
- **Modélisation numérique du soutien d'étiage :**
 - modèles théoriques simplifiés issues des schémas conceptuels des différents types fonctionnels conceptuels de ZHTB ou de cas réels ;
 - scénarios de modélisation tenant compte par exemple de l'influence la géométrie et des propriétés hydrodynamiques, des variations des flux entrants, des perturbations du système (ex : fossés de drainage, changement climatique...)...
- **Création d'indicateurs du soutien d'étiage :**
 - liés à des paramètres et variables clefs (ex : hydrologie, hydrogéologie, hydrodynamique, géomorphologie, hydrométéorologie...) ;
 - simples d'acquisition et d'interprétation ;
 - utilisables sous SIG si possible (analyse spatiale) ;
 - liés à des enjeux et besoins de gestion (diagnostic, suivi, restauration...).
- **Modalités de co-construction des documents de valorisation :**
 - besoins : guides, argumentaires, information
 - destinataires : scientifiques, gestionnaires, élus, grands publics...
 - types de document : plaquettes, guides méthodologiques, guides techniques, formations...
 - groupes de travail : enjeux et objectifs / besoins

3. Perspectives pour la phase 3

Le contenu de phase 3 du projet ZHTB n'est pas encore définitivement établi. Il sera élaboré à partir de mars 2018 pour le nouvel appel à projet Zabre/AE en tenant compte de l'accomplissement des résultats obtenus en phase 2. De nouveaux sites d'étude pourront être intégrés lors de cette phase 3, ainsi que de nouveaux objectifs.

- **Objectifs principaux :**
 - analyse des données existantes sur les sites d'études, interprétation du fonctionnement hydrologique de ces sites, mise en évidence du rôle de soutien d'étiage et préconisations en matière de gestion ;
 - suite de l'acquisition d'information sur les 3 sites principaux et exploitation des données au cours des cycles hydrologiques correspondants ;
 - analyse et synthèse des données acquises en phases 2.

- **Spatialisation du fonctionnement des zones humides :**
 - critères de présence, de maintien et d'évolution des zones humides favorables au soutien d'étiage (ex : géomorphologique, géologique, climatique...) ;
 - enrichissement du concept d'espace de bon fonctionnement des zones humides.

- **Autres compétences potentielles à intégrer en phase 3 :**
 - analyse spatiale : modèles spatiaux prédictifs de répartition de zones humides (Université Jean Monnet de Saint-Etienne - UMR 5600 EVS)
 - aspects sociaux : perceptions, enjeux, besoins (ENS Lyon - UMR 5600 EVS)
 - indicateurs paysagers (ENP Blois, Zal)
 - indicateurs écologiques (Irstea)
 - quantification de services écosystémiques (Univ. Besançon et Orléans)

- **Autres sites à intégrer en phase 3 :**
 - autres sites complémentaires (analyse de données, test des indicateurs simplifiés) ;
 - zones humides de l'Aude (lien accord cadre AE-RMC-ONF). Un accord cadre AE-RMC/ONF concernant l'étude des zones humides du bassin versant de l'Aude a été signé en 2017. Une articulation entre cette étude et le projet ZHTB est envisagée pour la phase 3. Toutefois, dès la phase 2 du projet ZHTB des échanges et des réunions de travail sont envisagées : 1) information sur le contexte, les spécificités et les problématiques des zones humides de l'Aude ; 2) assistance méthodologique à l'ONF pour l'étude de ces zones humides ; 3) visite de terrain.

Références Bibliographiques

Contexte, définitions et typologies

AFB (2017) Recueil, Besoins de développements en matière de surveillance et d'évaluation DCE de l'état des eaux et des milieux aquatiques. Version 1, 20 avril 2017, 31p.

Afes (2008) Référentiel pédologique. Quae, Versailles, 432 p.

Agence de l'eau Loire-Bretagne (2005) L'inventaire des zones humides dans les Sage. Guide méthodologique, 43p.

Agence de l'eau Loire-Bretagne (2011) Guide d'analyse économique, zones humides : évaluation des services rendus, analyse sur sept sites tests du bassin Loire-Bretagne, 83p + annexes.

Agence de l'eau Loire-Bretagne (2015) Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (Sdage) du bassin Loire-Bretagne 2016-2021, 454p.

Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse (2000) Note technique Sdage n°5, Agir pour les zones humides en RMC, Politique d'inventaires : objectifs et méthodologie, 35p.

Auterives C., Allier D., Pinson S. (2012) Proposition d'une méthodologie d'identification des liens eau souterraine et écosystèmes terrestres. Rapport final. BRGM/RP-61677-FR, 85p.

Baize D., Girard M.C (2008) Référentiel pédologique 2008. Association française pour l'étude des sols. Versailles, Éditions Quae, 435 p.

Baize D., Jabiol B. (1995) Guide pour la description des Sols. Collection Techniques et Pratiques. INRA édition, 375 p.

Bardat J., Bioret F., Botineau M., Boullet V., Delpech R., Géhu J.M., Haury J., Lacoste A., Rameau J.C., Royer J.M., Roux G. et Touffet J. (2004) Prodrome des végétations de France. Collection Patrimoines Naturels 61, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 171 p.

Bernard P. (1994) Les zones humides – Rapport d'évaluation. La documentation française, Paris, 396p.
http://www.zones-humides.eaufrance.fr/sites/default/files/a9r8.tmp_.pdf

Bissardon M., Guibal L. et Rameau J.C. (1997) Corine Biotopes. Version originale Types d'habitats français. Engref, Aten. 175 p.

Brinson M.M. (1993) A Hydrogeomorphic Classification for Wetlands. Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-4, US Army Corps of Engineers, Final report, 103p.

Brinson M.M., Rheinhardt R.D., Richard Hauer F., Lee L.C., Nutter W.L., Smith R.D., Whigham D. (1993) A Guidebook for Application of Hydrogeomorphic Assessments to Riverine Wetlands. Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-11, US Army Corps of Engineers, Final report, 219p.

Brooks R.P., Brinson M.M., Wardrop D.H., Bishop J.A. (2013) Hydrogeomorphic (HGM) Classification, Inventory, and Reference Wetlands in R.P. Brooks and D.H. Wardrop (eds.), Mid-Atlantic Freshwater Wetlands: Advances in Wetlands Science, Management, Policy, and Practice, DOI 10.1007/978-1-4614-5596-7_2, Springer Science+Business Media New York 2013, pp39-59.

Chambaud F., Lucas J., Oberti D. (2002) Guide pour la reconnaissance des zones humides du bassin R Rhône – Méditerranée. Volume 1 : méthode et clés d'identification. Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse, 138p + annexes.

Références bibliographiques

Chambaud F, Lucas J., Oberti D. (2002) Guide pour la reconnaissance des zones humides du bassin R Rhône – Méditerranée. Volume 2 : fiches écorégions et clés d'identification. Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse, 264p.

Cizel O. (2010) Protection et gestion des espaces humides et aquatiques. Guide juridique, Pôle-relais Lagunes, GHZH, Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse.

Clair M., Gaudillat V., Michez N. & Poncet L., 2017. HABREF v3.1, référentiel des typologies d'habitats et de végétation pour la France. Guide méthodologique. Rapport SPN 2017-1. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 60 p.

Collectif RhoMéO (2014) La boîte à outils de suivi des zones humides du bassin Rhône-Méditerranée. Version 1. Conservatoire d'espaces naturels de Savoie. 147 pages + annexes
www.rhomeo-bao.fr

Cubizolle H., Etlicher B. et Porteret J. (2013) Modélisation de la répartition géographique des tourbières à partir des données géologiques, topographiques et géomorphologiques : application au Massif central oriental (France). Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 19 - n° 2, pp. 165-180.

Duranel A. (2016) Étude bibliographique relative à l'évaluation des services écosystémiques rendus par les têtes de bassin et proposition d'une approche expérimentale. Rapport final. EPTB Vienne, 157p.

Ecosphère (2006) Délimitation de l'espace fonctionnel par fonction et par type de zones humides du bassin Rhône Méditerranée, les fonctions des zones humides : Synthèse bibliographique, Agence de l'eau RMC, 132p.

EU (2003) Guidance Document No 12. Horizontal Guidance on the Role of Wetlands in the Water Framework Directive.

EU (2009) Guidance Document No18. Guidance on groundwater status and trend assessment.

EU (2011a) Technical Report No. 6. Technical Report on Groundwater Dependent Terrestrial Ecosystems.

EU (2011b) Links between the Water Framework Directive and Nature Directives. Links between the Water Framework Directive (WFD 2000/60/EC) and Nature Directives (Birds Directive 2009/147/EC and Habitats Directive 92/43/EEC). Frequently Asked Questions.

EU (2014) Technical Report N°8. Technical report on methodologies used for assessing groundwater dependent terrestrial ecosystems. Technical Report 2014-081.

Farinha J.C., Costa L.T., Zalidis G., Mantzavelas A., Fitoka E., Hecker N., Tomàs Vives P. (1996) Mediterranean Wetland Inventory: Data Recording. MedWet / Instituto da Conservação da Natureza / Wetlands International publication. Volume III

Forum des Marais Atlantiques (2013) Boîte à Outils "Zones Humides", Agence de l'eau Seine-Normandie, 272 p.
www.forum-marais-atl.com/boite-outils-zones-humides.html ou www.aesn.fr

Frazier S. (1999) Vue d'ensemble des sites Ramsar, Wetlands international, 2^e éd., 42 p.

Gayet, G., Baptist, F., Baraille, L., Caessteker, P., Clément, J.-C., Gaillard J., Gaucherand, S., Isselin-Nondedeu, F., Poinot C., Quétier, F., Touroult, J., Barnaud, G. (2016) Guide de la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides - version 1.0. Onema, collection Guides et protocoles, 186 p.

Gayet, G., Baptist, F., Baraille, L., Caessteker, P., Clément, J.-C., Gaillard J., Gaucherand, S., Isselin-Nondedeu, F., Poinot C., Quétier, F., Touroult, J., Barnaud, G. (2016) Méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides – version 1.0. Fondements théoriques, scientifiques et techniques. Onema, MNHN, 310p. Rapport SPN 2016 – 91.

- Geppa (Groupe d'étude des problèmes de pédologie appliquée) (1981) Synthèse des travaux de la commission de cartographie 1970-1981, Doc. Multicopié, 20 p.
- Kimberley S., Coxon C. (2011) Evaluating the Influence of Groundwater Pressures on Groundwater-Dependent Wetlands. Report Series No.100, Ireland EPA, 77p.
- Louvel J., Gaudillat V. et Poncet L. (2013) Eunis, European Nature Information System, Système d'information européen sur la nature. Classification des habitats. Traduction française. Habitats terrestres et d'eau douce. MNHN-DIREV-SPN, MEDDE, Paris, 289 p.
<http://inpn.mnhn.fr>
- Manneville O., Vergne V., Villepoux O. (1999) *Le monde des tourbières et des marais*. Delachaux et Niestlé ed. Lausanne (Switzerland)-Paris, 320p.
- Mazagol P.O., Martin R., Porteret J., Thyriot C., Etlicher B. (2008) Pré-détermination de zones humides sur le bassin Loire-Bretagne. In SIG 2008 : Conférence francophone ESRI, 1er et 2 octobre 2008, Versailles, p. 19. ESRI, Meudon, France.
- Medde, Gis Sol (2013). Guide pour l'identification et la délimitation des sols de zones humides. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, 63 pages.
- MNHN-SPN (2015) -1. Service du Patrimoine Naturel, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris, 10p.
- Moreau S. (2012) Résultats de l'enquête nationale à dire d'experts sur les zones humides État en 2010 et évolution entre 2000 et 2010 (2012). Étude et documents n°70, octobre 2012, Commissariat général au développement durable, 96p.
http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Etudes_et_documents/2012/ed70-zone-humides.pdf
- NRCS (2008) Hydrogeomorphic Wetland Classification System: An Overview and Modification to Better Meet the Needs of the Natural Resources Conservation Service. Technical Note No. 190–8–76, 8p.
- PNRZH (2005) Caractérisation des zones humides. Cahier Thématique, 70p.
- Puissauve R., Hérard K. (2015) Liste préliminaire des sites Natura 2000 pour l'actualisation du Registre des zones protégées de la Directive cadre sur l'eau (2015) Note méthodologique.
- Ramsar (2015) Note d'information Ramsar No7 - État des zones humides du monde et des services qu'elles fournissent à l'humanité : compilation d'analyses récentes. 12^e Session de la Conférence des Parties à la Convention sur les zones humides (Ramsar, Iran, 1971), Punta del Este, Uruguay, 1 au 9 juin 2015.
https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/cop12_doc23_bn7_sowws_f.pdf
- Sandre (2014) Dictionnaire des données - Description des milieux humides (Version 2), 63p.
- Smith R.D., Ammann A., Bartoldus C., Brinson M.M. (1995) An Approach for Assessing Wetland Functions Using Hydrogeomorphic Classification, Reference Wetlands, and Functional Indices. Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-9, US Army Corps of Engineers, Final report, 90p.
- Smith R.D., Noble C.V., Berkowitz J.F. (2013) Hydrogeomorphic (HGM) Approach to Assessing Wetland Functions: Guidelines for Developing Guidebooks (Version 2). Wetlands Regulatory Assistance Program, US Army Corps of Engineers, 182p.
- U.S. EPA (2002) Methods for Evaluating Wetland Condition: Wetlands Classification. Office of Water, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC. EPA-822-R-02-017.

Références bibliographiques

Ximenès M.C., Fouque C., Barnaud G. (2007) État 2000 et évolution 1990-2000 des zones humides d'importance majeure (Document technique IFEN-ONCFS-MNHN-FNC). Orléans, Ifen. 136 p. + annexes.
<http://www.ifen.fr> (rubrique "Territoire">"Zones humides">"En savoir plus")

Bilan et rôle hydrologique

Abat M., McLaughlin M.J., Kirby J.K., Stacey S.P., 2012. Adsorption and desorption of copper and zinc in tropical peat soils of Sarawak, Malaysia. *Geoderma* 176, 58–63.

Acreman M., Holden J., 2013. How wetlands affect floods. *Wetlands*, 33 (5). 773-786. 10.1007/s13157-013-0473-2, 44p.

Acreman M.C., Harding R.J., Lloyd C., McNamara N.P., Mountford J.O., Mould D.J., Purse B.V., Heard M.S., Stratford C.J., Dury S. 2011. Trade-off in ecosystem services of the Somerset Levels and Moors wetlands. *Hydrological Sciences Journal*, 56, 1543–1565.

Asp K., 2009. Water Storage Capacity and Flow Dynamics in a Papyrus Wetland, Uganda. – Implications for Studies of Water Treatment Effects. Degree project work in environmental science. University of Kalmar School of Pure and Applied Natural Sciences, 36p.

Baden W., Eggelsmann R., 1964. Der Wasserkreislauf eines Nordwestdeutschen Hochmoores (Water Circulation in a Northwest German High Moor). *Schriftenreihe des Kuratoriums für Kulturbauwesen* 12, Verlag Wasser und Boden, Hamburg, 155 pp. (in German).

Baird A. J., Gaffney S. W. et Armstrong A. C., 1996. Short communication "Hydrological model of peat-mound form with vertically varying hydraulic conductivity" By A.C. Armstrong : Discussion. Peat mounds with non-uniform properties : Reply. In *Earth surface processes and landforms*, 21 (8), p 765-771.

Baird A. J., Waldron S., 2003. Shallow horizontal groundwater flow in peatlands is reduced by bacteriogenic gas production. In *Geophysical Research Letters*, 30 (20), p 1-4.

Baird A.J., 1997. Field estimation of macropore functioning and surface hydraulic conductivity in a fen peat. *Hydrol. Process.* 11, 287–295.

Baldock, J.A., Oades, J.M., Nelson, P.N., Skene, T.M., Golchin, A., Clarke, P., 1997. Assessing the extent of decomposition of natural organic materials using solid-state ¹³C NMR spectroscopy. *Aust. J. Soil Res.* 35, 1061–1083.

Bay R. 1969. Runoff from small peatland watersheds. *Journal of Hydrology*, 9, pp. 90-102.

Beckwith C.W., Baird A.J., Heathwaite A.L., 2003a. Anisotropy and depth-related heterogeneity of hydraulic conductivity in a bog peat. I: laboratory measurements. *Hydrol. Process.* 17, 89–101.

Beckwith C.W., Baird A.J., Heathwaite A.L., 2003b. Anisotropy and depth-related heterogeneity of hydraulic conductivity in a bog peat. II: modelling the effects on groundwater flow. *Hydrol. Process.* 17, 103–113.

Blodau C., Siems M., Beer J., 2011. Experimental burial inhibits methanogenesis and anaerobic decomposition in water saturated peats. *Environ. Sci. Technol.* 45, 9984–9989.

Boelter D.H., 1965. Hydraulic conductivity of peats. *Soil Sci.* 100, 606–609.

Boelter D.H., 1968. Important physical properties of peat materials. *Proceedings of the 3rd International Peat Congress, Québec*, pp. 150–154.

Boelter D.H., 1969. Physical properties of peat as related to degree of decomposition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 33, 606–609.

Boudreau, J., Caron, J., Elrick, D., Fortin, J., Gailichand, J., 2009. Solute transport in sub-irrigated peat-based growing media. *Can. J. Soil Sci.* 89, 301–313.

Références bibliographiques

- Bougon N., Aquilina L., Briand M.P., Coedel S., Vandenkoornhuyse P., 2009. Influence of hydrological fluxes on the structure of nitrate-reducing bacteria communities in a peatland. *Soil Biol. Biochem.* 41, 1289–1300.
- Boussinesq, J., 1877. Essai sur la théorie des eaux courantes du mouvement non permanent des eaux souterraines. *Acad. Sci. Inst. Fr.* 23, 252–260.
- Boussinesq, J., 1903. Sur un mode simple d'écoulement des nappes d'eau d'infiltration à lit horizontal, avec rebord vertical tout autour lorsqu'une partie de ce rebord est enlevée depuis la surface jusqu'au fond. *C. R. Acad. Sci.* 137, 5–11.
- Boussinesq, J., 1904. Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources, *J. Math. Pure Appl.*, 10, 5-78.
- Bragazza L., Parisod J., Buttler A., Bardgett R.D., 2013. Biogeochemical plant–soil microbe feedback in response to climate warming in peatlands. *Nat. Clim. Chang.* 3, 273–277.
- Bridgman S.D., Updegraff K., Pastor J., 1998. Carbon, nitrogen, and phosphorus mineralization in northern wetlands. *Ecology* 79, 1545–1561.
- Cao J., Tian Y., Zha T., Yang X., Wang X., 2014. Carbon allocation dynamics across three different aged *Platycladus orientalis* (L.) Franco plantations. *For. Chron.* 90, 161–168.
- Chapman T.G., Maxwell A., 1996. Baseflow separation – comparison of numerical methods with tracer experiments. Institute Engineers Australia National Conference. Publ. 96/05, 539-545.
- Charman D., 2002. Peatlands and environmental changes. Edition Wiley, London, 301p.
- Chason D. B., 1986. Hydraulic conductivity and related physical properties of peat, lost river eatland, northern Minnesota. In *Soil Science*, 142, p 91-99.
- Clymo R. S., 2004. Hydraulic conductivity of peat at Ellergower Moss, Scotland. *Hydrol. Process.* 18, 261–274, 14p.
- Coutagne, A., 1948. Météorologie et hydrologie - Etude générale des débits et des facteurs qui les conditionnent, *La Houille Blanche*, 3, 228-245, doi:10.1051/lhb/1948035.
- Deiss J., Byers C., Clover D., Amore D., Love A., Menzies M.A., Powell J., Walter T.M., 2004. Transport of lead and diesel fuel through a peat soil near Juneau, AK: a pilot study. *J. Contam. Hydrol.* 74, 1–18.
- Demissie M., Khan A., 1993. Influence of wetlands on streamflow in Illinois. Contract report 561 prepared for the Illinois Department of Conservation. ISSN 0733-3927, 57p.
- Dewandel B., Lachassagne P., Bakalowicz M., Weng Ph., Al-Malki A. 2002. Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs, Application to the Oman ophiolite hardrock aquifer, *Journal of hydrology*, 274, 248-269.
- Drexel R.T., Haitzer M., Ryan J.N., Aiken G.R., Nagy K.L., 2002. Mercury(II) sorption to two Florida Everglades peats: evidence for strong and weak binding and competition by dissolved organic matter released from the peat. *Environ. Sci. Technol.* 36, 4058–4064.
- Dumontet S., Levesque M., Mathur S.P., 1990. Limited downward migration of pollutant metals (Cu, Zn, Ni, and Pb) in acidic virgin peat soils near a smelter. *Water Air Soil Pollut.* 49, 329–342.
- Dzikowski M., Laplace-Dolonde A., 2001. Fonctionnement hydrologique des tourbières, du bassin versant à l'histosol. Programme National de Recherches sur les Zones Humides (PNRZH) Projet n°16 - tourbières de France, Lyon, 104 p.

- Eckhardt, K., 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation, *Hydrol.Process.*, 19(2), 507-515, doi:10.1002/hyp.5675.
- Eggelsmann R., 1964. Verlauf der grundwasserströmung in entwässertenn mooren. *Deutch Bodenkdl. Ges. (2)* : 129-139.
- Eggelsmann R., 1971. Über den hydrologischen Einfluß der Moore. *Telma*, 1, pp. 37-48.
- Eggelsmann R., Heathwaite A.L., Grosse-Brauckmann G., Kuster E., Naucke W., Schuch M., Schweickle V. 1993. Physical processes and properties of mires. In *Mires: process, exploitation, and conservation* (eds A.L. Heathwaite & K. Göttlich), pp. 171–262. Wiley, Chichester, UK.
- Evans M.G., Burt T. P., Holden J., Adamson J.K., 1999. Runoff generation and water table fluctuations in blanket peat: evidence from UK data spanning the dry summer of 1995. *Journal of Hydrology*, 221, 141–160.
- Freeman C., Liska G., Ostle N.J., Lock M.A., Hughes S., Reynolds B., Hudson J., 1997. Enzymes and biogeochemical cycling in wetlands during a simulated drought. *Biogeochemistry* 39, 177–187.
- Frezze R. A., Cherry J. A., 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, 604p.
- Gilman K., Newson M.D., 1980. *Soil pipes and pipeflow. A hydrological study in upland Wales*. GeoBooks, Cambridge, UK.
- Gilvear D.J., Bradley C., 2009. Hydrological dynamics II: groundwater and hydrological connectivity. In *The Wetlands Handbook* (eds E. Maltby & T. Barker), pp. 169–193. Wiley-Blackwell, Chichester, UK.
- Gilvear D.J., McInnes R.J., 1994. Wetland hydrological vulnerability and the use of classification procedures: a Scottish case study. *Journal of Environmental Management*, 42, 403–414.
- Glaser P.H., Siegel D.I., Romanowicz E.A., Shen Y.P., 1997. Regional linkages between raised bogs and the climate, groundwater, and landscape of north-western Minnesota. *Journal of Ecology*, 85, 3–16.
- Gleason R. A., Tangen B. A., Laubhan M. K., Kermes K. E., Euliss Jr., Ned H., 2007. Estimating Water Storage Capacity of Existing and Potentially Restorable Wetland Depressions in a Subbasin of the Red River of the North. *USGS Northern Prairie Wildlife Research Center*. Paper 89, 45p.
- Gobat J.-M., Grosvernier Ph., Matthey Y., Buttler A., 1991. Un triangle granulométrique pour les tourbes : analyse semi-automatique et représentation graphique. *Science du sol*, Vol. 29, 1, 23-35, 14p.
- Grover S.P.P., Bladock J.A., 2013. The link between peat hydrology and decomposition: Beyond von Post. *Journal of Hydrology* 479 (2013) 130–138.
- Gustard A., Demuth S., 2008. *Manual on Low-Flow Estimation and Prediction*, Operational Hydrology Report n°50 - WMO n°1029.
- Hayward P.M., Clymo R.S., 1982. Profiles of water content and pore size in Sphagnum peat, and their relation to peat bog ecology. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. B* 215, 299–325.
- Heikurainen L., 1963. On using ground water table fluctuations for measuring evapotranspiration. *Acta Forestalia Fennica* 75 (5) : 1-15.
- Hemond H. F. et Goldman J. C., 1985. On non-darcian water flow in peat. In *Journal of Ecology*, 73 (2), p 579-584.
- Hill B.M., Siegel D.I., 1991. Groundwater flow and the metal content of peat. *J. Hydrol.* 123, 211–224.
- Hoag R.S., Price J.S., 1995. A field-scale, natural gradient solute transport experiment in peat at a Newfoundland blanket bog. *J. Hydrol.* 172, 171–184.

Références bibliographiques

- Hoag R.S., Price J.S., 1997. The effects of matrix diffusion on solute transport and retardation in undisturbed peat in laboratory columns. *J. Contam. Hydrol.* 28, 193–205.
- Hobbs N. B., 1986. Mire morphology and the properties and behaviour of some british and foreign peats. In *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 19, p 7-80.
- Holden J. et Burt T.P., 2003. Runoff production in blanket peat covered catchments. *Water Resources Research*, 39, 1191.
- Holden J., Burt T. P., Cox N. J., 2001. Macroporosity and infiltration in blanket peat : The implications of tension disc infiltrometer measurement. In *Hydrological Processes*, 15, p 289-303.
- Holden J., Burt T.P., 2002. Piping and pipeflow in a deep peat catchment. *Catena*, 48, 163–199.
- Holden J., Chapman P.J., Labadz J.C., 2004. Artificial drainage of peatlands: hydrological and hydrochemical process and wetland restoration. *Progress in Physical Geography*, vol. 28, n° 1, p. 95-123.
- Holden, J. 2006. Peatland hydrology. In *Peatlands: Evolution and records of environmental and climate changes* (eds I.P. Martini, A. Martinez Cortizas & W. Chesworth), pp. 319–346. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Ingram H. A. P., 1983. Hydrology. In : GORE A. J. P. *Mires : Swamp, bog, fen and moor*, Amsterdam, p 67-158.
- Ingram, H.A.P. 1982. Size and shape in raised mire ecosystems: a geophysical model. *Nature*, 297, 300–303.
- Ivanov K. E., 1981. Water movement in mirelands. Academic Press, London, 276 p.
- Jaenicke J., Wösten H., Budiman A., Siebert F., 2010. Planning hydrological restoration of peatlands in Indonesia to mitigate carbon dioxide emissions. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15, 223–239.
- Jordan R.N., Young D.R., Hawthorn W.E., 1997. Enhanced mobility of Pb in the presence of dissolved natural organic matter. *J. Contam. Hydrol.* 29, 59–80.
- Juliano K., Simonovic S. P., 1999. The impact of wetlands on flood control in the red river valley of Manitoba. Final Report to International Joint Commission, 75p.
- Keefe S.H., Barber L.B., Runkel R.L., Ryan J.N., McKnight D.M., Wass R.D., 2004. Conservative and reactive solute transport in constructed wetlands. *Water Resour. Res.* 40, W01201.
- Kellner E., Halldin S., 2002. Water budget and surface-layer water storage in a Sphagnum bog in central Sweden. *Hydrol. Process.* 16, 87–103.
- Kennedy G.W., Price J.S., 2005. A conceptual model of volume-change controls on the hydrology of cutover peats. *J. Hydrol.* 302, 13–27.
- Kettridge N., Baird A.J., 2010. Simulating the thermal behavior of northern peatlands with a 3-D microtopography. *J. Geophys. Res.* 115, G03009.
- Kettridge N., Binley A., 2011. Characterization of peat structure using X-ray computed tomography and its control on the ebullition of biogenic gas bubbles. *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 116, G01024
- Koerselman W., Van Kerkhoven M.B., Verhoeven J.T.A., 1993. Release of inorganic N, P, and K in peat soils; effect of temperature, water chemistry and water level. *Biogeochemistry* 20, 63–81.
- Krasnostein A. L., Oldman C. E., 2004. Predicting wetland water storage. *Water Resources Research*, Vol. 40, W10203, Doi:10.1029/2003wr002899, 12p.

- Krueger J.P., Leifeld J., Glatzel S., Szidat S., Alewell C., 2015. Biogeochemical indicators of peatland degradation — a case study of a temperate bog in northern Germany. *Biogeosciences* 12, 2861–2871.
- Kruse J., Lennartz B., Leinweber P., 2008. A modified method for measuring saturated hydraulic conductivity and anisotropy of peat samples. *Wetlands* 29, 527–531.
- Kuhry P., Vitt D.H., 1996. Fossil carbon/nitrogen ratios as a measure of peat decomposition. *Ecology* 77, 271–275.
- Lang C., 2007. Étiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. Université de Metz, 375p.
- Laplace-Dolonde A., 2001. Fonctionnement hydrologique et diversité typologique ; approche écologiques et socio-économiques ; applications pour une stratégie de conservation et de gestion. Programme National de Recherche sur les Zones Humides, Ministère de l'Environnement, Agences de l'Eau, GIP Hydrosystèmes, BRGM, Université Lyon 2, p 12-34.
- Lewis C., Albertson J.D., Xu X., Kiely G., 2012. Spatial variability of hydraulic conductivity and bulk density along a blanket peatland hillslope. *Hydrol. Process.* 26, 1527–1537.
- Lishtvan, I.I., Kroll, N.T., 1975. Basic Properties of Peat and Methods for Their Determination. Nauka i Tekhnika, Minsk, Byelorusse.
- Lodenius M., Seppanen A., Uusi Rauva A., 1983. Adsorption and mobilization of mercury in peat soil. *Chemosphere* 12, 1571–1581.
- Lowry C.S, Fratta D., Anderson M.P. (2009) Ground penetrating radar and spring formation in a groundwater dominated peat wetland. *Journal of Hydrology* 373, 68–79.
- Lynn W.C., Mckinzie W.E., Grossman R.B., 1974. Field laboratory tests for characterization of histosols. In: Aandahl, A.R., Buol, S.W., Hill, D.E., Bailey, H.H. (Eds.), *Histosols: Their Characteristics, Classification, and Use*. Soil Science Society of America Inc, Madison, Wisconsin, pp. 11–20.
- Macko S.A., Engel M.H., Hartley G., Hatcher P., Helleur R., Jackman P., Silfer J.A., 1991. Isotopic compositions of individual carbohydrates as indicators of early diagenesis of organic matter in peat. *Chem. Geol.* 93, 147–161.
- Maillet E., 1905. *Essais d'hydraulique souterraine et fluviale*, pp. 218, Librairie Sci., A. Hermann, Paris. ISBN-13: 978-1161872910
- Malterer T.J., Verry E.S., Erjavec J., 1992. Fiber content and degree of decomposition in peats: review of National Methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1200–1211.
- Mangin, A., 1970. Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrues et tarissement, *Annale de spéléologie* 25(3), 581-610.
- Martin C., Didon-Lescot J.-F., 2007. Influence d'une tourbière de moyenne montagne sur les écoulements : le cas de la tourbière des Sagnes sur le Mont-Lozère. *Études de géographie physique* n°34 : 27-41.
- Martin C., Didon-Lescot J.-F., Vincent M., 2002. Étude du fonctionnement hydrologique des zones humides du mont-lozère : l'exemple de la tourbière des sagnes. *Études de géographie physique* n°29, pp. 15-43.
- Martin C., Dugueperoux F., Didon-Lescot J.-F., 2008. Fonctionnement hydrologique d'une tourbière drainée: la plaine de la Sénagrière (Lozère). *Études de géographie physique* n°35 : 3-23.

Références bibliographiques

- Mbuyu N., 1989. Etude des paramètres influençant les relations pluie-débit. Modèle de prévision des crues. Application aux bassins alimentant le lac d'Eupen : Helle, Getz et Vesdre. Thèse de doctorat en Sciences géographiques, Université de Liège, 302 p.
- Menot G., Bums S.J., 2001. Carbon isotopes in ombrogenic peat bog plants as climatic indicators: calibration from an altitudinal transect in Switzerland. *Org. Geochem.* 32, 233-24.
- Moers M.E.C., Baas M., Boon M.J.J., de Leeuw J.W., 1990. Molecular characterization of total organic matter and carbohydrates in peat samples from a cypress swamp by pyrolysis-mass spectrometry and wet-chemical analysis. *Biogeochemistry* 11, 251-277.
- Moore T.R., Dalva M., 1993. The influence of temperature and water table position on methane and carbon dioxide emissions from laboratory columns of peatland soils. *J. Soil Sci.* 44, 65-664.
- Newson M., 1976. Soil piping in upland Wales : a call for more information. *Cambria: a Welsh Geographical Review*, 3, 33-39.
- Novokov S. M., 1963. Raschety vodnogo rezhima i vodnogo balansa nizinykh bolot i ryamov yuzhnoy chasti zapadno-sibirskoy nizmennosti (computations of the water regime and the water balance of the fens and mosses mires of the southern part of the west siberian lowlands). *Trudy gos. gridol. inst.* 105 : 5-44.
- Nys L., 1962. À propos de travaux récents sur l'hydrologie des tourbières. *Bulletin de la Société belge de Géologie, Paléontologie, Hydrologie LXX* (2), pp. 97-103.
- Oberlin G. 2000. Le contrôle des crues. In : *Fonctions et valeurs des zones humides (FUSTEC E., LEFEUVRE J.C. et coll.)*, Édit. DUNOD, Paris, p. 83-105.
- Ours D.P., Siegel D.I., Glaser P.H., 1997. Chemical dilation and the dual porosity of humified bog peat. *J. Hydrol.* 196, 348-360.
- Porteret J., 2007. Etude du fonctionnement hydrologique d'une tourbière basse du nord-est du Massif Central français : la Prenarde dans les Monts du Forez. Actes du colloque : Origines, dynamiques et conservation des tourbières, Oct 2005, Château de Goutelas, France. Publication de l'Université de Saint Etienne, 31p.
- Porteret J., 2008. Fonctionnement hydrologique des têtes de bassin versant tourbeuses du Nord-Est du Massif central. Thèse de doctorat, Université de Saint-Etienne, 413p.
- Porteret J., 2010. Capacité de stockage de l'eau et rôle des tourbières basses minérotrophes dans le fonctionnement des têtes de bassin versant. *Coll. Tourbières, Ann. Sci. Rés. Bios. Trans. Vosges du Nord-Pfälzerwald* — 15 (2009-2010) : 207 – 229.
- Preston M.D., Smemo K.A., McLaughlin J.W., Basiliko N., 2012. Peatland microbial communities and decomposition processes in the James Bay lowlands, Canada. *Front. Microbiol.* 3, 70.
- Price J. S., 2001. L'hydrologie. In S. PAYETTE et L. ROCHEFORT, *L'écologie des tourbières du Québec-Labrador*, Presses Universitaires de Laval, 621p.
- Price J. S., et Schlotahauer S. M., 1999. Importance of shrinkage and compression in determining water storage changes in peat : The case of mined peatland. In *Hydrological Processes*, 13, p 2591-2601.
- Price J. S., Heathwaite A. L. et Baird A., 2003. Hydrological Processes in abandoned and restored peatlands. In *Wetlands and ecological management*, 11, p 65-83.
- Price J.S., 1992. Blanket bog in Newfoundland. Part 2. Hydrological processes. *Journal of Hydrology*, 135, 103-119.

- Price J.S., Whittington P.N., Elrick D.E., Strack M., Brunet N., Faux E., 2008. A method to determine unsaturated hydraulic conductivity in living and undecomposed sphagnum moss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 15, 487–491.
- Price J.S., Woo M.K., 1988. Wetlands as waste repositories? Solute transport in peat. *Proc. Nat. Student Conference on Northern Studies*, 18–19 November 1986. Assoc. of Canadian Universities for Northern Studies, Ottawa, Ont., pp. 392–395.
- Quinton W.L., Elliot T., Price J.S., Rezanezhad F., Heck R., 2009. Measuring physical and hydraulic properties of peat from X-ray tomography. *Geoderma* 153, 269–277.
- Quinton W.L., Gray D.M., Marsh P., 2000. Subsurface drainage from hummock-covered hillslope in the Arctic tundra. *J. Hydrol.* 237, 113–125.
- Quinton W.L., Hayashi M., Carey S.K., 2008. Peat hydraulic conductivity in cold regions and its relation to pore size and geometry. *Hydrol. Process.* 22, 2829–2837.
- Quinton W.L., Hayashi M., Pietroniro A., 2003. Connectivity and storage functions of channel fens and flat bogs in northern basins. *Hydrological Processes*, 17, 3665–3684.
- Reeve A.S., Siegel D.I., Glaser P.H., 2001. Simulating dispersive mixing in large peatlands. *J. Hydrol.* 242, 103–114.
- Rezanezhad F., Andersen R., Pouliot R., Price J.S., Rochefort L., Graf M., 2012a. How fen vegetation structure affects the transport of oil sands process-affected waters. *Wetlands* 32, 557–570.
- Rezanezhad F., Price J. S., Quinton W. L., Lennartz B., Milojevic T., Van Cappellen P., 2016. Structure of peat soils and implications for water storage, flow and solute transport: A review update for geochemists. *Chemical Geology* n°429, 75–84, 10p.
- Rezanezhad F., Price J.S., Craig J.R., 2012b. The effects of dual porosity on transport and retardation in peat: a laboratory experiment. *Can. J. Soil Sci.* 92, 723–732.
- Rezanezhad F., Quinton W.L., Price J.S., Elrick D., Elliot T., Shook K.R., 2010. Influence of pore size and geometry on peat unsaturated hydraulic conductivity computed from 3D computed tomography image analysis. *Hydrol. Process.* 24, 2983–2994.
- Riddell E. S., Everson C., Clulow A., Mengistu M., 2013. The hydrological characterisation and water budget of a South African rehabilitated headwater wetland system. <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v37i4.18>, 10p.
- Robinson M., 1986. Changes in catchment runoff following drainage and afforestation. *Journal of Hydrology*, 86, pp. 71–84.
- Robinson M., Gannon B., Schuch M., 1991. A comparison of the hydrology of moorland under natural conditions, agricultural use and forestry. *Hydrological Sciences Journal*, 36, pp. 565–577.
- Robinson R.G., 2003. A Study on the Beginning of Secondary Compression of Soils. *J. Test. Eval.* 31, 1–10.
- Romanov V. V., 1968a. Evaporation from bogs in the European territory of the USSR. *Trans of Mono. Isparienne S Bolot Evropeiskoi Territori*, 1962, 227p.
- Romanov V. V., 1968b. *Hydrophysics of bogs*. Israël Program for Scientific Translations, Jerusalem, 299p.
- Rycroft D.W., Williams D.J.A., Ingram H.A.P., 1975a. The transmission of water through peat, I. Review. *J. Ecol.* 63, 535–556.

Références bibliographiques

- Rycroft D.W., Williams D.J.A., Ingram H.A.P., 1975b. The transmission of water through peat. II. Field experiments. *J. Ecol.* 63, 557–568.
- Schoepfroster D.B., Furbush C.E., 1974. Soils of the Juneau Area, Alaska. USDA, soil conservation service, Palmer, AK. Special Supplement to the Exploratory Soil Survey of Alaska. USDA-SCS, Portland, OR, p. 50.
- Schothorst C.J., 1977. Subsidence of low moor peat soils in the Western Netherlands. *Geoderma* 17, 265–291.
- Schothorst C.J., 1982. Drainage and behaviour of peat soils. In: de Bakker, H., van den Berg, M.W. (Eds.), *Proceedings of the symposium on peat lands below sea level*. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, pp. 130–163.
- Schwärzel K., Renger M., Sauerbrey R., Wessolek G., 2002. Soil physical characteristics of peat soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 479–486.
- Schwärzel K., Simunek J., Stoffregen H., Wessolek G., van Genuchten M.Th., 2006. Estimation of the unsaturated hydraulic conductivity of peat soils: Laboratory versus field data. *Vadose Zone J.* 5, 628–664.
- Shantz M. A., Price J. S., 2006. Characterization of surface storage and runoff patterns following peatland restoration, Quebec, Canada. *Hydrol. Process.* 20, 3799–3814 (2006) DOI: 10.1002/hyp.6140, 16p.
- Siegel D.I., Glaser P.H., 2006. The hydrology of peatlands. In: Wieder, R. Kelman, Vitt, Dale H. (Eds.), *Boreal Peatland Ecosystems*. Springer, Berlin Heidelberg, pp. 289–311.
- Swanson D.K., Grigal D.F., 1989. Vegetation indicators of organic soil properties in Minnesota. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53, 491–495.
- Tinbergen L., 1940. Observations sur l'évaporation de la végétation d'une tourbière dans les Hautes-Fagnes de Belgique. *Mémoires de la Société Royale des Sciences de Liège* : 21-76.
- Tindal J.A., Kunkel J.R., 1999. *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*. Prentice Hall, New Jersey, p. 624.
- Tison, G., 1960. Courbe de tarissement, coefficient d'écoulement et perméabilité du bassin. *Mém. IAHS, Helsinki*, 229–243.
- Todorova S.G., Siegeland D.I., Costello A.M., 2005. Microbial Fe(III) reduction in a minerotrophic wetland geochemical controls and involvement in organic matter decomposition. *Appl. Geochem.* 20, 1120–1130.
- Tomlinson R.W. 1979. Water levels in peatlands and some implications for runoff and erosional processes. in : A.F. Pitty, ed. *Geographical approaches to fluvial processes*. Geo Abstracts, Norwich, pp. 149-162.
- Turetsky M.R., Wieder R.K., Williams C.J., Vitt D.H., 2000. Organic matter accumulation, peat chemistry, and permafrost melting in peatlands of boreal Alberta. *Ecoscience* 7, 379–392.
- Tveit A., Schwacke R., Svenning M.M., Ulrich T., 2013. Organic carbon transformations in high Arctic peat soils: key functions and microorganisms. *ISME J.* 7, 299–311.
- Uhden O., 1965. Die ungestörten Hochmoore sind keine Wasserspeicher. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, Jg. 10, H, 1 :17-21.

University of Leeds Peat Club: Bacon K.L., Baird A.J., Blundell A., Bourgault M-A., Chapman P.J., Dargie G., Dooling G.P., Gee C., Holden J., Kelly T., McKendrick-Smith K.A., Morris P.J., Noble A., Palmer S.M., Quillet A., Swindles G.T., Watson E.J., Young D.M., 2017. Questioning ten common assumptions about peatlands. *Mires and Peat*, 19(12), 1–23.

van der Schaaf S. 1999. Analysis of the hydrology of raised bogs in the Irish Midlands. A case study of Raheenmore Bog and Clara Bog. Ph. D. Dissertation, Landbouwwuniversiteit Wageningen, 375 p.

van der Schaaf, S. 2002. Bog hydrology. In *Conservation and restoration of raised bogs: geological, hydrological and ecological studies* (ed M.G.C. Schouten), pp. 54–109. Stationery Office, Dublin, Ireland.

van Genuchten M.T., Wierenga P.J., 1976. Mass-transfer studies in sorbing porous-media: 1. Analytical solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40, 473–480.

Van-Seters T. E., Price J., 2002. Toward a conceptuel model of hydrological change on an abandoned cutover bog, Quebec. In *Hydrological Processes*, 16 (10), p 1965-1981.

Verry E.S., Boelter D., 1978. *Wetland Functions and Values: The State of Our Understanding*. American Water Resources Association, Middleburg, pp. 389–402.

von Post L., 1922. Swedish geological peat survey with the results obtained so far (in Swedish). *Sven. Mosskult. Tidskr.* 36, 1–27.

Waddington J. M. et Mcneil P., 2002. Peat oxydation in an abandoned cutover peatland. In *Canadian Journal of Soil Science*, 82 (3), p 279-286.

Wastiaux C. 2000. Facteurs hydrologiques de la dégradation des tourbières hautes à sphaignes (Hautes-Fagnes, Belgique). Thèse de doctorat en Sciences géographiques, Université de Liège, 223 p.

Wastiaux C., 2008. Les tourbières sont-elles des éponges régularisant l'écoulement ? *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 50, 2008, 57-66.

Weiss D., Shotyk W., Rieley J., Page S., Gloor M., Reese S., Martinez-Cortizas A., 2002. The geochemistry of major and selected trace elements in a forested peat bog, Kalimantan, SE Asia, and its implications for past atmospheric dust deposition. *Geochim. Cosmochim. Acta* 66, 2307–2323.

Wellock M.L., Reidy B., Laperle C.M., Bolger T., Kiely G., 2011. Soil organic carbon stocks of afforested peatlands in Ireland. *Forestry* 84, 441–451.

Whittington P. N. et Price J. S., 2006. The effects of water table draw-down (as a surrogate for climate change) on the hydrology of a fen peatland, Canada. In *Hydrological Processes*, 20 (17), p 589-3600.

Williams B.L., Sparling G.P., 1988. Microbial biomass carbon and readily mineralized nitrogen in peat and forest humus. *Soil Biol. Biochem.* 20, 579–581.

Zukowski J., Bennett R, Beaver C., Hervieux J-Ph., MacLaine J., 2015. Quantifying the Wetland Water Storage Potential of the Eastern Slopes in Alberta, Canada. *Environmental Science* 502, 31p.

Zynter R., Biswas N., Bewtra J.K., 1989. Adsorption and desorption of perchloroethylene in soils, peat moss, and granular activated carbon. *Can. J. Civ. Eng.* 16, 786–806.

Liste des figures et tableaux

Liste des figures

Figure 1 : Caractéristiques morphologiques des sols hydromorphes et comparatif avec les Arrêtés Ministériels (AM) de 2008 et 2009 (modifié par CAEi d'après les classes d'hydromorphie du Geppa). Des sols caractéristiques de zones humides selon l'AM du 24/06/2008, ne le sont plus dans l'AM modificatif du 1/10/2009 (in Chambaud et al., 2002).....	15
Figure 2 : Voies de transit potentielles des eaux de pluies arrosant une tête de bassin versant (Smith et al, 2013).....	16
Figure 3 : Sources d'alimentation en eau potentielles des zones humides (Smith et al., 1995).....	16
Figure 4 : Contribution relative des sources d'alimentation en eau des zones humides (Brinson, 1993) – à droite	16
Figure 5 : Exemple des 4 grands types de zones humides du Wisconsin (Brinson, 1993)	18
Figure 6 : Zones humides de dépression (Smith et al., 1995) – à gauche	18
Figure 7 : Zones humides de pente (Smith et al., 1995) – à droite	18
Figure 8 : Zones humides des franges lacustres (Smith et al., 1995) – à gauche	19
Figure 9 : Zones humides plates à sols minéralisés (Smith et al., 1995) – à droite.....	19
Figure 10 : Zones humides rivulaires (Smith et al., 1995)	19
Figure 11 : Classification hydrogéologique des tourbières (Gilvear et al., 1989).....	20
Figure 12 : Clef de détermination des systèmes hydrogéomorphologiques (adaptée de Smith et al. 1995 in Gayet et al., 2016)	21
Figure 13 : Mécanismes de transfert d'eau dans les zones humides (Acreman et Miller, 2006)	22
Figure 14 : Typologie topographique des zones humides (Acreman et Miller, 2006) (La légende des types d'alimentation est présentée Figure 13)	22
Figure 15 : Description des différents types de zones humides selon Acreman et Miller (2006) : zones humides plates, zones humides de pentes, zones humides de dépression, zones humides de bas de vallées, zones humides côtières et zones humides souterraines.....	23
Figure 16 : Facteurs expliquant l'origine et la formation des tourbières (Manneville et al., 1999).....	25
Figure 17 : Alimentation hydrique des tourbières (in Manneville et al., 1999) – à gauche.....	28
Figure 18 : Apports transferts d'eau dans les tourbières bombées et les bas-marais (Manneville et al., 1999) – à droite.....	28
Figure 19 : Fonctionnement hydrologique des tourbières (in Manneville et al., 1999)	28
Figure 20 : Formation d'une tourbière bombée sur une doline (in Manneville et al., 1999) – à gauche	29
Figure 21 : Formation d'une tourbière suite à un éboulement (in Manneville et al., 1999) – à droite.....	29
Figure 22 : Formation d'un marais tufeux en contexte karstique (in Manneville et al., 1999) – à gauche	29
Figure 23 : Formation de tourbière d'ensellement (in Manneville et al., 1999) – à droite	29
Figure 24 : Formation de tourbière en contexte périglaciaire (in Manneville et al., 1999).....	29
Figure 25 : Formations de tourbières en contexte postglaciaire (in Manneville et al., 1999) – à gauche.....	30
Figure 26 : Formations de tourbières en contexte de plaine (Manneville et al., 1999) – à droite	30

Liste des figures et tableaux

Figure 27 : Répartition des tourbières en Europe (in Manneville et al., 1999)	31
Figure 28 : Critères de répartition spatiale des tourbières (Manneville et al., 1999)	32
Figure 29 : Typologie des milieux terrestres sous dépendance des eaux souterraines en Irlande, coupes transversales (in Kimberley et Coxon, 2011)	35
Figure 30 : Schéma du bilan hydrologique appliqué à une zone humide (Gilvear et Bradley, 2009). Cas de figure le plus complexe qui tient compte de l'ensemble des flux et interactions possibles entre la zone humide, l'atmosphère, le milieu souterrain et le milieu superficiel.....	42
Figure 31 : Schéma de classification de l'ensemble des zones humides suivant leurs modalités d'alimentation et de restitution des eaux (Classification de Gilvear et McInnes (1994) in Gilvear et Bradley (2009))	43
Figure 32 : Triangle des textures organiques (Gobat et al., 1991)	46
Figure 33 : Conductivité hydraulique en fonction du type de tourbe (Eggelsmann et al., 1993)	49
Figure 34 : Partie supérieure d'une carotte de tourbe (in Wastiaux, 2008 ; photo de F. De Vleeschouwer)	50
Figure 35 : Profil schématique de structuration d'une tourbière haute et de quelques paramètres hydro-physiques (Wastiaux, 2008).....	51
Figure 36 : Comparaison des gammes de perméabilité pour des roches et dépôts meubles (in Porteret (2008) inspiré par Freeze et Cherry (1969))	51
Figure 37 : Impact du changement de volume sur la tourbe (Porteret (2008) inspiré par Whittington (2006))	52
Figure 38 : Courbe de rétention d'eau pendant le séchage et la réhumidification d'un sol tourbeux à sphaignes illustrant le phénomène d'hystérèse (Rezanezhad et al. (2016) d'après les expériences de Hayward et Clymo (1982)).....	53
Figure 39 : Schéma conceptuel de la double porosité et du transfert de masse dans un sol tourbeux, incluant une « zone mobile » affectée par des flux advectifs et une « zone immobile » qui échange des solutés avec la région mobile via la diffusion moléculaire (Rezanezhad et al., 2016).....	55
Figure 40 : Évolution parallèle du niveau hydrostatique dans la tourbière et des débits à l'exutoire d'un petit bassin versant tourbeux des Hautes-Fagnes (Wastiaux, 2008).....	56
Figure 41 : (a) Exemple de fluctuations du niveau hydrostatique dans une tourbière des Hautes-Fagnes pendant une année hydrologique ; (b) Durée de résidence du niveau hydrostatique dans cette même tourbière : histogramme de fréquence par niveau de 5 cm, résumant 4 années de mesures (Wastiaux,(2008).	59
Figure 42 : Schéma simplifié de deux configurations de zones humides (ombrotrophe et minérotrophe) et de l'instrumentation qu'elles imposent pour un suivi hydrologique (bilan hydrologique).....	63
Figure 43 : Lac tourbière de Luitel (décembre 2016)	89
Figure 44 : Tourbière vivante de Frasne (mars 2017)	89
Figure 45 : Articulation interdisciplinaire de la phase 2	93

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste d'organismes, de structures ou de projets où de la documentation ou des données sur les zones humides sont disponibles.....	10
Tableau 2 : Types d'habitats français Corine-biotopes (d'après Bissardon et al., 1997)	12
Tableau 3 : Types d'habitats Eunis (d'après (Louvel et al., 2013)	12
Tableau 4 : Typologie Sdage des zones humides appliquée au bassin RMC (d'après Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2000 et Collectif RhoMéO, 2014)	13
Tableau 5 : Tableau des profils pédologiques retenus par l'arrêté ministériel avec la correspondance entre les dénominations scientifiques de l'Afés et les anciennes dénominations de la CPCS (in Chambaud et al., 2002).....	14
Tableau 6 : Origine de l'alimentation en eau et hydrodynamique pour les 7 types de la classification hydrogéomorphologique (in Smith et al., 2013) – à gauche	16
Tableau 7 : Classification hydrogéomorphologique : définitions (Smith et al., 2013)	17
Tableau 8 : Fonctions des zones humides et indicateurs (Smith et al., 2013)	20
Tableau 9 : Apports majeurs d'eau et caractéristiques hydrodynamiques dominantes des classes hydrogéomorphologiques (In Gayet et al., 2016 d'après Brinson, 1995)	20
Tableau 10 : Types topographiques de zones humides et sous-types liés aux mécanismes de transfert d'eau (Acreman et Miller, 2006).....	23
Tableau 11 : Définitions liées aux tourbières (Sélection de définition in Manneville et al., 1999).....	25
Tableau 12 : Types de paysages de tourbières en France (D'après Manneville et al., 1999)	26
Tableau 13 : Situations géomorphologiques favorables aux tourbières (D'après Manneville et al., 1999) ...	27
Tableau 14 : Classification des tourbières (D'après Manneville et al., 1999)	27
Tableau 15 : Indicateurs WETMEC (Wheeler et al., 2009 in Kimberley et Coxon, 2011)	34
Tableau 16 : Outils, critères et indicateurs liés aux zones humides (1/2).....	36
Tableau 17 : Outils, critères et indicateurs liés aux zones humides (2/2).....	37
Tableau 18 : Exemple d'indicateurs morphologiques (Forum des Marais Atlantiques, 2014)	39
Tableau 19 : Exemples d'indicateurs hydrologiques (Forum des Marais Atlantiques, 2014)	39
Tableau 20 : Soutien des étiages des cours d'eau et recharge des nappes d'eau (Forum des Marais Atlantiques (2014) Fiche n°18 diagnostic préalable des ZH prioritaires)	40
Tableau 21 : Synthèse des paramètres et variables d'intérêt pour le stockage et la restitution des eaux	45
Tableau 22 : Différentes gammes de paramètres de sols tourbeux collectées à partir d'études de terrain et en laboratoire (tableau de synthèse in Rezanezhad et al., 2016)	48
Tableau 23 : Valeurs de conductivités hydrauliques suivant le type de tourbière et le degré de décomposition de von Post (tableau de synthèse in de Porteret, 2008)	49
Tableau 24 : Exemple de mesures des propriétés hydrodynamiques de tourbières à sphaignes du Canada (Braham et Strack, 2014).	54
Tableau 25 : Design de l'instrumentation et des mesures	65
Tableau 26 : Design des modèles déterministes	65
Tableau 27 : Synthèse des effets positifs ou négatifs des zones humides tourbeuses (en relation avec une nappe ou un cours d'eau) sur le rôle hydrologique (stockage et restitution).....	77

Liste des figures et tableaux

Tableau 28 : Liste des sites présélectionnés	81
Tableau 29 : Critères de sélection des sites	82
Tableau 30 : Spécificités des 5 sites visités.....	83
Tableau 31 : Synthèse - Tourbière de Luitel	84
Tableau 32 : Synthèse - Tourbière de Frasne	85
Tableau 33 : Synthèse - Tourbière de Praubert.....	86
Tableau 34 : Synthèse - Marais de Vaux.....	86
Tableau 35 : Synthèse - Tourbière de Montselgues	87
Tableau 36 : Taux de réalisation des tâches de la phase 1.....	91
Tableau 37 : Synthèse des travaux de la phase 1 : points clefs et points de vigilance	92

Table des matières complète

Fiche signalétique.....	I
Table des matières synthétique	III
Résumé	V
Acronymes, sigles et abréviations.....	VII
Préambule.....	IX
INTRODUCTION	1
1. Objectifs et planification du projet	1
1.1. <i>Problématique, finalités et objectifs</i>	1
1.2. <i>Phases de l'étude</i>	2
2. Organisation du rapport phase 1 (2016-2017)	3
PARTIE I – Définitions et typologies des zones humides	5
1. Définitions, sources et dictionnaire de données.....	5
1.1. <i>Définitions de départ : zones humides, milieux humides, têtes de bassins versants, soutien d'été</i>	5
1.1.1. Zones humides : définitions générales	5
1.1.2. Étiage et soutien d'été : vision statistique et hydraulicienne.....	6
1.1.3. Têtes de bassins versants : des secteurs à enjeux à géographie variable	7
1.1.4. Zones humides et milieux humides : entre réglementation et perception	7
1.1.5. Zones humides : définitions complémentaires	8
1.2. <i>Sources et dictionnaire de données</i>	9
1.2.1. Sources documentaires et de données	9
1.2.2. Dictionnaire de données des zones humides	11
2. Typologies de référence des zones humides.....	11
2.1. <i>Typologies : Habitats, milieux, végétation, sols</i>	11
2.1.1. Typologies : Habitats, milieux, végétation	12
2.1.2. Typologies : sols	14
2.2. <i>Typologies hydrogéomorphologiques et fonctions hydrologiques</i>	15
2.2.1. Approches hydrologiques et hydrogéomorphologique (HGM)	15
2.2.2. Focus sur les tourbières.....	24
2.2.3. Focus sur les relations eaux souterraines - zones humides	33
3. Outils, critères et indicateurs pour localiser, identifier, caractériser et étudier les zones humides.....	36
PARTIE II – Méthodes pour la caractérisation du rôle hydrologique des zones humides	41
1. Bilan hydrologique des zones humides.....	41
1.1. <i>Principe</i>	41
1.2. <i>Diversité des interactions zones humides, atmosphère, eaux superficielles et eaux souterraines</i>	42
1.3. <i>Lien entre capacité de stockage et capacité de restitution des eaux</i>	43
1.3.1. Stockage.....	44
1.3.2. Restitution.....	45
2. Hydrologie des zones humides tourbeuses	46
2.1. <i>Nature</i>	46
2.2. <i>Propriétés hydrodynamiques des zones humides tourbeuses</i>	47
2.3. <i>Structuration verticale et modèle diplotelmique</i>	50
2.4. <i>Évolution temporelle de la tourbe (géométrie, propriétés hydrodynamiques, décomposition)</i>	52
2.5. <i>Hystérèse séchage/réhumidification</i>	53

Table des matières complète

2.6.	<i>Anisotropie et hétérogénéité</i>	54
2.7.	<i>Double porosité et transfert de masse</i>	55
2.8.	<i>Effets de seuils et types d'écoulement</i>	55
2.8.1.	Effets de seuil	55
2.8.2.	Types d'écoulement	57
2.9.	<i>Capacité de stockage et restitution</i>	57
2.9.1.	Idées reçues qui font l'objet d'une controverse	57
2.9.2.	Rôle hydrologique des zones humides tourbeuses : questions et enjeux particuliers relatifs à ces milieux	58
3.	<i>Méthodes d'investigation et de mesures</i>	65
3.1.	<i>Design de l'instrumentation, des mesures et des modèles déterministes</i>	65
3.2.	<i>Flux entrants/sortants, variation de stock et origine de l'alimentation des zones humides</i>	66
3.2.1.	Fonctionnement hydrologique des zones humides	66
3.2.2.	Stockage et bilan hydrologique des zones humides	67
3.2.3.	Caractérisation biologique et thermique de l'origine de l'alimentation des zones humides	67
3.2.4.	Instrumentation et suivi hydrologique d'une zone humide	68
3.2.5.	Évapotranspiration des zones humides	69
3.2.6.	Méthodes géochimiques appliquées aux zones humides	69
3.3.	<i>Propriétés hydrodynamiques et géométrie des zones humides</i>	70
3.3.1.	Méthodes géophysiques appliquées aux zones humides	70
3.3.2.	Pédologie et propriétés hydrodynamiques des zones humides	70
3.3.3.	Cartographie et télédétection appliquées aux zones humides	71
3.4.	<i>Traitements et analyses des données hydrologiques</i>	71
3.4.1.	Modélisation des zones humides	71
3.4.2.	Solutions analytiques	72
3.4.3.	Séparation des contributions	72
PARTIE III – Synthèse bibliographique et enseignements		73
1.	<i>Synthèse partie I : définitions et typologies</i>	73
1.1.	<i>Définitions des zones humides : des entités plurielles et polymorphes en interaction avec l'hydrosystème</i>	73
1.2.	<i>Typologies des zones humides : importance de l'approche hydrogéomorphologique</i>	74
1.3.	<i>Focus sur les tourbières : milieux humides emblématiques des têtes de bassins versants</i>	74
1.4.	<i>Outils et indicateurs pour l'étude de la fonction de soutien d'étiage</i>	74
2.	<i>Synthèse partie II : méthodes de caractérisation du soutien d'étiage</i>	75
2.1.	<i>Bilan hydrologique : approche simple mais difficile à mettre en œuvre pour une quantification précise du soutien d'étiage</i>	75
2.2.	<i>Zones humides tourbeuses : milieux poreux particuliers dont le rôle hydrologique est difficile à appréhender</i>	75
2.3.	<i>Questions soulevées par l'étude bibliographique du rôle de soutien d'étiage</i>	76
2.4.	<i>Rôle de régulation des débits : tableau de synthèse</i>	76
3.	<i>Enseignements tirés de la phase 1 et perspectives pour la phase 2</i>	77
3.1.	<i>Typologies des zones humides</i>	77
3.2.	<i>Soutien d'étiage des zones humides et interactions avec l'hydrosystème</i>	78
3.3.	<i>Tourbières et autres types de zone humides de têtes de bassins versants</i>	79
3.4.	<i>Difficultés rencontrés pour l'étude hydrologique des tourbières</i>	79
3.5.	<i>Indicateurs hydrologiques</i>	80
PARTIE IV – Choix des sites et instrumentation prévue		81
1.	<i>Critères de choix des sites</i>	82
2.	<i>Spécificités des sites sélectionnés : Instrumentation des sites et acquisition de données</i>	82
2.1.	<i>Tourbière de Luitel (Isère, Séchilienne, 1200 m)</i>	83
2.2.	<i>Tourbière de Frasne (Doubs, Frasne, 850 m)</i>	84
2.3.	<i>Tourbière de Praubert (Haute-Savoie, Saint-Paul en Chablais, 900 m)</i>	85
2.4.	<i>Marais de Vaux (Ain, Haute-Ville Lompnes, 750 m)</i>	86

2.5. Tourbière de Montselgues (Ardèche, Montselgues, 1000 m).....	87
CONCLUSION.....	91
1. Bilan du travail de la phase 1	91
1.1. Avancement et taux de réalisation.....	91
1.2. Bilan et synthèse : points clefs et points à développer	91
2. Mise en œuvre de la phase 2	93
2.1. Articulation interdisciplinaire et moyens mobilisables	93
2.2. Valorisation des données existantes, mesures et instrumentation sur les sites d'études.....	93
2.3. Conduite des objectifs à terme.....	94
3. Perspectives pour la phase 3	94
Références Bibliographiques	97
Contexte, définitions et typologies.....	97
Bilan et rôle hydrologique	101
Liste des figures et tableaux	111
Liste des figures	111
Liste des tableaux.....	113
Table des matières complète.....	115
Tables des matières des Annexes	119
Annexe 1 : Fiches projets	121
A1.1. Fiche action recherche valorisation n°51 – Phase 1 (2016-2017).....	121
A1.2. Fiche action recherche valorisation n°56 – Phase 2 (2017-2018).....	126
Annexe 2 : Fiches de synthèse Zabr	130
A2.1. Fiche de synthèse Zabr - Phase 1 (2016-2017)	130
Annexe 3 : Compte-rendu de terrains et de réunions	132
A3.1. Réunion de démarrage phase 1 : 3 mars 2016	132
A3.2. Réunion technique CEN Savoie : 19 avril 2016.....	137
A3.3. Comité technique - 14 avril 2017	140
A3.4. Comité de pilotage : 26 juin 2017	144
A3.5. Réunion-Visite de terrain- tourbière de Montselgues : 12 juillet 2016.....	155
A3.6. Réunion-Visite de terrain – Tourbière de Luitel : 12 décembre 2016.....	160
A3.7. Réunion-Visite de terrain – Plateau de Gavot : 7 mars 2017	174
A3.8. Réunion-Visite de terrain – Marais de Vaux : 23 mars 2017.....	189
A3.9. Réunion-Visite de terrain- Tourbière de Frasné : 29 mars 2017	203
Annexe 4 : Critères de sélection des sites de zones humides.....	220
Annexe 5 : Personnes impliquées ou contactées (ZHTB phases 1 et 2).....	221
A5.1. Comité de pilotage	221
A5.2. Sites d'études.....	221
A5.3. Autres sites complémentaires potentiels	222
A5.4. Chercheurs de l'équipe projet.....	222
Annexe 6 : Poster du projet.....	223
Annexe 7 : Présentation type phase 1	224
Annexe 8 : Typologies de zones humides.....	232
A8.1. Typologie de zones humides applicables aux Sdage et aux Sage (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2005)	232
A8.2. Classification des zones humides de Ramsar (Frazier, 1999)	233
A8.3. Système hiérarchique de description des habitats de zones humides MedWet (Farinha et al., 1996)	234
A8.4. Comparaison des classifications de zones humides reconnus à l'échelle nationales et internationale (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011)	235
Annexe 9 : Solutions analytiques et séparation des contributions	236

Tables des matières des Annexes

Annexe 1 : Fiches projets	121
<i>A1.1. Fiche action recherche valorisation n°51 – Phase 1 (2016-2017)</i>	121
<i>A1.2. Fiche action recherche valorisation n°56 – Phase 2 (2017-2018)</i>	126
Annexe 2 : Fiches de synthèse Zabr	130
<i>A2.1. Fiche de synthèse Zabr - Phase 1 (2016-2017)</i>	130
Annexe 3 : Compte-rendu de terrains et de réunions	132
<i>A3.1. Réunion de démarrage phase 1 : 3 mars 2016</i>	132
<i>A3.2. Réunion technique CEN Savoie : 19 avril 2016</i>	137
<i>A3.3. Comité technique - 14 avril 2017</i>	140
<i>A3.4. Comité de pilotage : 26 juin 2017</i>	144
<i>A3.5. Réunion-Visite de terrain- tourbière de Montselgues : 12 juillet 2016</i>	156
<i>A3.6. Réunion-Visite de terrain – Tourbière de Luitel : 12 décembre 2016</i>	160
<i>A3.7. Réunion-Visite de terrain – Plateau de Gavot : 7 mars 2017</i>	174
<i>A3.8. Réunion-Visite de terrain – Marais de Vaux : 23 mars 2017</i>	189
<i>A3.9. Réunion-Visite de terrain- Tourbière de Frasne : 29 mars 2017</i>	203
Annexe 4 : Critères de sélection des sites de zones humides	220
Annexe 5 : Personnes impliquées ou contactées (ZHTB phases 1 et 2)	221
<i>A5.1. Comité de pilotage</i>	221
<i>A5.2. Sites d'études</i>	221
<i>A5.3. Autres sites complémentaires potentiels</i>	222
<i>A5.4. Chercheurs de l'équipe projet</i>	222
Annexe 6 : Poster du projet	223
Annexe 7 : Présentation type phase 1	224
Annexe 8 : Typologies de zones humides	232
<i>A8.1. Typologie de zones humides applicables aux Sdage et aux Sage</i>	232
<i>A8.2. Classification des zones humides de Ramsar</i>	233
<i>A8.3. Système hiérarchique de description des habitats de zones humides MedWet</i>	234
<i>A8.4. Comparaison des classifications de zones humides reconnus à l'échelle nationales et internationale</i>	235
Annexe 9 : Solutions analytiques et séparation des contributions	236

Annexe 1 : Fiches projets

A1.1. Fiche action recherche valorisation n°51 – Phase 1 (2016-2017)

Titre du projet : Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins dans le soutien d'étiage des cours d'eau. Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône.

Personnes responsables : D. Graillot, F. Paran, J. Ré-Bahuaud (UMR 5600 EVS – EMSE)

Équipes de recherche « ZABR » concernées :

- UMR 5600 EVS : EMSE → suivi et analyses hydrologiques et hydrogéologiques

Équipes et compétences impliquées à partir de la deuxième année :

- Irstea - Unité Milieux Aquatiques, Écologie et Pollutions (MALY)
- UMR 5600 EVS : ENS Lyon → imagerie thermique aéroportée
- UMR 7300 ESPACE : Univ. Nice + EMA → géomorphologie, hydrologie et climatologie
- UMR 5023 LEHNA : ENTPE → géophysique pour la géométrie des tourbières

- Compétence en pédologie, indispensable pour la suite du projet, à identifier

- Compétence en hydrochimie pour identifier l'origine des eaux et en évaluer la part contributive : À définir (Univ. Avignon ou Univ. Saint-Etienne)

Autres partenaires potentiels :

- Recherche :

→ Compétence en Écologie végétale : À définir (export de l'eau par évapotranspiration, impact sur la réserve de tourbes) F. Arthaud (EDYTEM), Univ. Franche-Comté

IUT St-Etienne : Imagerie aéroportée (MNT, MNE et orthophotos)

→ UMR 5600 EVS : UJM ISTHME : géomorphologie, pédologie

- Institutionnel :

→ À préciser et/ou compléter en fonction du ou des sites retenus

→ Pôle-Relais Tourbière (F. Muller) : vulgarisation services écosystémiques, argumentation pour la restauration des tourbières, prise en compte des tourbières dans l'aménagement du territoire (épanchement des crues, soutien d'étiage)

→ Asters (CEN conservatoire d'espaces naturels)

→ Réseau interne ZH de l'Agence de l'eau (1 par délégation régionale)

→ Contacts établis avec : Chambaud F., Émilie Lunaud, Bosc-Bossut N., Pignon M. (AERMC)

Pilotage de l'étude : un comité de pilotage sera mis en place réunissant les acteurs du projet et certains référents sur le sujet appartenant à des organismes gestionnaires des zones humides.

Thème de rattachement ZABR : Ressources et eau et changements climatiques

Thème de rattachement Agence de l'Eau :

Q35 Quels échanges aux interfaces eaux souterraines / Eaux superficielles ?

Binôme : L. Cadilhac

Q19 Comment appréhender et qualifier l'état et le fonctionnement des zones humides ?

Binôme : F. Chambaud

Site ou Observatoire de rattachement ZABR:

- Zones humides (en cours de redéfinition à la ZABR)
- Rivières cévenoles
- Arc-Isère
- Axe Rhône, à préciser suivant le ou les sites sélectionnés

Finalités et attendus opérationnels :

Il est supposé que les zones humides et notamment les tourbières jouent un rôle très important dans le stockage d'eau (mais aussi de carbone) et le soutien d'étiage des cours d'eau voire des eaux souterraines. Cependant, il est

Annexes

actuellement difficile de faire la part de l'origine des apports d'eau en période de tarissement, notamment les apports liés au ressuyage des zones humides susceptibles d'être confondus avec le tarissement des réserves de nappes. **Il n'existe pas de références suffisamment précises sur la quantification des capacités des zones humides à soutenir les étiages des cours d'eau de la ZABR.**

Les finalités de ce projet focalisé sur les tourbières sont multiples :

- Mieux comprendre le fonctionnement (diagnostic fonctionnel) des échanges eaux superficielles / tourbières / eaux souterraines ;
- Mieux appréhender les services rendus (bénéfices) en termes de soutien d'étiage (régulation thermique, stockage, etc.) ;
- À partir des éléments de connaissances acquis, mieux préciser les vulnérabilités physiques des zones humides des têtes de bassins afin d'apporter les arguments en vue d'une meilleure protection et gestion de ces milieux sensibles.

Les finalités en lien avec les projets « Échanges nappe / Rhône » et « Échanges karst / Cèze » sont les suivantes :

- Compléter le diagnostic de l'interface milieux humides / eaux superficielles / eaux souterraines ;
- Ouvrir le domaine d'applicabilité du guide méthodologique « Eau Sout' » (limité aux échanges nappe / rivière en domaine alluviale) à une nouvelle interface (**milieux humides**) et à un nouveau contexte géologique (**cristallin**).

Objectifs et méthodologie :

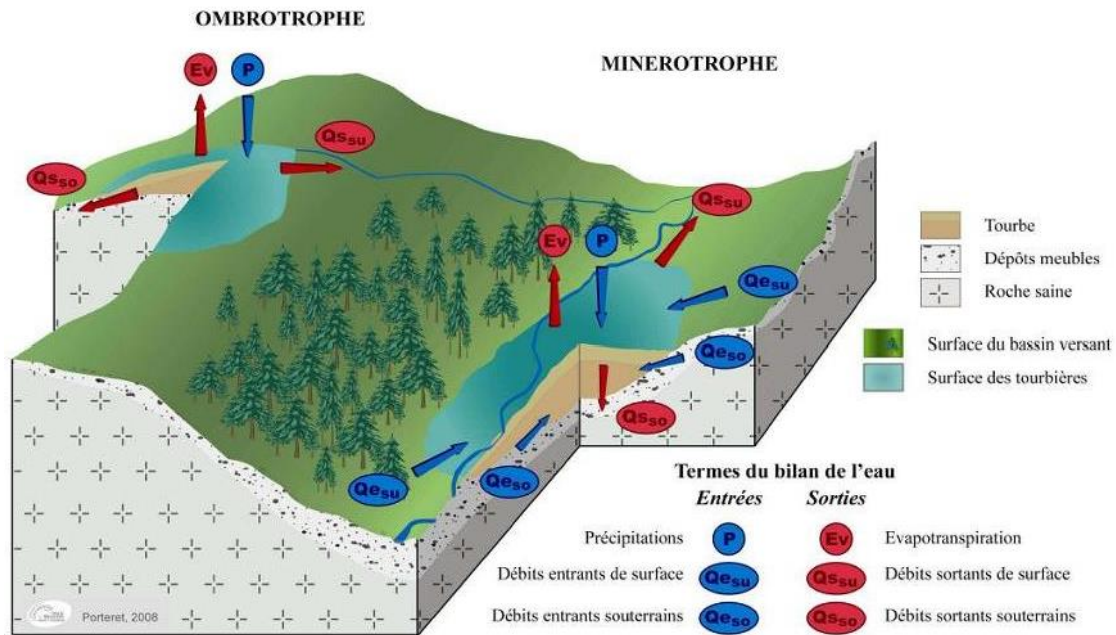
Plusieurs travaux et références abordent les tourbières sous l'angle du changement climatique et donc de la capacité des tourbières à soutenir les étiages mais aussi à stocker l'eau, et le carbone (par exemple : la tourbière de Frasné (25) avec un programme LIFE tourbières en cours). Le programme Rhoméo en particulier a permis de définir plusieurs indicateurs biologiques, hydrologiques et pédologiques utilisables pour évaluer les zones humides de têtes de bassins versants. La méthodologie pourra s'appuyer sur ces indicateurs. Le Pôle Relais « Tourbières » travaille actuellement sur la vulgarisation des services écosystémiques, à partir de la bibliographie existante. Cette démarche vise à fournir un argumentaire en faveur de la restauration des tourbières et de leur prise en compte dans les politiques d'aménagements des territoires (épandement des crues, soutien d'étiage, etc...).

Ce projet ZABR s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés sur la question des échanges **nappe alluviale / rivière** (Rhône, Drôme) et **karst / rivière** (Cèze) en étudiant une nouvelle interface eaux souterraines / eaux superficielles. En **domaine cristallin**, les ressources en eaux souterraines sont souvent moins abondantes et de plus faibles capacités. Ces eaux souterraines échangent avec les masses d'eau superficielles que constituent les zones humides et particulièrement les tourbières. Ces milieux humides sont souvent menacés et méritent d'être mieux étudiés sur le plan hydrologique en vue d'une meilleure gestion, protection, voir réhabilitation.

Le projet s'intègre dans la thématique « changement climatique et ressources » de la ZABR et doit contribuer à améliorer davantage la connaissance des interfaces eaux souterraines / eaux superficielles. Du point de vue hydraulique, de telles dynamiques sont d'importance pour le maintien des communautés végétales et animales des tourbières qui constituent de véritables réservoirs de biodiversité. Comprendre ces dynamiques sur ces milieux fragiles constitue un préalable indispensable pour essayer d'anticiper les conséquences des changements globaux sur ces milieux et tenter de préserver et/ou de réhabiliter les services rendus par ceux-ci.

En conséquence, ce projet propose de mieux comprendre le rôle et le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins versants dans le soutien des débits des cours d'eau à l'étiage. Les **trois sous objectifs principaux** visent à :

- Séparer et quantifier les contributions des différents compartiments (eaux souterraines et zones humides) au soutien d'étiage par l'étude des flux d'entrées et sorties (Figure ci-dessous).
- Évaluer la capacité de ces zones à contribuer au soutien d'étiage suivant le contexte altitudinal, géologique, géomorphologique, climatique selon leur typologie (topogène, ombrogène ou limnogène,)
- Identifier les éventuelles conséquences des éventuelles pressions anthropiques



Échanges d'eau à l'interface nappe/tourbière/rivière [Porteret, 2008]

Ombrotrophe : alimentée uniquement par les eaux de précipitation

Minerotrophe : alimentée par les eaux de pluies, de ruissellement et des eaux souterraines

Dans ce projet, **le choix des sites revêt une importance stratégique** et n'est pas encore arrêté pour l'instant. Les critères de choix pressentis seront par exemple : la densité des zones humides en têtes de bassins, les enjeux locaux sur la ressource en eau, la logistique et l'équipement, les correspondants locaux. Parmi les exemples proposés ci-dessous, on distinguera les sites déjà équipés et à étudier plus en détail et sur lesquels les données pourront être mises à profit et ceux à instrumenter pour couvrir l'ensemble des typologies.

Exemples de sites potentiels selon les contextes climatique et géologique :

- **Contexte Climatique :**

- Alpin (exemples : têtes de BV de la Romanche (Taillefer), ZH de Haute-Savoie en lien avec le CEN 74, tourbière de Luitel (Belledonne)) ;

- Montagnard (ex : massif du Pilat, Gimel, Tourbières du massif du Jura (Frasne – Projet LIFE et autres sites)) ;

- Méditerranéen avec influences cévenoles (ex : pente orientale des Cévennes, têtes de BV des Gardons, tourbières de Montselgues (Ardèche) suivies depuis 2004/2006) ;

- Influences continentales (Affluents du Rhône et Rhône moyen : sites du Bugey à définir, bassin de la Lanterne, plateau des mille étangs - 70).

- **Contexte géologique :**

- Cristallin (Montagne noire, Cévennes, Pilat) ;

- Mixte (Haute vallée de l'Aude) ;

- Sédimentaire (Jura méridional).

Autres sites référents hors ZABR : massif du Forez « Prenarde », Mont Lozère « Sagnes »

La durée nécessaire au projet est estimée au moins 3 années. Il est prévu que le projet se déroule en 4 étapes principales réparties sur ces 3 ans :

1. réalisation d'un état des lieux sur la question posée à partir de l'exploitation de la bibliographie
2. en fonction de cet état des lieux, sélection de quelques sites favorables pour répondre à la question (sites déjà équipés avec chroniques hydro/piézo existantes, ou bien circonscrits à équiper) et représentatifs (si possible) de situations variées qu'on rencontre sur le territoire de la ZABR
3. instrumentation, acquisition d'information et exploitation des données
4. restitution et valorisation

Le paragraphe ci-dessous expose précisément les objectifs, actions et budget de l'année 1 (voir détails et tableau en dernière page) et présente les grandes lignes des actions envisagées en années 2 et 3.

Année 1 :

Cette première année sera essentiellement consacrée à :

- 1) **État de l'art** sur l'hydrologie des tourbières et les différentes **typologies** des tourbières (géologie, géomorphologie, présence ou non d'aquifère d'accompagnement, nature du remplissage (colmatage), structure, histoire des processus de formation de la tourbière ;
- 2) **Prises de contacts** avec les gestionnaires et acteurs locaux ;
- 3) **Présélection des sites** ayant déjà fait l'objet d'investigations et d'acquisition de données (hydrologiques, biologiques) et constitution d'une base de métadonnées et de données ad hoc ;
- 4) **Reconnaissance** de terrain sur les sites les plus intéressants révélés par l'état de l'art compte tenu du degré d'instrumentation et des chroniques existantes mais aussi des enjeux locaux concernant la ressource en eau ;
- 5) **Choix des sites et plan d'instrumentation**
et de l'échelle de travail :
 - **Locale** : Échelle de la tourbière et du cours d'eau d'accompagnement
 - **Régionale** : Échelle du bassin versant regroupant plusieurs tourbières
- 6) **Choix des variables** (Piézométrie, débits, température, physico-chimie, pluviométrie, biologie, ETP, Évaporation) et **paramètres** (caractéristiques intrinsèques, perméabilité, porosité, géométrie, surface) à étudier (relevé, échantillonnage, traçages le cas échéant et suivi) ;
- 7) Établissement d'un **plan de suivi et d'instrumentation** du ou des sites pour compléter l'équipement et les chroniques existantes.

Livraison : rapport de fin de 1^{ère} année et s'il y a matière document de valorisation du bilan réalisé sur l'état de la connaissance (ex : plaquette réalisée en collaboration avec le CEN).

La première année permettra de sélectionner les compétences les plus pertinentes pour la suite du projet et de dimensionner les activités prévues dans les années 2 et 3.

Année 2 : Mesures et instrumentation (À définir précisément à l'issue de l'année 1)

- Traitement et exploitation des données hydrologiques/hydrogéologiques et biologiques (odonates) pour les sites déjà équipés et sélectionnés : bilans hydrologiques, corrélations statistiques spatiales et temporelles à partir des chroniques disponibles.
- Détermination des indicateurs pertinents
- Acquisition d'information hydrologique/hydrogéologique sur les sites choisis pour être équipés et début d'exploitation des données.

Année 3 et 4 : Analyse et interprétation du fonctionnement et préconisations en matière de gestion

Suite de l'acquisition d'information et exploitation des données au cours des cycles hydrologiques correspondants
Analyse et synthèse des données acquises en année 2 et 3.

Restitution et valorisation

Références bibliographiques :

- Blavoux B., Marc V., Cognard-Planck A.L., Daniel M., Simler R., Martin C., Didon-Lescot J.-F., Silva-Filho E.V., 2002** – *Fonctionnement hydrogéochimique de la tourbière des Sagnes (Mont-Lozère)*. Séminaire Aqualp II à Évian.
- Cubizolle H., Russias L. et Porteret J., 2003** - *Quel rôle joue les tourbières dans le fonctionnement hydrologique des bassins versants*. In Quatrième journée d'échanges techniques entre gestionnaires d'espaces naturels de Rhône Alpes - vers une stratégie de préservation des tourbières, Conservatoire Régional des Espaces Naturels, Vourles, 21p.
- Dzikowski M., 2002** – *Fonctionnement hydrogéologique des tourbières, des versants à la plaine*. Séminaire Aqualp II à Évian.
- FCEN 2013** - *État des lieux de la recherche scientifique française sur les tourbières*, ed. Pôle Relais, cahier technique n°6.
- Gilles G., Boudin G., Pautet M.E., 2010** - *Etude du fonctionnement hydrologique de l'étang des loups à Brenod (01)*. CREN, Burgeap, 48 p.
- Gilles G., Michelot C., 2012** - *Expertise du fonctionnement hydrologique : Tourbière du lac de Chailloux (01)*. CREN, Burgeap, 60 p.
- Karthikeyan L., Nagesh Kumar D., Graillot D. and Gaur S., 2013** - "Prediction of Ground Water Levels in the Uplands of a Tropical Coastal Riparian Wetland using Artificial Neural Networks". *Water Resources Management*, Springer, 27(3), 871-883.

- Martin C., Didon-Lescot J.-F., 2002** - *Etude du fonctionnement hydrologique des zones humides du Mont-Lozère : L'exemple de la tourbière des Sagnes*. Etude de géographie physique vol. 29, pp 15 – 41.
- Martin C., Duguépéroux F. Didon-Lescot J.-F., 2008** – *Fonctionnement hydrologique d'une tourbière drainée : La plaine de la Sénégrière (Lozère)*. Études de géographie physique vol. 35, pp 20 – 23.
- Porteret J., 2008** – *Fonctionnement hydrologique des têtes de bassin versant tourbeuses du nord-est du Massif-Central*. Thèse de doctorat de l'Université de Saint-Etienne, 430p. Rapporteur de thèse : D. Graillot
- Porteret J., 2010** - *Capacité de stockage de l'eau et rôle des tourbières basses minérotrophes dans le fonctionnement des têtes de bassin versant*. Coll. Tourbières, Ann. Sci. Rés. Bios. Trans. Vosges du Nord-Pfälzerwald — 15 (2009-2010) : 207 – 229.
- Porteret J., 2014** – La connaissance de l'hydrologie pour la gestion des zones humides. Les cahiers techniques du CEN (Conservatoire d'Espaces Naturelles) Rhône-Alpes.

Budget global du projet, durée et aide demandée pour l'année 1 (2016) :

→ Année 1 (2016) :

- Missions (visites de terrain, rencontres avec les gestionnaires et acteurs locaux, réunions techniques entre scientifiques) : 3 k€
- 7 mois de Post-doc ou IR à recruter : 26,25 k€
- Temps permanent (EMSE) : 33,393 k€

Budget provisoire							
Dépenses (€)	UMR5600	EMSE GSE	Total				
Cout de personnel	26 250	33 393	59 643				
Personnel recruté pour le projet	26 250	0	26 250				
Contribution du personnel permanent		33 393	33 393				
dont cout salarial	26 250	9 483	35 733				
dont environnement	0	8 345	8 345				
Consommables (petit matériel, location salles -repas, pour ateliers et séminaire final)	0	0	0				
Equipement	0	0	0				
Missions (dont invitations scientifiques externes participation ateliers)	1 000	2 000	3 000				
Sous-traitance (analyses, etc.)							
Frais généraux *	2 725	200	2 925				
Total H.T.	29 975	35 593	65 568				
* Frais généraux: sont fonction de l'établissement gestionnaire de la part de subvention revenant à l'unité de recherche impliquée (10% au maximum) Pour les unités en gestion directe CNRS, merci de libeller le nom du partenaire de la manière suivante : CNRS-UMRXXXX							
Recettes (€)**	UMR5600	EMSE GSE	Total				
Agence de l'Eau	29 975	2 200	32 175	49%			
Autres partenaires			0				
Autofinancement	0	33 393	33 393	51%			
Total	29 975	35 593	65 568				

Total : 66,568 k€ (frais de gestion inclus)

Subvention Agence demandée : 32,175 K€

→ Années suivantes selon les résultats obtenus en année 1 (nombre, localisation, extension spatiale des sites et plan d'instrumentation).

- Estimation globale prévisionnelle 24 ETP Post-doc : 90 k€ (à répartir avec les partenaires du projet)
- Équipement (sondes CTD, piézomètres, stations de jaugeage et météo)
- Prélèvements et analyses (chimie, pédologie)
- Amortissement matériel scientifique (courantomètre, drone, station météo, sondes mutliparamètres) au prorata de la durée du projet

A1.2. Fiche action recherche valorisation n°56 – Phase 2 (2017-2018)

Titre du projet : Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins dans le soutien d'étiage des cours d'eau. Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône.

Personnes responsables : A. Johannet, F. Paran

Équipes de recherche « ZABR » concernées :

- EMA : analyse statistique, hydrologie, météorologie, IRT (A. Johannet)
- EMSE - SPIN : suivi et analyses hydrologiques et hydrogéologiques (D. Graillot, F. Dujardin)
- UJM - UMR 5600 EVS – Isthme : pédologie (histosols), géomorphologie (H. Cubizolle)
- UJM : géochimie (V. Lavastre) ; imagerie aéroportée MNE/IRT (D. Fayeaux)
- UMR 5023 LEHNA – ENTPE : géophysique pour la géométrie des tourbières (T. Winiarski)

Autres partenaires :

AE-RMC : E. Lunaud, M. Pignon, N. Bosc-Bossut, J. Hervo, L. Perrin

CREN RA : D. Danancher

CEN Savoie : J. Porteret

Thème de rattachement ZABR : Ressources et changements climatiques

Thème de rattachement Agence de l'Eau :

- Q35 Quels échanges aux interfaces eaux souterraines / Eaux superficielles ?

Binôme : L. Cadilhac

- Q19 Comment appréhender et qualifier l'état et le fonctionnement des zones humides ?

Binôme : F. Chambaud

Site ou Observatoire de rattachement ZABR :

- Zones humides
- Rivières cévenoles
- Arc-Isère
- OHM Vallée du Rhône (axe Rhône)

La liste sera précisée en fonction de la localisation des sites finalement sélectionnés. D'ores et déjà, ce projet devrait contribuer majoritairement aux sites ZABR Rivières Cévenoles et Zones Humides.

Finalités et attendus opérationnels :

Cette étude repose sur le postulat qu'il existe un rôle important des zones humides dans le stockage et le soutien d'étiage des cours d'eau, voire des nappes. Les questions posées sont les suivantes :

- Comment faire la part des origines des apports d'eau à l'étiage ?
- Comment quantifier les capacités (stockage et transfert d'eau) des zones humides à soutenir les cours d'eau à l'étiage ?

Une première réunion en mars 2016 à l'AE-RMC à Lyon, en présence de gestionnaires et experts des zones humides (UMR 5600, AE-RMC, CREN-RA, CEN Savoie) a permis de préciser ce double questionnement du point de vue :

- 1) des objectifs
- 2) de la notion de « zone humide » vis-à-vis du rôle d'étiage
- 3) des enjeux et préoccupations des gestionnaires
- 4) des sites d'étude potentiels (intérêt fort et données existantes)

Les finalités de ce projet focalisé sur les zones humides de têtes de bassins (ZHTB) sont multiples :

- mieux comprendre le fonctionnement des échanges eaux superficielles / ZHTB / eaux souterraines ;
- mieux appréhender les services rendus par les ZHTB en termes de soutien d'étiage ;
- à partir des éléments de connaissances acquis, mieux préciser les vulnérabilités physiques des ZHTB afin d'apporter les arguments en vue d'une meilleure protection et gestion de ces milieux sensibles.

Les finalités en lien avec les projets « Échanges nappe / Rhône » et « Échanges karst / Cèze » sont les suivantes :

- compléter le diagnostic de l'interface milieux humides / eaux superficielles / eaux souterraines ;
- ouvrir le domaine d'applicabilité du guide méthodologique « Eau Sout' » (limité aux échanges nappe / rivière en domaine alluvial) à une nouvelle interface (milieux humides) et à un nouveau contexte géologique (cristallin).

Objectifs et méthodologie:

Cette action se centre sur l'instrumentation, la mesure et l'interprétation des résultats issus de l'instrumentation des sites retenus dans la phase 1.

Il est prévu d'orienter l'étude sur les éléments qui influencent (qui perturbent) les zones humides du point de vue des services (ex : capacité de stockage). Les éléments de perturbation peuvent être liés à des impacts anthropiques (ex : pollutions, politique d'assèchement...) et/ou aux changements climatiques.

La nature organique du sol joue un grand rôle dans la capacité du milieu à stocker et à restituer l'eau. Il convient donc de bien connaître les horizons pédologiques et leur distribution spatiale (géométrie) pour quantifier cette capacité de stockage et de restitution d'eau. La capacité de soutien d'étiage des zones humides peut également être estimée par un bilan hydrologique entrées/sorties (précipitations, débits, traceurs géochimiques). Le bilan hydrologique tiendra compte des pertes par la végétation (évapotranspiration réelle). Des scénarios avec des précipitations faibles ou nulles et une évapotranspiration potentielle très forte permettront d'évaluer le rôle de la zone humide dans le soutien d'étiage. L'imagerie aéroportée haute-résolution (MNE et IRT) permet quant à elle de mieux préciser le réseau de drainage et de circonscrire l'extension spatiale de la zone humide.

La mise en œuvre méthodologique sera fondée sur l'étude de sites spécifiques dont le suivi, notamment hydrologique, sera le plus complet possible. La caractérisation du soutien d'étiage pourra se faire à deux niveaux suivant les enjeux et les données existantes :

1) en identifiant un nombre restreint d'indicateurs permettant de généraliser rapidement le fonctionnement des zones humides (ex : rôle des ZH dans le transfert d'eau de l'amont à l'aval) si les enjeux sont faibles. Une telle caractérisation rapide sera qualitative et pourra comporter des incertitudes, potentiellement fortes.

2) si les enjeux sont plus importants, il sera nécessaire de proposer une approche plus poussée, fondée sur des études plus complètes pour préciser le fonctionnement des ZH. Cette caractérisation sera donc quantitative.

L'évaluation du potentiel de services rendus (ex : régulation des débits, régulation thermique, régulation chimique) d'une ZH devra être déterminée par rapport à un référentiel : 1) présence/absence de ZH ; 2) type de ZH ; 3) influences/perturbations sur la ZH ; 4) enjeux/besoins liés à la ZH.

Les réunions de travail préliminaires ont montré une forte attente des gestionnaires de ces zones humides par rapport à leur fonctionnalité de soutien d'étiage potentiel : Quelles précautions prendre par rapport aux résultats obtenus ? Dans quelle mesure seront-ils utilisables ? Dans quels cas ? Pour quelles configurations hydrodynamiques ? Finalement, ces questions seront traitées dans une phase suivante (2019-2020) à l'issue de laquelle les différents livrables de l'étude seront à définir (ex : rapports, plaquettes, site web, supports pédagogiques ...) et devront être accessibles à différents publics (ex : gestionnaires, élus, grand public...). Le besoin d'argumentaire quantifié (flux, stockage, débit contributif au soutien d'étiage) semble essentiel, notamment dans le cadre de la GEMAPI (GEstion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations).

Sites d'études potentiels (intérêt fort et données existantes)

En première approche, le programme RHOMEO recense 86 sites de zones humides en Rhône-Alpes dont au moins une vingtaine équipés et documentés. Le CREN possède un plan de gestion pour chacun de ces sites. Le degré de connaissance est variable selon les sites : caractérisation des sols, géométrie de la zone humide, stratigraphie complète, chroniques piézométriques, données météo, écologie... Selon le (ou les) site(s) sélectionné(s), il sera nécessaire de mener des investigations complémentaires afin d'acquérir les données spécifiques pour répondre à la problématique de ce projet. Le choix définitif des sites est actuellement en cours.

Un des objectifs de la phase 1 était de sélectionner des sites d'étude si possible déjà équipés en moyens d'observation pour disposer d'historiques de mesures, mais qui soient aussi représentatifs de configurations des zones humides tant sur le plan physique qu'en matière d'enjeux et de contraintes anthropiques. L'objectif est d'étudier la transposition des méthodes d'évaluation des soutiens d'étiage à l'échelle de la grande diversité des zones humides du bassin du Rhône.

Annexes

Pour des objectifs de soutien d'étiage, les zones humides à choisir doivent être d'une superficie d'au moins une centaine d'hectares. Celles de Montselgues et de Gimel initialement pressenties ont une superficie trop faible ou une configuration en réseaux de tourbières pas forcément connectées et donc une contribution de quelques litres par seconde seulement au cours d'eau situé à l'exutoire. Des rencontres avec les gestionnaires et des visites de terrain sont prévues prochainement sur d'autres sites.

Détails et modalités des tâches:

1) Hydrologie (EMA et EMSE)

Objectifs et Principes : Instrumentation et suivi ; Définition des extensions du système ; Bilan hydrologique fondé sur des mesures de niveau d'eau et de débits, et interprétation en termes de stockage/restitution

Moyens matériel à acquérir : sondes CTD, stations de jaugeage, piézomètres

Moyens humains à recruter : post-doc (10 mois) et 2 masters

Livrables : chroniques de niveau d'eau, entrées/sorties du système

2) Pédologie (ISTHME)

Objectifs et Principes : caractérisation de la nature et des propriétés hydrodynamiques des horizons des sols ; tests en labo (ex : tests en colonnes) et/ou sur le terrain (ex : tests d'infiltration ou essais de pompage) ou des formules empiriques (ex : fonctions de pédotransfert)

Moyens matériel à acquérir : système d'implantation de piézomètre

Moyens humains à recruter : master

Livrables : interprétation des différents horizons pédologiques en termes de propriétés hydrodynamiques (perméabilité, emmagasinement, nature du substratum...) ; détermination de la réserve utile du sol (capacité au champ, point de flétrissement...)

3) Géochimie (UJM) :

Objectifs et Principes : Contribution des différents compartiments de l'hydrosystème fondé sur des traceurs géochimiques

Moyens matériel à acquérir : petit matériel pour la réalisation de piézomètres à disposer dans la zone humide étudiée, consommables pour prélèvements, analyses in-situ et en laboratoire des échantillons d'eau prélevées

Moyens humains à recruter : master

Livrables : traçage de l'origine des eaux alimentant la zone humide et approche semi-quantitative des mélanges d'eau depuis l'amont de la zone humide jusqu'à l'aval

4) Imagerie aéroportée haute-résolution (UJM) :

Objectifs et Principes : acquisition d'images infra-rouge thermiques (IRT) et d'orthophotographie et modèle numérique d'élévation (MNE) haute résolution (3cm/px)

Moyens matériel : capteur IRT et Drone de l'École des mines d'Alès

Livrables : modèle de surface de la zone humide - réseau de drainage (MNE Raster) et contraste thermique (Raster)

5) Géophysique (ENTPE) :

Objectifs et Principes : caractérisation de la géométrie des zones humides par radar géophysique, tomographie électrique

Moyens matériel à acquérir : petit matériel pour prospection géophysique, système d'implantation de piézomètre (adaptable sur carottier Cobra)

Moyens humains à recruter : master

Livrables : modèle 3D des horizons pédologiques de la zone humide

Articulation des tâches et planification

L'ensemble des tâches sera répartie sur les deux années 2017 et 2018.

L'année 2017 sera principalement consacrée aux tâches 1 et 2 (hydrologie et pédologie), 4 (Imagerie aéroportée) et 5 (Géophysique) pour les sites retenus. L'année 2018 sera surtout consacrée à la tâche 3 (géochimie) et à l'interprétation des résultats issus des données acquises dans les différentes tâches. La planification des tâches pourra être ajustée en fonction de l'avancement des investigations (aléa météo, conditions d'accessibilité, ...).

Ce projet est prévu sur deux ans :

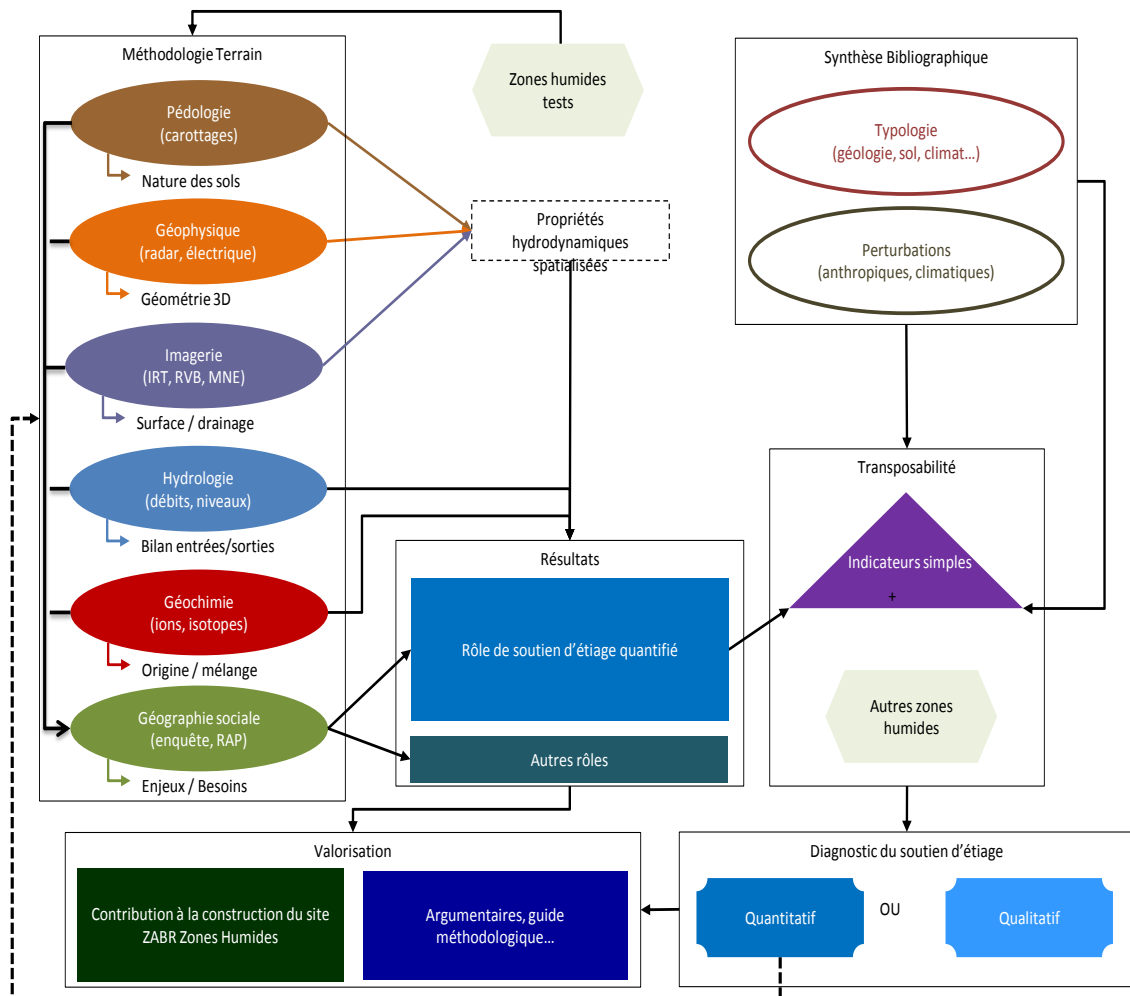
Subvention demandée : 91,836 K€

Autofinancement : 50%

Aide agence : 50%

Dépenses (€)	EMSE UMR5600		UMR5023 ENTPE	UJM	ISTHME UMR5600	EMA	Total
Cout de personnel	40 056	0	8 715	16 965	20 600	59 800	146 135
Personnel recruté pour le projet	2 772	0	2 772	2 772	2 772	41 400	52 488
Contribution du personnel permanent	37 284	0	5 943	14 193	17 828	18 400	93 648
dont cout salarial							0
dont environnement							0
Consommables (équipement de stations jaugeages, analyses chimiques, petit matériel, location salles - repas, pour ateliers et séminaires)	1 000		0	5 000	0	0	6 000
Equipement (sondes CTD, petit matériel pour prospection géophysique, système d'implantation de piézo)	5 000		7 000	0	0	5 000	17 000
Missions (dont invitations scientifiques externes participation ateliers)	2 000		1 000	1 000	1 000	3 000	8 000
Sous-traitance (transcription)	0		0	0	0	0	0
Frais généraux *	1 077	0	1 077	877	377	4 940	8 349
Total H.T.	49 133	0	17 792	23 843	21 977	72 739	185 484
* Frais généraux: sont fonction de l'établissement gestionnaire de la part de subvention revenant à l'unité de recherche impliquée (10% au maximum) Pour les unités en gestion directe CNRS, merci de libeller le nom du partenaire de la manière suivante : CNRS-UMRXXXX							
Recettes (€)**	EMSE	ENS UMR5600	UMR5023 ENTPE	UJM	ISTHME UMR5600	EMA	Total
Agence de l'Eau	11 849	0	11 849	9 649	4 149	54 339	91 836
Autres partenaires							0
Autofinancement	37 284	0	5 943	14 193	17 828	18 400	93 648
Total	49 133	0	17 792	23 843	21 977	72 739	185 484

Schéma illustrant la contribution scientifique des différentes disciplines au projet zones humides de têtes de bassins



Annexe 2 : Fiches de synthèse Zabr

A2.1. Fiche de synthèse Zabr - Phase 1 (2016-2017)

ZABR

Zone Atelier Bassin du Rhône

Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des Zones Humides de Têtes de Bassins (ZHTB) dans le soutien d'étiage des cours d'eau

Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône

Phase 1 : projet ZHTB (2016-2017)

Résumé :

Cette action de recherche vise à l'élaboration d'une méthodologie interdisciplinaire de caractérisation et de quantification du potentiel de soutien d'étiage des zones humides de têtes de bassins versants au cours d'eau. La phase 1 du projet ZHTB a permis : 1) de faire le point sur les typologies de zones humides et les méthodes de caractérisation du soutien d'étiage ; 2) de sélectionner 2 sites d'étude principaux et 3 sites complémentaires sur lesquels ces méthodes seront mises en œuvre. À terme, ce projet doit aboutir à la construction d'indicateurs de soutien d'étiage et à la publication d'un guide méthodologique et/ou technique pour la protection et la bonne gestion des zones humides.

Contexte :

Ce projet de recherche est en lien avec le thème Zabr « Ressources et changements climatiques » et les sites ateliers « Zones humides », « Rivières covenales », « Arc-Isère » et « OHM-Vallee du Rhône ». Il se rattache de plus aux thèmes de l'Agence de l'eau RMC liés à la question 35 « Quels échanges aux interfaces eaux souterraines / eaux superficielles ? » et à la question 19 « Comment appréhender et qualifier l'état et le fonctionnement des zones humides ? ».

Le projet ZHTB repose sur le postulat qu'il existe un rôle important des zones humides dans le stockage et le soutien d'étiage des cours d'eau, voire des nappes. Il existe un fort besoin en termes de connaissance du fonctionnement de la triple interface zones humides / eaux souterraines / eaux de surface. Les résultats du projet seront utiles dans le cadre de la DCE pour l'évaluation du bon état des masses d'eau, le dimensionnement et le suivi d'opérations de restauration ou le « test » milieux humides dépendants des eaux souterraines (ex : identification / typologie, risque / dégradation, surveillance, indicateurs pluridisciplinaires). Les indicateurs qui seront mis en œuvre pourront de plus être intégrés dans des modèles économiques de quantification de services écosystémiques (ex : stockage, régulation, marché du carbone).

Contact :

Frédéric Paron
Mines Saint-Etienne – UMR 5600 EVS
Centre SPIN
Département Procédés pour l'Environnement et Géoréources (PEG)
158, cours Fauriel CS 62362
42023 Saint-Etienne Cedex 2
e-mail : frederic.paron@mines-stetienne.fr ; Tél : 04 77 42 66 65

FICHE ZABR N°51

Cadre et perspectives d'utilisation :

Les conditions de transférabilité de la méthodologie mise au point et expérimentée en phase 2, ainsi que des indicateurs de soutien d'étiage qui seront développés sur les sites de Luitel et Frasné, seront étudiées sur 3 sites complémentaires : marais de Vaux (Ain), tourbière de Praubert (Impluvium d'Evian, Haute-Savoie) et tourbière de Montseignes (Ardèche). Des tests sur de nouveaux sites pourront être envisagés en phase 3, notamment sur le réseau de zones humides du bassin versant de l'Aude.

À terme, les objectifs transversaux du projet ZHTB ouvrent plusieurs perspectives d'utilisations des résultats qui semblent prometteuses.

→ Élaboration de types fonctionnels conceptuels des ZHTB :

- typologies des zones humides de têtes de bassins versants
- coupes schématiques fonctionnelles
- flux entrants / flux sortants ; stockage / restitution

→ Modélisation numérique du soutien d'étiage :

- modèles théoriques simplifiés issues des types fonctionnels conceptuels de ZHTB ou de cas réels
- scénarios de modélisation tenant compte, par exemple, de l'influence de la géométrie et des propriétés hydrodynamiques, de la variation des flux entrants ou de perturbations du système (ex : fossés de drainage, changement climatique...)

→ Création d'indicateurs du soutien d'étiage :

- liés à des paramètres et variables clefs (ex : hydrologie, hydrogéologie, géomorphologie, hydrométéorologie, ...)
- simples d'acquisition et d'interprétation
- utilisables sous SIG si possible (analyse spatiale)
- liés à des enjeux et besoins de gestion (ex : diagnostic, suivi, restauration...)

→ Spatialisation du fonctionnement des zones humides :

- critères de présence, de maintien et d'évolution des zones humides favorables au soutien d'étiage (ex : géomorphologiques, géologiques, climatiques...)
- enrichissement du concept d'espace de bon fonctionnement des zones humides

→ Co-construction des documents de valorisation :

- besoins : guides, argumentaires, information...
- destinataires : scientifiques, gestionnaires, élus, grands publics...
- types de document : plaquettes, guides méthodologiques, guides techniques, formations...
- groupes de travail : enjeux et objectifs, besoins

Références :

Paron, F., Ré-Bahuaud, J. et Graillet, D. (2017) Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins dans le soutien d'étiage des cours d'eau - Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône. Rapport phase 1. Zabr, AE-RMC, UMR 5600 EVS, Mines Saint-Etienne, 117p + annexes.

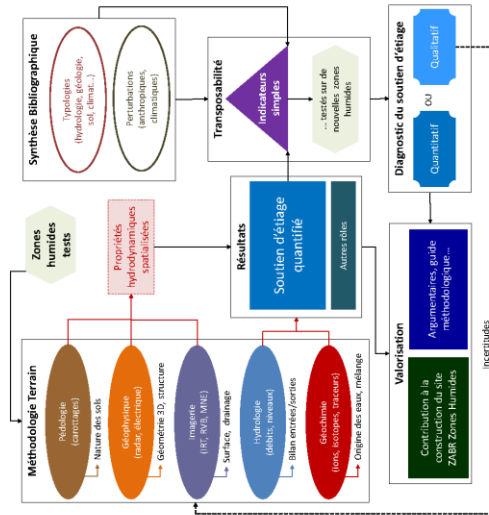


Figure 1 : Articulation interdisciplinaire de la phase 2

Favorisant	Stockage Écologie et ralentissement des crues	Régulation Soutien d'étiage
	État permanent : - Propriétés hydrodynamiques (S) des parties supérieures de l'acrotène (forte macroporosité) - Forte capacité d'infiltration de l'acrotène (liée à la forte macroporosité de surface) - Microporosité de surface (ralentissement du ruissellement) État transitoire : - Forte ETP : libre de l'espace disponible pour le stockage en périodes sans précipitation - Travaux de drainage (effet seulement à court terme) État conditionnel : - Si fort volume de l'acrotène (l'épaisseur étant toujours faible, la compensation peut se faire par des grandes surfaces)	État permanent : - Propriétés hydrodynamiques (KSt^*) des parties inférieures de l'acrotène (perméabilité intermédiaire entre 10^{-4} et 10^{-5} m/s) État transitoire : - Travaux de drainage (effet seulement à court terme) État conditionnel : - Configuration géométrique des tourbières minérographes (cote altimétrique haute due à leur zone ralentissant potentiellement la recharge des nappes d'accompagnement) - Si forte ETP : la compensation peut être toujours faible, la compensation peut se faire par des grandes surfaces - Si pente du substratum faible (<5%)
Défavorisant	État permanent : - Faible épaisseur de l'acrotène (faible volume disponible pour le stockage) - Propriétés hydrodynamiques (S) du catotène (faible capacité de stockage) État transitoire : - Fréquence élevée de hauts niveaux piézométriques (peu d'espace de stockage disponible) - Travaux de drainage (effet à long terme) État conditionnel : - Si présence d'écoulement préférentiel en conduits souterrains (écoulement souterrain rapide)	État permanent : - Propriétés hydrodynamiques du catotène (perméabilités faibles et eau pas ou peu mobilisable) - Forte ETP* et prélevement des végétaux directement dans la nappe (l'eau repose par les plantes et est plus disponible pour le cours d'eau ou la nappe) - Forte ETP* : la compensation peut être toujours faible, la compensation peut se faire par des grandes surfaces État transitoire : - Travaux de drainage (effet à long terme) État conditionnel : - Si pente du substratum forte (>5%) - Si présence d'écoulement préférentiel en conduits souterrains

Figure 2 : Synthèse des effets positifs ou négatifs des zones humides tourbeuses (en relation avec une nappe ou un cours d'eau) sur le rôle hydrologique (stockage et restitution) - Paramètres et variables clés décrivant :
- un état permanent : commun à toutes les zones humides tourbeuses en tout temps ;
- un état permanent : commun à toutes les zones humides tourbeuses en tout temps ;

* : [S : porosité efficace ; K : perméabilité ; ETP : Evapotranspiration]

Objectifs scientifiques :

Du point de vue scientifique, le projet ZHTB vise à apporter des éléments de réponse à la question suivante : *Qu'est-ce que les zones humides pour le soutien d'étiages ?*

Les objectifs généraux du projet sont les suivants : 1) mieux comprendre les interactions générales du cours d'eau / zones humides / eaux souterraines et la transformation du signal hydrologique à travers les zones humides ; 2) mieux appréhender les services rendus en termes de soutien d'étiage (ex : régulation, stockage) ; 3) préciser les vulnérabilités physiques des zones humides de têtes de bassins versants pour une meilleure protection et gestion.

De manière plus spécifique, le projet vise donc à préciser le rôle hydrologique des zones humides en : 1) quantifiant les capacités de stockage / transfert d'eau des zones humides ; 2) déterminant et quantifiant les origines des apports d'eau au cours d'eau à l'échelle du bassin versant ; 3) quantifiant les apports d'eau au cours d'eau à l'échelle de l'étagage. Ce travail tiendra compte du contexte (ex : altitude, géologie, géomorphologie, climat, type de zones humides...), des pressions anthropiques (ex : prélèvements, drainage, pollutions) et des incertitudes sur les mesures.

Le projet ZHTB est planifié en 3 phases dont les sous-objectifs à termes sont les suivants : **phase 1 (2016-2017)** - État de l'art - Choix des sites, des compétences et de l'instrumentation ; **phase 2 (2017-2018)** - Mesures et instrumentation sur 2 sites test - Modélisation - Développement et test des indicateurs de soutien d'étage ; **phase 3 (à planifier)** - Analyse et interprétation des données - Test des indicateurs sur de nouveaux sites - Valorisation.

Intérêt opérationnel :

D'un point de vue opérationnel, il y a des fortes attentes en termes de : 1) transfert de connaissance (ex : guide méthodologique ou technique) ; 2) production d'argumentaires pour la protection des zones humides ; 3) construction d'indicateurs simples de diagnostic et de suivi (ex : restauration, bon fonctionnement).

Principaux résultats :

La phase 1 du projet a conduit à la sélection de 2 sites d'études principaux, la tourbière de Luittel (Isère, France) et la tourbière de Frasse (Doubs, France). Le travail bibliographique réalisé sur les typologies des zones humides et les méthodes de caractérisation du soutien d'étiage a conduit à l'élaboration d'une méthodologie interdisciplinaire (Figure 1) et de plans d'instrumentation des 2 sites d'étude principaux qui seront mis en œuvre en phase 2.

Ainsi, l'instrumentation et les campagnes de mesures visent à acquérir ou à compléter les connaissances pédo-logiques, géophysiques, hydrologiques, hydrogéologiques et géochimiques. La quantification du soutien d'étiage nécessite de : 1) « boucler » de manière précise les bilans hydrique et hydrologique du site en identifiant et quantifiant les sources d'apport localisées ou diffuses (ex : pluie, ruissseau, aquifère dont drainage) et d'export (ex : évapotranspiration, surverse, infiltration); 2) caractériser en 3D la géométrie (parfois variable dans le temps) de la zone humide et ses propriétés hydrodynamiques (ex : perméabilité, porosité).

L'accent sera plus particulièrement mis sur la caractérisation de deux interfaces :

- 1) l'interface tourbière / versant pour estimer les apports et les pertes diffus liés à des écoulements souterrains ;
- 2) l'interface catolème / acrotème pour déterminer les propriétés hydrodynamiques de la zone hydrauliquement dynamique de la tourbière.

Les données et connaissances acquises seront utilisées pour modéliser le comportement de stockage / restitution d'eau des tourbières sur un ou plusieurs cycles hydrologiques et déterminer les paramètres et variables clefs (Figure 2) en vue d'identifier des indicateurs de suivi.

Annexe 3 : Compte-rendu de terrains et de réunions

A3.1. Réunion de démarrage phase 1 : 3 mars 2016

Réunion de démarrage
Comité technique
—
Projet Eau Sout' ZHTB
—
3 mars 2016 – Agence de l'eau - Lyon

Participants présents :

EMSE GSE et UMR 5600 EVS : Frédéric Paron, Didier Graillot, Jordan Ré-Bahuaud
AE-RMC : Laurent Cadilhac, François Chambaud, Émilie Lunaud, Martin Pignon
CREN RA : Delphine Danancher
CEN Savoie : Jérôme Porteret

Autres personnes intéressées :

UJM ISTHME UMR 5600 EVS : Hervé Cubizolle, Arnaud Duranel
AE-RMC : Nadine Bosc-Bossut, Joëlle Hervo, Lionel Perrin

Rappel de l'ordre du jour :

1. Présentation du projet (problématiques, objectifs, tâches prévues, compétences requises, focus sur les tâches de première années)

2. Échange et discussion autour des différents aspects du projet et notamment des points suivants :

- partage des objectifs : problématiques, besoins et moyens d'y répondre
- retours d'expérience à connaître
- personnes ressources à contacter ou associer en fonction des compétences requises
- sites équipés pouvant être mis à profit ou nouveaux sites à instrumenter (stratégie de choix des sites et d'instrumentation)
- consistance et définition des tâches de l'année 1

3. Fiche année 2 du projet

Informations importantes et à retenir

- Visite de terrain : juin à Montselgues (13 au 17 ?)
 - Réunion technique : avril au CEN Savoie
 - Compléter le tableau de choix multicritère des sites pour arriver rapidement à classement
 - Contact des personnes ressources pour former l'équipe interdisciplinaire
 - Première échéance Fiche ZABR année 2 : mi-avril
-

Documents joints et/ou envoyés par dl :

- présentation support de réunion (.ppt)
- tableau de sélection des sites (.xls)
- fiche d'intention de l'année 2 du projet (.doc)

La présentation du projet a été effectuée par F. Paran. La discussion s'est déroulée au fil de la présentation.

1. Compléments : problématique, objectifs, finalités, bibliographie

Globalement, la problématique, les objectifs, la finalité et les tâches prédéterminés pour le projet ont été jugées pertinentes. Toutefois, la discussion a permis de souligner l'importance de certains points et/ou d'apporter des éléments complémentaires.

✓ Éléments et questions de départ (voir ppt de présentation support de réunion)

Cette étude repose sur le postulat qu'il existe un rôle important des zones humides (ex : tourbières) dans le stockage et le soutien d'étiage des cours d'eau (voire des eaux souterraines).

Les questions posées sont les suivantes :

- Comment faire la part des origines des apports d'eau à l'étiage ?
- Comment quantifier les capacités (stockage et transfert d'eau) des zones humides à soutenir les cours d'eau à l'étiage ?

Lors de cette étude il s'agira :

- de séparer et quantifier les contributions des différents compartiments (ESO et ZH) au soutien d'étiage des cours d'eau par l'étude des flux d'entrées et sorties en précisant les incertitudes liées aux mesures.
- d'évaluer la capacité des ZH à contribuer au soutien d'étiage suivant le contexte altitudinal, géologique, géomorphologique, climatique selon leur typologie (ex : tourbières ombrotrophiques, géotrophiques...).
- d'identifier les possibles conséquences des éventuelles pressions anthropiques (ex : prélèvements, drainages, pollutions...).

Cinq questions préalables sont importantes à prendre en compte :

- Quelle(s) typologie(s) des ZH adopter ?
- Quelle(s) méthodologie(s) mettre en œuvre ?
- Quelles sont les compétences nécessaires pour l'étude ?
- Quels sont les sites adaptés pour l'étude ?
- Quelles sont les conditions de transférabilité des méthodes, résultats et connaissances (site, acteurs...) ?

✓ Objectifs

L'étude devra se concentrer sur les éléments qui influencent, qui perturbent, les ZH du point de vue des services (ex : capacité de stockage). Les éléments de perturbation peuvent être liés à des impacts anthropiques (ex : pollutions, politique d'assèchement...), de changements climatiques...

L'étude devra aussi porter une attention particulière à l'interface pédologique qui joue un grand rôle dans les transferts d'eau. La nature organique du sol, notamment tourbeux, constitue un bon indicateur de la capacité du milieu à stocker et à restituer l'eau. De plus, la connaissance de la géométrie et de la couverture pédologique de la ZH est d'importance dans une telle optique. Il conviendra de déterminer les propriétés hydrodynamiques (perméabilité, emmagasinement, nature du substratum...) des différents horizons pédologiques de la zone humide. La détermination (tests en labo et/ou sur le terrain de la réserve utile du sol (capacité au champ, point de flétrissement...)) de ces propriétés est un préalable indispensable à l'estimation de la capacité du milieu à stocker et à restituer l'eau (ex : rôle de soutien d'étiage).

La mise en œuvre méthodologie sera fondée sur l'étude de sites spécifiques dont le suivi, notamment hydrologique, sera le plus complet possible. La caractérisation du soutien d'étiage pourra se faire à deux niveaux suivant les enjeux et les données existantes :

1) en identifiant un nombre restreint d'indicateurs permettant de généraliser rapidement le fonctionnement des zones humides (ex : rôle des ZH dans le transfert d'eau de l'amont à l'aval) si les enjeux

sont faibles. Une telle caractérisation rapide sera qualitative et pourra être emprunte d'incertitudes, potentiellement fortes.

2) si les enjeux sont plus importants, il sera nécessaire de proposer une approche plus poussée, fondée sur des études plus complètes pour préciser le fonctionnement des ZH. Cette caractérisation devra être quantitative.

L'évaluation du potentiel de services rendus (ex : soutien d'étiage) d'une ZH devra être déterminée par rapport à un référentiel : 1) présence/absence de ZH ; 2) influences/perturbation sur la ZH ; 3) enjeux liés à la ZH.

Il conviendra aussi de réfléchir à différentes échelles : 1) échelles d'espace (site vs bassin versant) ; 2) échelles de temps (variations saisonnières, cycles hydrologiques).

✓ *Notion(s) de zone humide et référentiel(s)*

La notion de zone humide devra être définie avec soin. Il existe de nombreuses définitions de l'entité zone humide, des plus larges aux plus restrictives, mais une seule définition légale (Article L211-1 du code de l'environnement plus critères de l'AM du 1 octobre 2009 modifiant l'AM du 24 juin 2008). Il est possible par exemple de définir les ZH à l'aide de différentes entrées : pédologique, écologique, hydrogéologique...

Il existe de nombreux documents de référence dont « Le guide pour la reconnaissance des zones humides du bassin Rhône-Méditerranée » (ce document a été transmis en pdf par F. Chambaud) :

- <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/ZH/20120601-RAP-GuideReconnaissanceZh-Vol1-MethodeEtCles.pdf> : Volume 1 - Méthode et clés d'identification - Juin 2012

- <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/ZH/20120601-RAP-GuideReconnaissanceZh-Vol2-DossierEcoRegions.pdf> : Volume 2 - Fiches écorégions et clés d'identification - Juin 2012

Il existe par ailleurs de nombreux documents concernant la méthodologie d'étude et la typologie des zones humides (ex : SDAGE, Inventaire des zones humides, RHOME0, REX basse vallée de l'Aude...) en France et à l'étranger (ex : travaux québécois, USA...). Il conviendra de valoriser ces typologies dans l'étude.

✓ *Livrables, transférabilité et construction d'argumentaires*

Une réflexion sera engagée sur les livrables de l'étude (ex : rapports, plaquettes, site web, supports pédagogiques...) qui devront être accessibles à différents publics : gestionnaires, élus, grand public...

Il existe une forte attente en termes de l'évaluation du potentiel de transférabilité des résultats de l'étude. Cela dépasse les conditions de transférabilité des méthodes et outils. Les questions suivantes se posent : Quelles précautions prendre par rapport aux résultats ? Dans quelle mesure peut-on les utiliser ? Dans quels cas ? Pour quelles configurations hydrodynamiques ?

Le besoin d'argumentaire, notamment chiffré (flux, stockage), a été mis en avant. Il s'agit de développer des argumentaires pour montrer l'intérêt des zones humides (ZH) et motiver les maîtres d'ouvrage à les prendre en compte. Il est nécessaire de construire des argumentaires positifs (ne pas se contenter du constat de la régression des ZH) pour mettre en avant l'utilité des ZH (services) et les aspects fonctionnels en plus des aspects conservation. Le besoin en argumentaires locaux est aussi important, notamment dans le cadre de la GEMAPI (Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations).

2. Compétences et personnes ressources nécessaires au projet

Dans ce projet, l'intégration de compétences en pédologie semble incontournable. Différentes personnes ressources ont été évoquées :

- Eric Lucot - *Chronoenvironnement (travaux sur la forêt de Chaux)*
- Jérôme Poulenard et JM Dorioz - *EDYTEM*
- Dominique Valo et B. Sarazin - *ISARA*
- Jean-Marcel Trevisan - *INRA (projet Tip Top)*

D'autres compétences peuvent s'avérer intéressantes pour le projet :

- Tourbières / Pédologie : caractérisation / propriétés hydrodynamiques

Contacts : Hervé Cubizolle et Arnaud Duranel (UJM ISTHME EVS) ; Jean-François Didon-Lescot (UMR Espace)

- Odonates : indicateurs hydrologiques (dynamique, milieu temporaire, assèchement)

Contacts : Bernard Pont (Réserves de la Platière) ; Véronique Rosset (IRSTEA MALY)

- Végétation aquatique :

Contacts : Sara Puigalon et Marc Philippe (LENHA) ; Gilles Pache (Conservatoires botaniques Alpin et Massif Central)

- Géophysique :

Contacts : Stéphane Garambois (Univ. Grenoble) ; Thierry Winiarski (LENHA ENTPE)

- Géochimie : saisonnalité des transferts

Contacts : Véronique Lavastre (UJM) ; Adriano Mayer (Univ. Avignon) ; Olivier Radakovitch (CEREGE)

- Imagerie : IRT / MNS voire MNT

Contacts : Vincent Wawrzyniak et Hervé Piegay (ENS Lyon), Damien Fayeaux (IUT Saint-Etienne) ; CD Ain et CREN (LIDAR)

- Sociologie : représentations / perceptions des ZH

Contacts : Marylise Cottet (ENS Biogéophyle EVS)

3. Grille/tableau de sélection des sites (voir tableau xls à compléter)

Il existe 86 sites de zone humide (RHOME0) en Rhône-Alpes dont une vingtaine équipés. Le CREN possède un plan de gestion pour chacun des sites. La connaissance est variable selon les sites : caractérisation des sols, géométrie de la zone humide, stratigraphie complète, chroniques piézo, données météo, écologie...

Sites d'intérêt potentiel très fort a priori :

- Tourbière de Montselgues
- Tourbière de Gimel (Site d'essai potentiel)
- Tourbière de Luitel

Il conviendra de sélectionner des sites, de préférence déjà équipés, représentatifs de différents type de fonctionnement des zones humides.

4. Année 2 du projet (voir fiche d'intention de l'année 2 du projet)

La prochaine échéance pour l'élaboration d'une version 1 de cette fiche est fixée à mi-avril.

Il conviendra de :

- préciser les compétences impliquées
- les moyens humains et financiers nécessaires

Informations importantes et à retenir

- **Visite de terrain : juin à Montselgues (13 au 17 ?)**
- **Réunion technique : avril au CEN Savoie**
- **Compléter le tableau de choix multicritère des sites pour arriver rapidement à classement**
- **Contact des personnes ressources pour former l'équipe interdisciplinaire**
- **Première échéance Fiche ZABR année 2 : mi-avril**

A3.2. Réunion technique CEN Savoie : 19 avril 2016

Réunion technique
Choix des sites et du protocole d'instrumentation
–
Projet ZABR - Eau Sout' ZHTB
–
<i>19 avril 2016 – CEN Savoie – Le Bourget du Lac</i>

Participants présents :

EMSE GSE et UMR 5600 EVS : Frédéric Paran, Jordan Ré-Bahuaud

CEN Savoie : Jérôme Porteret

Autres personnes intéressées :

UJM ISTHME UMR 5600 EVS : Hervé Cubizolle, Arnaud Duranel

EMSE GSE et UMR 5600 EVS : Didier Graillot

AE-RMC : Laurent Cadilhac, François Chambaud, Émilie Lunaud, Martin Pignon

CREN RA : Delphine Danancher

AE-RMC : Nadine Bosc-Bossut, Joëlle Hervo, Lionel Perrin

Rappel de l'ordre du jour :

1. Sites Zones Humides Rhône-Alpes
2. Protocole d'instrumentation pour le suivi hydrométéorologique

Informations importantes et à retenir

- Visite de terrain à Montselgues : juin-juillet (à planifier)
- Tableau de choix multicritère des sites complété

Documents joints et/ou envoyés par dl :

- tableau de sélection des sites complété (.xls)

1. Sites de Zones Humides en Rhône-Alpes

Un projet InterReg (Rest' Alpes : Restauration des Habitats Alpains) a été déposé par le CEN Savoie. Ce projet comporte 2 volets :

- Gestion opérationnelle des milieux / restauration ZH
- Évaluation des services écosystémiques (fonctions, connaissance du fonctionnement hydro)

Il y a 5 sites pressentis :

- Chautagne
- Marais des Chassettes
- Tourbière du Plan de l'eau
- Marais de la Plesse
- Tourbière de Montendry

Si ce projet InterReg est accepté, ces 5 cinq sites pourraient bénéficier d'une instrumentation équivalente (voir point 2) aux sites du projet ZABR ZHTB. Cette opportunité permettrait d'inclure plus de sites et de retours d'expérience dans le projet, mais aussi une collaboration plus étroite (partage de connaissances et de moyens) avec le CEN Savoie.

Ces sites ont été renseignés dans le tableau de choix multicritère des sites, ainsi que plusieurs sites Rhône-Alpes déjà équipés et sur lesquels des études ont déjà été menées.

2. Protocole d'instrumentation pour le suivi hydrométéorologique

Le protocole d'instrumentation est élaboré en collaboration avec le CEN Savoie afin de convenir d'une méthodologie de suivi hydrologique commune pour les différents sites équipés (Rhoméo, InterReg, ZABR). Ceci facilitera la comparaison des sites entre eux et permettra de balayer une plus large gamme de zones humides et de configurations hydromorphologiques.

Le protocole de suivi hydrologique tiendra compte de l'instrumentation déjà mise en place dans le programme Rhoméo à savoir : 1 piézo « représentatif » par site « pertinent » avec enregistreur continu (profondeur : environ 2m). Il conviendra donc de compléter l'instrumentation, comme suit, pour répondre aux objectifs du projet ZABR.

Les points suivants semblent donc d'importance pour la mise en œuvre d'un protocole commun d'instrumentation qui permettra la quantification du soutien d'étiage :

- *Caractérisation des configurations hydromorphologiques :*

Les zones humides peuvent être présentes dans différents contextes géologiques et différents types de structures géomorphologiques. Ces dernières peuvent jouer un rôle dans le soutien d'étiage (ex : verrou sur étiage, dépression d'accumulation, dépression sans exutoires, doline en lien avec le karst, lien avec les versants, etc.).

- *Suivi hydrogéologique :*

Il s'agit en premier lieu de suivre les variations piézométriques dans la zone humide (1 piézomètre « représentatif » ou un réseau de piézomètres) et dans un second lieu de contrôler les échanges entre la zone humide et son encaissant (1 piézomètre à l'interface zone humide/versants et au besoin, 1 piézomètre dans les formations sous-jacentes à la zone humide).

- *Suivi hydrologique :*

Dans un premier temps, il s'agit de bien identifier le réseau de collecte des eaux superficielles à l'amont de la ZH et de bien définir le ou les exutoires de la ZH dans le but de bien maîtriser les flux entrants et sortants du système (imagerie aéroportée). Dans un second temps, il s'agit de construire des stations de jaugeages (seuils non permanent) en entrée(s) et sortie(s) du système.

- *Estimation de l'Évapotranspiration Réelle (ETR) :*

Cette variable semble critique notamment en été, elle joue potentiellement un rôle déterminant sur les variations des niveaux piézométriques. Il convient donc de l'estimer le plus finement possible à partir de données météorologiques et des connaissances pédologiques et floristiques disponibles.

- *Construction d'un modèle géométrique 3D de la ZH :*

Il s'agit de déterminer le volume de la ZH ainsi que sa stratigraphie à partir de sondages, de prospections géophysiques et d'imagerie aéroportée. La connaissance de cette géométrie est essentielle afin de mieux contraindre les bilans hydriques et quantifier le rôle de soutien d'étiage (en lien avec la pédologie et les variations piézométriques).

- *Caractérisation de la pédologie et détermination des propriétés hydrodynamiques :*

La perméabilité et la capacité de stockage sont dépendantes de la nature de la végétation (taille des fibres) et de son degré de décomposition (indice de Von Post). Il existe assez peu de valeurs mesurées (ex : essais de pompage/infiltration, perte au feu et pesée...) en Europe et notamment en France. Ces tests doivent être réalisés sur les différents sites investigués. Il s'agit de mettre en relation les niveaux piézométriques avec les propriétés hydrodynamiques du milieu ainsi que sa géométrie : le but est de traduire des variations piézométriques en termes de stockage et de déstockage d'eau.

A3.3. Comité technique - 14 avril 2017

CR Réunion de synthèse du projet ZHTB phase 1

Avril 2017

Choix des sites de zones humides Instrumentation - Planification

Participants :

AE-RMC : Laurent Cadilhac, François Chambaud

UMR5600 EVS : Frédéric Paran, Didier Graillot, Jordan Ré-Bahuaud

Rappel de l'ordre du jour et plan du compte-rendu:

1. Recadrage de la problématique du projet
2. Classement et choix des sites de zone humide
3. Instrumentation des sites de zones humides
4. Plan du rapport de la phase 1 du projet
5. Planification de la suite du projet : échéances, tâches, calendrier, réunions...

Informations importantes et à retenir pour la suite... :

- Contacter les gestionnaires des sites sélectionnés : fin avril
- Organiser sur 1 journée Réunion du comité de pilotage (matin) et Réunion de démarrage de la phase 2 (apm) : 26, 28 ou 30 juin ; 3 ou 4 juillet
- Rédiger le rapport phase 1 : version 1, livraison semaine du 19 juin (envoyé par Jordan Ré-Bahuaud)
- Classement des sites :
 1. Lac de Luitel
 2. Tourbière de Frasne
 3. Tourbière de Praubert
 4. Marais de Vaux
 5. Tourbière de Montselgues

1. Recadrage de la problématique du projet

L'analyse préliminaire de la bibliographie fait ressortir que le rôle de soutien d'étiage des zones humides et notamment des tourbières est potentiellement faible voire très faible. Plusieurs publications issues de travaux réalisés en Belgique, aux Pays-Bas, en Allemagne et en Angleterre remettent en cause le rôle d'éponges des tourbières. Pour les tourbières, seul l'acrotelme (quelques dizaines de centimètres) semble avoir un rôle dans le stockage/déstockage d'eau.

Dans le cadre du projet ZHTB, il conviendra donc d'une part de confirmer ou non les résultats de ces travaux sur les sites d'étude sélectionnés et d'autre part de travailler sur des notions et objectifs corollaires.

- **Interactions des zones humides avec leur hydrosystème**

- Lien avec d'autres entités de l'hydrosystème : aquifères, cours d'eau

[cf : projet ZABR INRA DYNAMO, CEN Savoie, Geneviève CHIAPUSIO (Université de Franche Comté dans le cadre d'une mise à dispo d'une année à l'INRA) et Bernard DAVID (USMB), marais du Haut-Rhône, 60ha de ZH tourbeuse exploités en maïs depuis 30 ans qui va être remise en eau par le CEN]

- Transformation du signal hydrologique à travers la zone humide : rôle de frein et de retard à l'écoulement ? ; Temps de séjours de l'eau dans la zone humide (datation : âge de l'eau dans les aquifères latéraux ; âge de l'eau à l'exutoire de la zone humide)

[cf : Virginie VERGNAUD, Université de Rennes : CFC, SF6, Tritium...]

- **Répartition et fonctionnement des zones humides**

- Approche prospective : critères de présence, de maintien et d'évolution des zones humides (contextes géomorphologique, géologique et climatique)

[cf : guide reconnaissance des zones humides AERMC ; stage AERMC : test sur quelques bassins versants]

- Concept d'espace de bon fonctionnement des zones humides incluant des aspects hydrogéologiques et hydrologiques

- **Objectifs opérationnels**

- Indicateurs simplifiés de diagnostic et de suivi
- Critères opérationnels pour la restauration des zones humides

2. Classement et choix des sites de zone humide prospectés en phase 1

1. Lac de Luitel
2. Tourbière de Frasne
3. Tourbière de Praubert
4. Marais de Vaux
5. Tourbière de Montselgues

Autres sites à intégrer en phase 3 du projet :

- Zones humides de l'Aude (lien accord cadre AERMC-ONF)
- Autres sites complémentaires (analyse de données, test des indicateurs simplifiés)

3. Instrumentation des sites de zones humides

N°	Nom	Points positifs	Questionnements	Équipements complémentaires et travaux envisagés
1	Luitel	- Facilité d'accès et appui technique - Site bien circonscrit et de taille réduite - Surface et un volume intéressant de tourbe - Géométrie et pédologie connues - Exutoires bien identifiés - Nombreuses données et études existantes (LIDAR, piézométrie...) - Site déjà bien équipé - Équipes de recherche impliquées	- Piezomètres pas toujours ancrés dans le substratum - Possible apports de versant - Relations moraine/tourbière - Contexte faillé	- Mise en place d'un seuil jaugé (PVC, triangulaire, 2 sondes CTD) à la surverse du Lac - Évaluer l'influence du niveau du lac par rapport aux débits à l'exutoire (possibilités de sous-écoulements) - Surveiller les débits à l'aval de l'exutoire du lac (proche fontaine du Mulet ; 1107m) - Effectuer un traçage des pertes du ruisseau de Fontfroide en complément de ceux déjà réalisés (Biju-Duval, 1983, 1994, 2001) - Dispositif suivi gonflement tourbière (repère gradué, station géodésique) ? - Géochimie (traceurs, datation) - Analyse des données existantes <i>Temps approximatif de mise en place des équipements : 10 à 12 mois</i>
2	Frasne	- Appui technique envisageable - Site bien circonscrit et volume intéressant - Site très encadré scientifiquement - Inscription du projet dans le Plan de Gestion - Site déjà bien instrumenté - Nombreuses données structurées (LIDAR, piézométrie...) - Apports latéraux potentiellement très limités	- Contexte karstique/glaciaire : zones de perte, apports et pertes diffuses potentiels - Site partiellement équipé et difficultés sans doute pour reconstituer le débit à l'exutoire à partir des hauteurs mesurées sur la station hydro - Connaissance de la géométrie et de la pédologie à améliorer - Intégration du projet dans les actions de l'université de Besançon et d'Orléans	- Installation d'un seuil jaugé à section triangulaire et 2 sondes CTD à l'exutoire (à aval de la sonde Univ. Besançon au niveau de la route forestière) - Installation d'une sonde CTD dans la doline du Creux du Lard - Installation d'une sonde CTD au Lac de l'Entonnoir - Sondages pédologiques et investigations géophysiques complémentaires - Géochimie (traceurs, datation) - Analyse des données existantes - Caractérisation de la tourbe (stockage/déstockage d'eau) <i>Temps approximatif de mise en place des équipements : 10 à 12 mois</i>
3	Praubert	- Appui technique et compléments financiers envisageables - Facilité d'accès - Site bien circonscrit avec une surface et un volume intéressant - Bonnes connaissances géomorphologiques 2 stages de master en cours	- Pas ou peu d'équipements - Peu de données existantes - Difficulté pour estimer les apports du bassin versant - Inconnues sur d'éventuelles fuites à travers les cordons morainiques à perméabilités variables - Station météo éloignée du site - Pas de géométrie précise de la zone humide	- Installation de sondes si forage de nouveaux piézomètres dans la tourbière et mise en place de 2 seuils jaugés (ruisseau de Copy et ruisseau de Rully) pris en charge par CCPEVA et SAEME - Analyse de données (sous réserve de l'équipement du site) <i>Temps approximatif de mise en place des équipements : 10 à 12 mois (sans compter les forages)</i>
4	Vaux	- Appui technique - Un exutoire bien identifié - Études hydrologiques et pédologiques - Projet de restauration hydraulique : possibilité de travailler sur l'effet des travaux sur le soutien d'étiage - Données prévalables existantes (piézométrie et Lidar notamment)	- Site moyennement instrumenté et difficile à équiper (station de jaugeage) - Bassin versant très étendu et karstifié : infiltration potentielle des eaux sur la partie aval ; nombreux apports par sources et diffus - Projet de restauration hydraulique : difficulté pour le positionnement durable de l'instrumentation - Pas de géométrie de la zone humide	- Analyse des données existantes - Appui aux gestionnaires si besoin sur des questions hydro - Analyse par critères simplifiés en contexte karstique (fin de phase 2 / phase 3)
5	Montselgues	- Appui technique - Données existantes 1 doctorat en cours	- Épaisseur faible des horizons tourbeux - Petites tourbières dont la superficie est très faible - Relations privilégiées avec les formations gréseuses - Exutoires diffus - Site difficile à équiper	- Analyse des données existantes - Appui aux gestionnaires si besoin sur des questions hydro - Analyse par critères simplifiés en contexte sédimentaire et cristallin (fin de phase 2 / phase 3)

Plan du rapport de la phase 1 du projet

1. Typologie des zones humides

1.1. Typologies de référence

Habitats, couverture : nomenclature nationale et internationale

1.2. Typologie hydraulique

Quelles sont les zones humides favorables au soutien d'étiage ?

1.3. Critères de répartition spatiale des zones humides

Principe, premiers résultats (bassin RMC, régionalisation)

2. Méthodes et méthodologies

2.1. Bilans hydriques et hydrologiques

Termes du bilan, flux, stock, éléments perturbateurs

2.2. Méthodes d'investigation et de mesure

Prise en compte des incertitudes

3. Synthèse bibliographique

3.1. Type de publications sur le sujet

3.2. Auteurs, experts, laboratoires de recherche impliqués

3.3. Avis sur le soutien d'étiage

3.4. Autres fonctionnalités des zones humides

4. Plan d'instrumentation des sites

4.1. Critères de choix des sites

4.2. Présentation des sites / spécificités

4.3. Instrumentation des sites et acquisition de données

5. Mise en œuvre de la phase 2

Indicateurs simplifiés (analyse de forme de courbe de réponse hydro)

Annexes :

- CR de réunion
- CR de visite de terrains
- Fiches ZABR phase 1 et phase 2
- Grille de comparaison des sites de ZH
- Réseau de gestionnaires (contacts)

5. Planification de la suite du projet

Contact des gestionnaires des sites sélectionnés : fin avril

1 journée Réunion du comité de pilotage (matin) et réunion de démarrage de la phase 2 (apm) :

26, 28 ou 30 juin ; 3 ou 4 juillet

Participants : gestionnaires de sites, nouveaux partenaires scientifiques phase 2 (EMA, UJM- UMR CNRS LMV, UJM-IUT, UJM-UMR CNRS EVS, ENTPE- UMR CNRS LEHNA)

Rapport phase 1 : version 1, semaine du 19 juin

À prévoir en phase 3 :

- Lien avec l'accord cadre AERMC-ONF / ZH de l'Aude
- Contact des gestionnaires des sites complémentaires
- Discussion sur la prise en compte de nouveaux volets :
 - . modèles prédictifs de répartition de zones humides (UJM- UMR CNRS EVS)
 - . sociaux : perceptions, enjeux, besoins (ENS-UMR CNRS EVS)
 - . intégration d'indicateurs paysagers (ENP Blois, ZAL)
 - . intégration d'indicateurs écologiques (IRSTEA)
 - . quantification de services écosystémiques (Univ. Besançon et Orléans)

A3.4. Comité de pilotage : 26 juin 2017

Comité de pilotage – Projet ZHTB soutien d'été

Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins (ZHTB) dans le soutien d'été des cours d'eau

26 juin 2017 – Agence de l'eau RMC – Lyon

Clôture de la phase 1 et démarrage de la phase 2

Participants :

CEN : Delphine Danancher, Jérôme Porteret, Clara Nikolitch, Fabrice Grégoire, Sylvie Duret, Thomas Martin

EMA : Anne Johannet

FRAPNA : Marie Hebert

IGE-CNRS : Jean-Paul Laurent

LCE-UFC : Catherine Bertrand

ONF : Carole Desplanque, Isabelle Gehin, Christophe Cocula, Maëlle Ravatin

SMMAHD : Geneviève Magnon

UMR 5023 LEHNA – ENTPE : Thierry Winiarski

UMR 6524 LMV – UJM : Véronique Lavastre

AE-RMC : Laurent Cadilhac, François Chambaud, Nadine Bosc

UMR 5600 EVS : Frédéric Paran, Didier Graillot, Jordan Ré-Bahuaud

Excusés :

LCE-UFC : Marie-Laure Toussaint, Daniel Gilbert ; *CCPEVA* : Pierre Loiseau ; *Danone* : Patrick Lachassagne ;

ONF : Benoit Laroque

Rappel de l'ordre du jour :

1. Présentation des travaux de la phase 1 (F. Paran et J. Ré-Bahuaud)
2. Discussion : rapport phase 1, typologies, méthodes, critères et indicateurs, choix des sites...
3. Présentation de la phase 2 (F. Paran et J. Ré-Bahuaud)
4. Discussion : mise en œuvre des investigations de terrain sur les sites d'étude...

Informations importantes et à retenir :

- Rappel du lien du cloud ZHTB : <https://seafire.emse.fr/d/b2cb20daf4/>
- Finalisation du rapport phase 1 (juillet/septembre)
- Planning/ordonnancement des opérations sur les sites d'étude (septembre)
- Groupes de travail à envisager : 1) piézométrie en tourbière et interface tourbière/encaissant géologique ; 2) élaboration de scénarii de modélisation ; 3) documents de valorisation / guide méthodologique ou technique ; 4) modalités de partage et d'échange de données / outil général ; 5) méthodes d'analyses des signaux piézométriques et des débits ; 6) types de zones humides les plus souvent rencontrés en têtes de bassins versants
- Matériel : spectromètre ¹⁸O et ²H
- Intégration du BV de l'Aude en tant que site de zones humides (Phase 2 et phase 3)

1. Points discutés suite à la présentation des travaux bibliographiques effectués en phase 1

• Réglementation

Du point de vue réglementaire, les critères botanique et pédologique sont prépondérants pour l'identification et la caractérisation des zones humides. Jusqu'à présent [arrêté ministériel (AM) du 24 juin 2008 modifié par AM du 1^{er} octobre 2009] ces critères étaient alternatifs (sols hydromorphes ou végétation).

La note technique du 26 juin 2017 du ministère de l'environnement, signée par le directeur de la direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) fait suite à l'arrêt du conseil d'État qui remet en cause le caractère alternatif des critères pédologique et botanique de l'AM. La note dit en substance qu'il existe deux cas :

1. lorsque que la végétation spontanée caractéristique est présente le diagnostic de la zone humide se fait sur la base des deux critères pédologique et botanique (critères cumulatifs) ;
2. en l'absence de végétation spontanée caractéristique des zones humides, le critère pédologique est suffisant pour le diagnostic d'une zone humide (critère alternatif).

Cela se complique pour l'application de la police de l'eau et pour répondre au conseil d'État. La note dit qu'il faut la présence cumulée de la végétation et du sol pour être en présence de zones humides. En l'absence de végétation la police de l'eau ne peut plus statuer.

Cette note ne permet de réintégrer qu'une partie des zones humides dans le cadre de la protection de la police de l'eau par rapport à la situation précédente. Ainsi, la direction de l'eau et de la biodiversité signale qu'elle travaille à d'autres suites juridiques pour rétablir l'ensemble des zones humides dans leur propre définition.

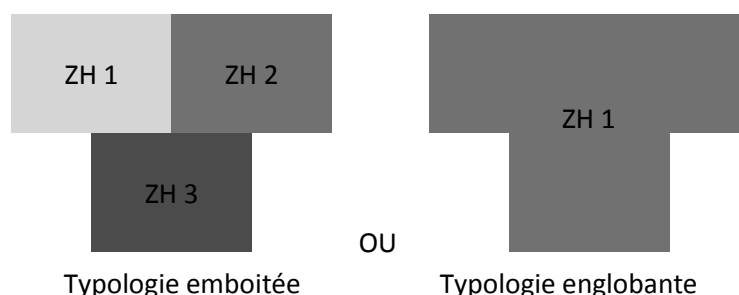
Cf. Document transmis par François Chambaud : *Note technique du 26 juin 2017 relative à la caractérisation des zones humides* (NOR : TREL1711655N), celle-ci vient d'être publiée au BO du MTES :

http://www.bulletin-officiel.developpement-durable.gouv.fr/fiches/BO201712/met_20170012_0000_0011.pdf

• Typologies des zones humides

Les typologies des zones humides proposent une nomenclature reposant sur des types bien différenciés et bien tranchés. Sur le terrain, il n'est pas toujours possible d'associer une zone humide à un type particulier. Il existe en effet des intermédiaires entre 2 ou plusieurs types (ex. milieux mixtes). De plus, nombre de zones humides présentent des milieux dits « en mosaïque » qu'il n'est pas forcément simple de caractériser. À Frasne, par exemple, on trouve plusieurs types de tourbières (soligènes, limnogènes, ombrogènes...). On observe aussi des tourbières ombrotrophes qui se développent sur des milieux minérotrophes. De plus, la caractérisation du type de ces milieux peut évoluer en fonction de la connaissance que l'on en a. De tels milieux peuvent aussi évoluer dans le temps de manière naturelle ou du fait des activités/aménagements humains (ex. Frasne).

La question de l'échelle de travail prend ici toute son importance. L'étude de tels milieux « en mosaïque » doit-elle reposer sur une typologie emboîtée ou sur une typologie englobante ?



- **Indicateurs**

On pressent que les changements climatiques auront un effet sur les zones humides. Ainsi, certains types seront vraisemblablement résilients et/ou résistants (lesquels ?) d'autres voués à disparaître (lesquels ?). Il serait intéressant de disposer d'indicateurs de résilience des zones humides aux changements climatiques. La nature de l'alimentation des zones humides (Précipitations, ESO et/ou ESU) apparaît alors comme déterminante.

- **Soutien d'étiage**

L'étiage, dans son acception la plus courante, est une notion statistique et hydraulicienne qui correspond à la période de l'année durant laquelle le débit d'un cours d'eau (ou d'une nappe souterraine) atteint son niveau le plus faible (basses eaux). Pour rappel, le projet vise à évaluer la faculté des zones humides à constituer un stock hydrique et à le restituer de manière déphasée vers les cours d'eau qui les drainent sur la période où leur soutien par les précipitations est le plus faible (étiage estival et pas hivernal).

Dans la suite des travaux (phase 2), il va être important de : 1) préciser la méthode (ex. bilan hydrologique, ratios de restitution en m³/ha, modélisation, ...) pour quantifier le soutien d'étiage et 2) déterminer des critères quantitatifs pour définir la qualité du soutien d'étiage.

1) Comment mesure-t-on le soutien d'étiage ?

En premier lieu, il s'agira de définir sur quelle base on mesure le rôle de soutien d'étiage et son importance (qualité). Est-ce un pourcentage du débit d'étiage ou de basses eaux du cours d'eau ? Doit-on se baser sur des débits spécifiques (qui prennent en compte la surface du bassin versant drainé) ? Comment considérer le caractère dynamique du tarissement (coefficient de tarissement) ? Doit-on pondérer en fonction du régime climatique du bassin versant considéré ? Doit-on pondérer en fonction de la surface, de l'épaisseur et des caractéristiques hydrodynamiques de la zone humide (ex. tourbe) ?

2) Sur quelles bases définit-on la qualité du soutien d'étiage ? (ex. Définition de classes comme : très bon, bon, moyen, faible, très faible, négligeable)

En second lieu, il s'agira de définir des valeurs pour lesquelles on passe d'une classe à une autre. Pour ce faire, plusieurs pistes sont envisagées, comme par exemple, la comparaison par rapport à des aquifères standards ou à des textures de matériaux poreux (ex. graves, sables, limons, argiles).

La question du soutien d'étiage a fait l'objet de nombreuses remarques lors du comité de pilotage. Les paragraphes suivants synthétisent la teneur des échanges.

Contribution des eaux souterraines - Les sites en vase clos [pluie → stockage ZH → restitution ESU] n'existent pas ou quasiment pas (ex. Tourbière de l'Étui dans le massif des bois noirs (42) = tourbière uniquement ombrotrophe). Il y a souvent des apports par suintement des nappes latérales (ESO). Il semble donc important d'inclure dans le soutien d'étiage au cours d'eau les apports d'eau souterraine transitant par une zone humide.

Régulation des flux hydrologiques - La question du soutien d'étiage est fortement dépendante du temps de circulation des flux dans les zones humides (transmissivité) et d'effets de retardement (tampon, crues, durée de piégeage de l'eau, durée ou persistance du phénomène de restitution...). Ce temps peut dépendre de la localisation de la zone humide (altitude, latitude, climat), de son type, des périodes de l'année, de la végétation et du microclimat généré par la présence de cette même zone humide (ex. effet sur la nébulosité). Ainsi, le rôle de soutien peut être plus ou moins important. On observe souvent une désynchronisation des signaux : les gros apports des zones humides au cours d'eau ne se faisant pas forcément à l'étiage.

Pondération en fonction du contexte climatique et des enjeux - La notion de soutien d'étiage mériterait, dans une phase ultérieure du projet, d'être aussi caractérisée en fonction du contexte et des enjeux locaux en distinguant : 1) les secteurs où la pluviométrie est abondante et bien répartie pour lesquels la question du soutien d'étiage est vraisemblablement mineure (relativiser les études réalisées en Belgique ou en zone

de montagne ?) ; 2) les secteurs pour lesquels la question du soutien d'étiage est cruciale (ex. zone méditerranéenne) en période de sécheresse.

Dans de tels contextes d'étiage sévère et de forte sécheresse, il peut être intéressant de considérer le soutien d'étiage même faible d'une zone humide, ou d'intégrer de manière cumulative le soutien d'étiage de nombreuses zones humides (même petites) à l'échelle de bassins versants (cf. le canal du midi serait alimenté par les 5000 petites zones humides du bassin versant de l'Aude). L'étude de la vulnérabilité de ces secteurs en contexte de changement climatique est prépondérante [variation future de la pluviométrie et du ratio l'ETP/ETR (la demande climatique sera plus importante et la capacité à céder de l'eau à l'atmosphère par évapotranspiration probablement supérieure à l'ETP, effet oasis)].

• **Tourbières vs autres types de zone humides**

La phase 1 a porté une attention importante aux zones humides de type tourbières. Par la suite, il serait intéressant de creuser la question pour d'autres types de zones humides et par exemple, les prairies humides (ex. prairies à molinies), les marais paratourbeux, les mégaphorbiaies, ... Il est fort probable que de tels milieux contiennent moins d'eau piégée que les tourbières. Ces milieux pourraient avoir un effet tampon différent par rapport à des zones humides déjà/toujours saturées. Il faudrait déterminer l'importance du substratum, les effets du sol, les effets des variations du niveau de nappe sur cette propriété tampon.

• **Problèmes rencontrés pour l'étude hydrologique des tourbières**

L'étude des tourbières posent différents problèmes :

- la géométrie change en fonction de l'emménagement [alternance assèchement/saturation de la matière organique liée aux variations saisonnières ; capacité au champ (stockage maximum de la tourbe) et point de flétrissement permanent (Pf 4.2 l'eau absorbée par la tourbe n'est plus disponible pour les végétaux, les forces de rétention de la tourbe étant plus fortes que les forces de succion des plantes) et de l'évolution du milieu (accumulation de matière organique sur des temps longs)] ;
- la catotélme n'est généralement pas homogène ce qui entraîne une variation de ses propriétés hydrodynamiques. L'analyse de carottes de tourbes est nécessaire afin de déterminer et caractériser ces variations ;
- l'acrotélme composée de sphagnes peut se comporter comme une petite zone non saturée [Comment varie la saturation ? Comment l'eau de pluie s'infiltre vers la tourbe en fonction de la saturation (rapide, lent, transparence du signal de réponse) ? Y a-t-il ruissellement ? Existe-t-il des niveaux préférentiels de circulation d'eau dans la tourbe (structure des matériaux organiques et propriétés) ?] ;
- l'implantation, l'ancrage de piézomètres et l'isolement des surfaces traversées les unes par rapport aux autres sont souvent problématiques ;
- le type de tourbe peut perturber les investigations géophysiques.

Il pourrait être intéressant de créer un groupe de travail piézométrie en tourbière (**cf.** Jean-Paul Laurent).

Cf. Documents transmis par François Chambaud relatifs aux sols et à l'humus :

- Estournel-Pelardy C. (2011) Étude de la structure moléculaire de la matière organique des sols. Nouvelles stratégies de dégradation chimique. Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 229p.
- Afes (2008) Référentiel pédologique. Quae ed., Versailles, 432 p.
- Jabiol B., Brêthes A., Ponge J. F., Toutain F., Brun J. J. (2007) L'humus sous toutes ses formes, deuxième édition (des E. et des F. École Nationale du Génie Rural, Ed.) (Deuxième édition ed.). Nancy, France: École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.

• Méthodes et moyens d'investigations des tourbières

Les méthodes géochimiques sont souvent utilisées pour travailler dans les tourbières :

- isotopes stables de l'eau (^{18}O , ^2H) [cf. Porteret (2007) tourbière de la Prenarde (42), l'analyse dans l'acrotelme, la catotelme, et les ESU amont et aval montrent que l'eau a tendance à contourner la tourbière étudiée] ;
- ions majeurs pour caractériser un signal / chroniques chimiques basse-fréquence (ex. Frasne)

Le SNO (Service National d'Observation) Tourbière possède un spectromètre PICARRO de terrain ^{18}O , ^2H (cf. Catherine Bertrand). La présence de matière organique dans l'eau peut perturber les mesures. Il est alors nécessaire de l'éliminer (complément à acheter : 9K€).

Les variables ETP ou ETR sont des paramètres clefs pour l'étude des tourbières. Ces variables peuvent être mesurées de manière directe à l'aide de tours à flux, mais cette méthode est lourde à mettre en œuvre et onéreuse (cf. IGE Jean-Paul Laurent). Des mesures locales d'ETP ou d'ETR sont préférables à des mesures régionales ou interpolées (ex. ETP grille).

Des modélisations simplifiées pour des configurations types (avec des données réelles ou non) pourraient apporter des informations intéressantes concernant la circulation des flux d'eau et la transformation du signal hydrologique. Un groupe de travail sur la question pourrait être mis en place (cf. Jérôme Porteret).

• Zones humides et impacts anthropiques

De nombreuses zones humides (notamment des tourbières en Ardèche) sont d'origine anthropique. De telles zones humides sont apparues suites à l'atterrissement d'un milieu d'eau libre causé par la création d'un barrage, d'un seuil, d'une retenue collinaire ou d'une carrière...

Les zones humides n'en restent pas moins très vulnérables aux impacts anthropiques : drainage, urbanisation, évolution de l'occupation de l'espace, déconnexion avec le bassin versant, pollution... Leur destruction ou leur dégradation met en péril des fonctions et services.

2. Points discutés concernant le choix des sites et leur étude

• Rappel des critères de sélection des sites de zones humides

■ Contexte géologique et climatique

- Cristallin / métamorphique
- Sédimentaire

■ Localisation

- Têtes de bassins versants
- Bassin hydrogéographique RMC

■ Dimension

- Surface : 10 à 100 ha ; Impluvium : >100ha ; 10 à 200l/s
- Exutoires bien identifiés
- Épaisseur : 1 à plusieurs mètres

■ Flux d'eau – modalités d'alimentation

- Contexte simple
- Apports aux limites connus
- Ombrotrophe vs minérotrophe
- Géochimie [date]
- Autres

■ Connaissances, données et équipements

- Station météo, Piézomètres, Station de jaugeage [nombre]
- Sondages géophysique et pédologique, topographie [nombre]
- Paramètres hydrodynamiques

■ Activités humaines / Enjeux

- Restauration
- Aménagements/Activités

■ Équipes de recherche impliquées

■ Accès

Les critères de sélection des sites de zones humides ont été déterminés à partir de l'analyse bibliographique sur l'hydrologie des zones humides et les bilans hydriques (faisabilité des mesures, incertitudes). Un critère « activités humaines » a été ajouté pour prendre en compte leur influence sur l'hydrologie et les bilans. De plus, la disponibilité de compétences et de données est évaluée.

• Sites de zones humides évalués à partir des critères de sélection

Une trentaine des sites de zones humides a été évaluée selon les critères de sélection (pour plus de précisions, voir la grille de choix des sites disponible sur le cloud ZHTB). Les sites sont les suivants : Tourbière de Luitel (Isère, Séchilienne, Chamrousse), Tourbière de Frasne (Doubs, Frasne, Bouverans), Tourbière de Praubert (Plateau de Gavot Saint-Paul-en-Chablais, Haute-Savoie), Marais de Vaux (Ain, Bugey, Hauteville en Lompnes, Cormaranche en Bugey), Zones humides du bassin versant de l'Aude (Aude), Tourbière de Rougemont (Ain, Bugey, Brenod), Grandes Seignes (Doubs, Les Granges-Narboz/Houtaud), Marais de Névache (Hautes-Alpes, Névache), Marais du Bourget (Hautes-Alpes, Cervière), Les Creusates (Savoie, Saint-François de Sales, massif des Bauges), Marais de Val Coisin (Isère, Savoie, Sainte-Hélène-du-Lac, Saint-Pierre-de-Soucy, Coise-Saint Jean Pied Gauthier et les molettes, Villaroux), Tourbière de Sommand (Haute-Savoie, Mieussy), Marais des Boulignons (Drôme, Beaurières), Marais des Bidonnes (Ain, Pays de Gex, Divonne-les-bains), Marais de Prodon (Ain, Pays de Gex, Divonne-les-bains, Grilly), Zones humides de Megève (Megève, Haute-Savoie), Marais du Chenet (Plateau des Bornes, Haute-Savoie, Arbusigny), Lossy (Haute-Savoie, Cranves-sales), Chavannes (Haute-Savoie, Les Gets), Tourbières du Plateau des Glières (Haute-Savoie, Le Petit-Bornand-les-Glières, Thorens-Glières), Plateau de Beauregard (Haute-Savoie, La Clusaz, Thônes, Manigod), Plateau de Bayard (Hautes-Alpes, Saint-Laurent du Cros, Col Bayard, Gap, Champsaur), Marais de Manteyer (Hautes-Alpes, Manteyer, Roche-des-Arnauds, Gap), Lac des Bouillouses (Pyrénées-Orientales, d'Angoustrine-Villeneuve-des-Escalades, Les Angles), Tourbière de Couty (Rhône, Chenelette, Beaujolais), Plateau de Chambaran (Isère, Roybon, Montrigaud).

• Sites de zones humides sélectionnés pour la phase 2 du projet

Compte tenu de la durée du projet et des moyens disponibles tous les sites ne peuvent pas être retenus pour une instrumentation et une caractérisation complète. La décision finale a été prise avec l'Agence de l'eau. Les sites visités ont ainsi été classés par ordre de pertinence par rapport à la problématique, à l'existence de données et aux possibilités d'instrumentation. L'ordre est le suivant :

1. Tourbière de Luitel
2. Tourbière de Frasne
3. Tourbière de Praubert
4. Marais de Vaux
5. Tourbière de Montselgues

Le tableau suivant présente les principales spécificités des sites retenus (pour plus de précisions, voir rapport phase 1, disponible sur le cloud ZHTB) et reflète la diversité de leurs configurations (géologie, hydrogéomorphologie, hydrologie, habitats).

Annexes

Spécificités / Site	Tourbière de Luitel	Tourbière de Frasne	Tourbière de Praubert	Marais de Vaux	Tourbière de Montselgues
Altitude (m)	1200	850	900	750	1000
Climat					
Surface (ha)	10	230	23	120	<10
Type de ZH	Tourbière bombée Tourbière à radeaux flottants	Tourbière bombée Tourbière active Tourbière boisée	Bas-marais alcalin Tourbière acide	Plan d'eau Tourbière alcaline Tourbière acide Organo-minéral	Landes tourbeuses Tourbières acides
Acrotelme (K, S, Z)					
Catotelme (K, S, Z)					
Géologie régionale	Métamorphique	Calcaires karstifiés	Métamorphique et sédimentaire	Calcaires karstifiés	Cristallin et sédimentaire
Hydrogéomorphologie (interactions ZH/encaissant)	Héritage glaciaire (moraines)	Héritage glaciaire (moraines de fond et cordons morainiques)	Héritage glaciaire (moraines, fluvio-glaciaire)	Héritage glaciaire (moraine de fond)	Arène granitique, grès triasique
Flux – alimentation	1 Apports de versant 2 Ruisseaux temporaires 3 Pluie	1 Pluie 2 Apports de versant ??	1 Ruisseaux 2 Apports de versant 3 Pluie	1 Apports de versant (sources karstiques) 2 Ruisseau 3 Pluie	1 Apports latéraux et perchés 2 Pluie
Spécificités à compléter et à préciser...					

• Équipement et travaux envisagés sur les sites sélectionnés

Suite aux discussions, les tableaux de synthèses analytiques présentant chacun des sites d'étude retenus ont été complétés.

L'organisation et l'ordonnancement des équipements complémentaires et des travaux envisagés seront présentés dans un pré-planning général d'ordonnancement des tâches à réaliser en phases 2 sur les sites retenus pour instrumentation. Ce planning sera ensuite validé (complété, modifié) lors de réunions bilatérales avec les personnes impliquées sur chacun des sites (gestionnaires et chercheurs).

Points préalables pour l'organisation et l'ordonnancement :

- réaliser les campagnes géophysiques avant les carottages et les sondages ;
- valoriser la réalisation de carottes par des investigations allant plus loin que la simple description (à déterminer) ;
- déterminer à l'amont le type de matériel à utiliser en fonction des tourbières et de leurs caractéristiques (ex. la conductivité de l'eau peut interférer avec certaines méthodes géophysiques) ;
- déterminer les modalités de partage des données pour chaque site dans un premier temps, puis envisager la mise en œuvre d'un outil de centralisation des données.

Le planning prévisionnel est le suivant :

Septembre 2017	- pré-planning général d'ordonnancement des tâches - finalisation du rapport phase 1
Septembre à décembre 2017	- contacts et échanges avec les gestionnaires des sites sélectionnés et les scientifiques impliqués pour finaliser le planning d'ordonnancement des tâches - modalités de partage des données existantes et à acquérir dans le cadre du projet - modalités d'intervention sur les sites - pré-inventaires des études et données existantes sur les sites
À partir de janvier 2018	- traitement des données existantes - analyse des études existantes - mise en place et organisation des groupes de travail
À partir du printemps 2018	- instrumentation complémentaire des sites - début des travaux envisagés

- **TOURBIÈRE DE LUITEL**

Points positifs	Questionnements	Équipements complémentaires et travaux envisagés
Facilité d'accès et appui technique Site bien circonscrit et de taille réduite Surface et un volume intéressant de tourbe Géométrie et pédologie connues Exutoires bien identifiés Nombreuses données et études existantes (LIDAR, piézométrie...) Site déjà bien équipé Équipes de recherche impliquées 1 stage en cours	Piézomètres pas toujours ancrés dans le substratum Possible apports de versant Relations moraine/tourbière Contexte faillé	Hydrologie Mise en place d'un seuil jaugé (PVC, triangulaire, 2 sondes CTD) à la surverse du Lac Évaluation de l'influence du niveau du lac par rapport aux débits à l'exutoire (sous-écoulements ?) Surveillance des débits à l'aval de l'exutoire du lac (proche fontaine du Mulet ; 1107m) Évaluation des apports du bassin versant amont à la tourbière (1 piézomètre) Évaluation des fuites d'eau liées au substratum Géochimie / traçage Traçage pertes ruisseau de Fontfroide (Biju-Duval, 1983, 1994, 2001) Traçage amont Datation des eaux Géophysique Nouveaux profils pour compléter l'existant Analyse plus fine de l'acrotelme et la catotelme Affinage de la géométrie du lac (acoustique, bateau) Détermination de la nature de la moraine à l'exutoire du lac (étanchéité ?) Pédologie Carottes de tourbes pour déterminer les propriétés hydrodynamiques de la tourbe et caler la géophysique Sondages pédologiques pour caler la géophysique Topographie Dispositif suivi gonflement tourbière (repère gradué, station géodésique) ? Écologie - Général Analyse des données existantes

Contacts principaux : Carole Desplanque (ONF) et Jean-Paul Laurent (IGE-CNRS)

• TOURBIÈRE DE FRASNE

Points positifs	Questionnements	Équipements complémentaires et travaux envisagés
Appui technique envisageable Site bien circonscrit et volume intéressant Site très encadré scientifiquement Inscription du projet dans le Plan de Gestion Site déjà bien instrumenté Nombreuses données structurées (LIDAR, piézométrie...) Apports latéraux potentiellement très limités	Contexte karstique/glaciaire : zones de perte, apports et pertes diffuses potentiels Site partiellement équipé et difficultés sans doute pour reconstituer le débit à l'exutoire à partir des hauteurs mesurées sur la station hydro Connaissance de la géométrie et de la pédologie à améliorer Intégration du projet dans les actions de l'université de Besançon et d'Orléans	Hydrologie Installation d'un seuil jaugé à section triangulaire et 2 sondes CTD à l'exutoire (améliorer le seuil existant pour améliorer les courbes de tarage) Installation de 2 sondes CTD dans la doline du Creux du Lard et au Lac de l'Entonnoir Géochimie / traçage Datation des eaux de la tourbe (la tourbe est datée selon les endroits de 1000 à 4000 ans) Autres traceurs naturels et artificiels (à déterminer) Géophysique Compléter les profils existants Pédologie Carottes de tourbes pour déterminer les propriétés hydrodynamiques de la tourbe et caler la géophysique Sondages pédologiques pour caler la géophysique Topographie -Imagerie aéroportée ? Écologie - Général Analyse données existantes

Contacts principaux : Geneviève Magnon (SMMAHD), Catherine Bertrand (LCE-UFC), Marie-Laure Toussaint (LCE-UFC)

• TOURBIÈRE DE PRAUBERT

Points positifs	Questionnements	Équipements complémentaires et travaux envisagés
Appui technique, assistance de terrain et compléments financiers envisageables Facilité d'accès Site bien circonscrit avec une surface et un volume intéressant Bonnes connaissances géomorphologiques 2 stages de master en cours	Pas ou peu d'équipements Peu de données existantes Difficulté pour estimer les apports du bassin versant Inconnues sur d'éventuelles fuites à travers les cordons morainiques à perméabilités variables Station météo éloignée du site Pas de géométrie précise de la zone humide	Hydrologie (pris en charge par CCPEVA et SAEME) Installation de sondes si forage de nouveaux piézomètres dans la tourbière Installation de sondes si forage de nouveaux piézomètres à l'interface encaissant/ZH (estimation des fuites des lacs du bassin versant) Mise en place de 2 seuils jaugés (ruisseau de Coppy et ruisseau de Rully) Estimation de la perméabilité des cordons morainiques (essais d'infiltration) Géochimie / traçage Estimation de la perméabilité des cordons morainiques (traçage) Géophysique - Pédologie - Topographie - Écologie Suivi odonates (FRAPNA) / couplage avec l'étude hydro Général Analyse de données (sous réserve de l'équipement du site)

Contacts principaux : Pierre Loiseau (CCPEVA), Patrick Lachassagne (Danone), Marie Hebert (FRAPNA)

- MARAIS DE VAUX**

Points positifs	Questionnements	Équipements complémentaires et travaux envisagés
Appui technique Un exutoire bien identifié Études hydrologiques et pédologiques Projet de restauration hydraulique : possibilité de travailler sur l'effet des travaux sur le soutien d'étiage Données préalables existantes (piézométrie et Lidar notamment)	Site moyennement instrumenté et difficile à équiper (station de jaugeage) Bassin versant très étendu et karstifié : infiltration potentielle des eaux sur la partie aval ; nombreux apports par sources et diffus Projet de restauration hydraulique : difficulté pour le positionnement durable de l'instrumentation Pas de géométrie de la zone humide	Hydrologie - Géochimie / traçage - Géophysique - Pédologie - Topographie - Écologie - Général Analyse des données existantes Appui aux gestionnaires si besoin sur des questions hydro (état de lieux avant restauration (travaux prévus en 2019) / effet du projet de restauration au bout de 5 ans) Analyse par critères simplifiés en contexte karstique (phase 2 / phase 3)

Contact principal : Sylvie Duret (CEN)

- TOURBIÈRE DE MONTSELGUES**

Points positifs	Questionnements	Équipements complémentaires et travaux envisagés
Appui technique Données existantes 1 doctorat en cours	Épaisseur faible des horizons tourbeux Petites tourbières dont la superficie est très faible Relations privilégiées avec les formations gréseuses Exutoires diffus Site difficile à équiper	Hydrologie - Géochimie / traçage - Géophysique - Pédologie - Topographie - Écologie - Général Analyse des données existantes Appui aux gestionnaires si besoin sur des questions hydro (estimation du réservoir) Analyse par critères simplifiés en contexte sédimentaire et cristallin (phase 2 / phase 3)

Contact principal : Fabrice Grégoire (CEN)

- **ZONES HUMIDES DU BASSIN VERSANT DE L'AUDE**

L'accord cadre AE-RMC/ONF concernant l'étude des zones humides du bassin versant de l'Aude est en cours de signature. Une articulation entre cette étude et le projet ZHTB est envisagée pour la phase 3.

Toutefois, dès la phase 2 du projet ZHTB des échanges et des réunions de travail sont envisagées :

- information sur le contexte, les spécificités et les problématiques des zones humides de l'Aude ;
- assistance méthodologique à l'ONF pour l'étude de ces zones humides ;
- visite de terrain.

Cf. Document transmis par Nadine Bosc : Scop SAGNE (2009) *Évaluation de la réserve en eau des zones humides sur le périmètre du Sage de la Haute-Vallée de l'Aude – Phase 1 : approche de l'ordre de grandeur à partir des inventaires géographiques existants*. SMMAR, CG Aude, 20p.

Contacts principaux : Nadine Bosc (AERMC), Benoit Laroque (ONF), Isabelle Gehin (ONF), Christophe Cocula (ONF)

A3.5. Réunion-Visite de terrain- tourbière de Montselgues : 12 juillet 2016

CR de la Visite terrain (12/07/16) et du Débriefing (18/07/16)

—
Projet Eau Sout' ZHTB

—
12 juillet 2016 – ZH de Montselgues (Ardèche)

Participants présents à la visite de terrain (12/07/16) :

Mines Saint-Etienne GSE et UMR 5600 EVS : Didier Graillot et Jordan Ré-Bahuaud
AE-RMC : Laurent Cadilhac, François Chambaud et Martin Pignon
CREN RA : Delphine Danancher
CEN RA : Benoît Pascault
UJM ISTHME UMR 5600 EVS : Fabrice Grégoire
Maire de Montselgues : Joël Fournier

Absents de la visite de terrain :

UJM ISTHME UMR 5600 EVS : Hervé Cubizolle
CEN Savoie : Jérôme Porteret
Mines Saint-Etienne GSE et UMR 5600 EVS : Frédéric Paron

Participants au Débriefing (18/07/16) :

Mines Saint-Etienne GSE et UMR 5600 EVS : Didier Graillot et Jordan Ré-Bahuaud
AE-RMC : Laurent Cadilhac

Rappel de l'ordre du jour (12/07/16) :

Matin :

- Accueil des participants par le maire de Montselgues (Joël Fournier) ;
- Présentation de l'avancement du Projet Eau Sout' ZHTB (Jordan Ré-Bahuaud) ;
- Présentation des missions du CEN en lien avec les ZH (Benoît Pascault) ;
- Présentation du site de Montselgues et des données terrain acquises (Fabrice Grégoire).

Après-midi :

- Visite guidée de la tourbière de Montselgues (Fabrice Grégoire et Benoît Pascault).

Débriefing (18/07/16) :

- Point sur la visite de terrain à Montselgues et élaboration d'une liste de critères pour guider le choix du site ;
- Propositions de pistes pour l'amélioration de la fiche ZABR 2017 (exploitations cartographiques et statistiques bases de données existantes sur les ZH, définition des typologies de ZH, tests de modélisation de ces typologies validés par les données de suivi piézométriques RHOMEO).

Documents joints et/ou envoyés par dl :

- présentation support de réunion du 12/07/16 (.ppt)

Journée du 12/07/16 à Montselgues

En présence de Laurent Cadilhac, François Chambaud, Martin Pignon, Benoît Pascault, Fabrice Grégoire, Delphine Danancher, Didier Graillot et Jordan Ré-Bahuaud.

L'objectif de cette rencontre et de cette visite de terrain est double, tout d'abord il s'agissait de faire le point sur l'avancement du projet (présentation du matin) et ensuite de déterminer si le site de Montselgues présente les potentialités pour accueillir l'instrumentation spécifique du projet ZABR visant à caractériser le rôle de soutien d'étiage des ZH.

✓ 1. Présentation de l'avancement du Projet Eau Sout' ZHTB (matin)

La présentation du projet a été effectuée par J. Ré-Bahuaud et D. Graillot (Mines Saint-Etienne). La discussion s'est déroulée au fil de la présentation. Les différents points abordés ont été :

- Rappel du contexte du projet et des objectifs ;
- Rappel du phasage du projet ;
- Contribution scientifique pluridisciplinaire pour répondre aux objectifs du projet ;
- Lien avec le projet InteReg du CEN Savoie (Jérôme Porteret) et le projet FEDER Auvergne (Delphine Danancher) ;
- Détails de la méthodologie pour le suivi hydrologique des ZH ;
- Précisions sur les sites présélectionnés (Gimel, Montselgues et Luitel).

Le support de présentation est joint au CR et détails les différents points abordés précédemment.

✓ 2. Présentation des missions du CEN en lien avec les ZH (matin)

La présentation de B. Pascault (CEN RA) a porté sur le réseau de ZH de Montselgues, sur les démarches territoriales pour la promotion et le développement régional (Contrat de rivière, Natura 2000, CEN RA), sur la gestion des ZH et les missions du CEN, sur les REX entre 1995 et 2016 ainsi que sur les problématiques spécifiques aux tourbières (maîtrise foncière, travaux et aménagements pour une gestion à long terme et partenariats scientifiques).

✓ 3. Présentation du site de Montselgues et des données terrain acquises (matin)

Plus spécifiquement, la présentation des caractéristiques physiques du réseau de ZH de Montselgues a été assurée par F. Grégoire (UJM ISTHME). Les programmes d'études PETRA et PEAT ont favorisé les investigations terrain et l'instrumentation du réseau des ZH de Montselgues. Il s'agit notamment de la description du contexte géologique (cartes et coupes), de sondages pédologiques (horizons pédologiques), de piézomètres (avec sondes autonomes de suivi) et de pluviomètres.

Les ZH du plateau de Montselgues sont morcelées en une multitude de petites tourbières dont les dimensions sont assez limitées (souvent < 10 hectares). Les épaisseurs de tourbe sont également très modestes (de quelques centimètres à moins d'un mètre).

Le contexte géologique et la configuration géomorphologique laissent supposer une relation hydraulique privilégiée entre les ZH et l'encaissant rocheux (granite et grès). Les formations gréseuses (potentiellement aquifères) en position latérale et/ou surplombante par rapport aux ZH jouent probablement un rôle d'alimentation de ces dernières.

✓ 4. Visite de terrain des tourbières des Narcettes et de la croix de Montas (après-midi)

La visite de terrain a débuté par la tourbière des Narcettes et le tour de l'instrumentation en place (piézomètres, station météorologique, emplacement des sondages pédologiques, etc.). L'histoire de la tourbière des Narcettes est fortement liée à la présence séculaire de l'homme qui a laissé des traces d'aménagements dans le paysage telles que des radiers, des carrières, d'anciens drains ou encore des abreuvoirs aménagés à même la tourbière. L'exutoire de la tourbière dévoile des débits assez faibles qui sont à mettre en regard d'une surface d'impluvium faible également.

La visite terrain s'est poursuivie par un détour par la tourbière de la croix de Montas qui est située sur la frange occidentale du plateau de Montselgues. Cette tourbière est surplombée par les formations gréseuses.

Débriefing du 18/07/16 pour la suite du projet à l'école des Mines de Saint-Etienne

En présence de Laurent Cadilhac, Didier Graillot et Jordan Ré-Bahuaud.

✓ 1. Retours sur le site de Montselgues

Le débriefing a permis de déterminer que les caractéristiques des zones humides de Montselgues ne semblent pas tout à fait adaptées à la caractérisation du soutien d'étiage des ZH de têtes de BV. En effet, plusieurs points déclassant ont été pointés, il s'agit notamment de la faible épaisseur moyenne des horizons tourbeux, du morcèlement des zones humides en petites tourbières dont la superficie est très faible, des relations privilégiées avec les formations gréseuses surplombantes et des exutoires diffus dont les débits sont très modestes. Toutefois ce site, représentatif d'un nombre de ZH important en RMC, reste intéressant dans la mesure où il correspond à des configurations pour lesquelles la contribution au soutien d'étiage reste faible.

Face à ce constat, une liste plus exhaustive de critères pour guider le choix des sites à retenir pour la suite de l'étude a été établie, il s'agit :

→ Dimension de la ZH :

- **Surface de la zone humide** suffisamment importante (de qq's 10-100aines ha) ;
- **Surface d'impluvium** conséquente afin d'avoir des débits d'exutoires relativement importants (surface de plusieurs 100aines ha pour des débits entre 10 et 200 L/s) ;
- ZH dont le ou les **exutoires** sont **bien identifiés** ;
- **Épaisseur** des horizons tourbeux suffisamment importante (entre un et plusieurs m) ;
- En têtes de bassins versants dans le bassin hydrographique RMC.

→ Disponibilité des données du site :

- Déjà **partiellement équipé** (suivi piézo, pluviomètre, sections jaugées, etc.) ;
- Disposant d'**informations pédologiques** (sondages ponctuels et/ou géophysique) voir des propriétés hydrodynamiques (K, S) ;
- Avec un **contexte géologique et géomorphologique** le plus **simple** possible sans apport ou avec des apports limités de l'encaissant ou des bordures. Il s'agit d'être en mesure de distinguer l'apport de Q en propre de la ZH - Pas ou peu d'aménagements anthropiques (radiers, drains, etc.).

✓ 2. Pistes pour la suite du projet

Le débriefing a été également l'occasion de proposer des pistes complémentaires pour liées aux tâches du projet :

→ **Synthèse bibliographique et typologie des ZH** : Il s'agit de poursuivre le travail bibliographique engagé avec pour notamment pour objectif de recenser les actions déjà conduites en France ou à l'étranger dans des contextes comparables à ceux de RMC, ayant abordé la question du rôle hydrologique des ZH. À partir de cette étape biblio il s'agira ensuite d'identifier les différentes typologies de ZH en prenant particulièrement en compte la diversité des contextes géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques. Pour chacune des typologies identifiées, un schéma conceptuel synthétique sera réalisé (coupes longitudinales et/ou transversales, flux entrants et sortants, etc.).

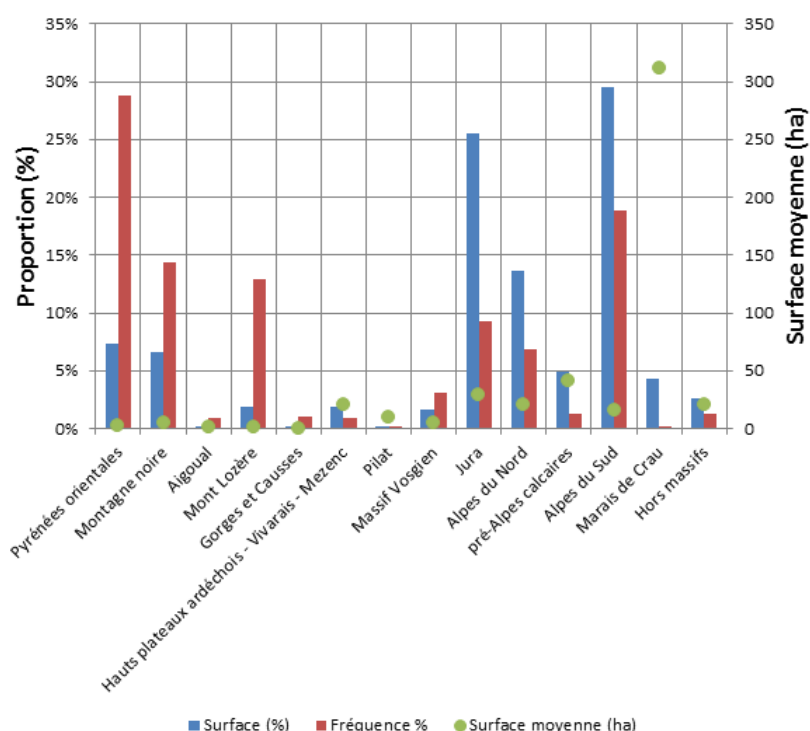
→ **Tests de modélisation numérique** : A partir de ces différentes configurations de ZH, des tests de modélisation simplifiés seront mis en œuvre sur une sélection de ZH représentatives de différentes configurations listées. Il s'agira, à partir de la géométrie grossière et de données hydrodynamiques sur les horizons tourbeux, de quantifier de manière théorique le rôle potentiel de soutien d'étiage de ces ZH pour repérer les configurations les plus favorables. Ces résultats issus de simulations numériques seront confrontés aux données de suivis piézométriques collectées lors du programme RHOME0.

→ **Constitution et analyses (statistiques) de bases de données tableurs et cartographiques** : La base de données cartographiques sur l'inventaire des tourbières en France (<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/265/0/tourbieres.html>) a été complétée et enrichie afin de disposer de davantage d'attributs pour chacune des ZH référencées.

Les attributs des différentes ZH qui constituent la nouvelle base de données sont notamment :

- nom de la ZH (*dans la BD originale*) ;
- nom du massif montagneux (*dans la BD originale*) ;
- altitude moyenne de la ZH (*dans la BD originale*) ;
- surface de la ZH (*dans la BD originale*) ;
- **géologie** bordant la ZH incluant la nature, la lithologie et la géochimie des roches (*attributs ajoutés*) ;
- **surface de l'impluvium** associée à la ZH issue de l'analyse spatiale à partir du MNT 50m (*attributs ajoutés*) ;
- **régime climatique** dans laquelle est incluse la ZH (*attributs ajoutés*) ;
- **précipitations moyennes annuelles** au niveau de la ZH (*attributs ajoutés*) ;

Cette base de données complétée fait l'objet d'analyses spatiales et statistiques qui permettent de faire émerger des grandes tendances dans le bassin hydrographique RMC. En effet, il est possible de mieux comprendre où (quel massif montagneux ?) et dans quel contexte (géologie, climat, géomorphologie, etc.) on peut s'attendre à trouver tels ou tels types de ZH (surface, fréquence ou densité par massif, etc.). Ci-dessous un exemple de résultats obtenus après l'analyse statistique des données de ZH regroupées par grands massifs montagneux.



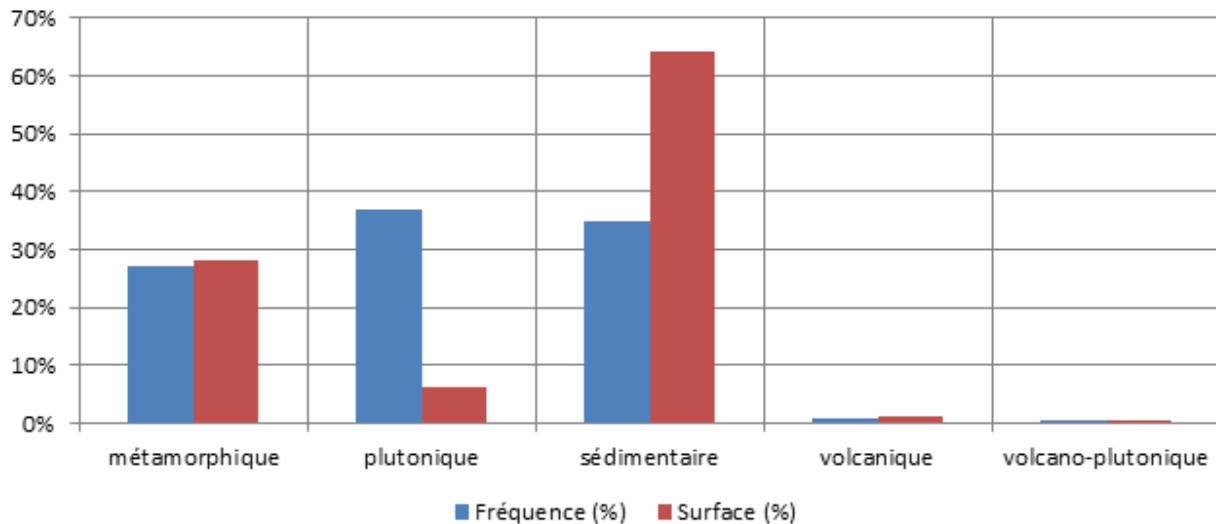
Les calculs se basent sur un effectif d'environ 5695 ZH référencées pour une surface totale d'environ 58708 ha sur l'ensemble du bassin RMC. Sur cette figure, l'axe des ordonnées principal (axe de gauche) exprime, pour tous les grands massifs, les résultats en pourcentage par rapport au nombre total de ZH et à la surface totale qu'elles occupent sur le bassin RMC. Ces proportions ou pourcentages sont symbolisés par les histogrammes de couleur bleue et rouge.

L'axe des ordonnées secondaire (axe de droite) exprime la surface moyenne des ZH pour chacun des massifs. Ces surfaces moyennes sont symbolisées par un point de couleur verte.

Pour prendre l'exemple de deux cas extrêmes :

- les ZH des Pyrénées orientales sont très nombreuses puisqu'elles représentent 29% des effectifs (histogramme de couleur rouge) pour seulement 7% de la surface des ZH du bassin RMC (histogramme de couleur bleue). Il est intéressant de noter que la surface moyenne des ZH de ce massif est très modeste avec seulement 2,6 ha (point de couleur verte). On peut observer la tendance suivante, il y a une forte densité de petites ZH dans le massif des Pyrénées orientales.
- les ZH du marais de Crau sont très peu nombreuses avec seulement 0,1% des effectifs RMC, en revanche, la surface de ces ZH est très importante puisqu'elles représentent en moyenne plus de 310 ha.

Un autre exemple de résultat exploitant les données géologiques « simplifiées » associées au ZH.



La figure représente la répartition en fréquence (effectif) et en surface des ZH en fonction du type de roche sur l'ensemble du bassin RMC.

Par exemple, les ZH présentes dans des formations géologiques plutoniques sont très nombreuses et représentent 37% des effectifs pour une surface totale assez faible de 6% sur l'ensemble du bassin RMC. On peut donc en déduire qu'il existe un grand nombre de ZH en milieu plutonique mais qu'elles ont des surfaces assez faibles. Les ZH de domaine sédimentaire présentent des effectifs comparables (35%) mais représentent une surface moyenne beaucoup plus importante (64%) sur le bassin RMC.

Ces résultats sont à moduler puisqu'il faut les mettre en correspondance avec les formations géologiques présentes dans le bassin RMC.

D'une manière générale, la constitution et l'analyse d'une telle base de données sont complémentaires des investigations prévues sur le terrain et permettront une meilleure généralisation des résultats.

A3.6. Réunion-Visite de terrain – Tourbière de Luitel : 12 décembre 2016

Réunion - Visite de terrain – Projet ZHTB phase 1

12 décembre 2016 – Col de Luitel

Participants présents :

Carole Desplanque (ONF), Olivier Manneville (Pdt CS RN Lac Luitel), Jean-Paul Laurent (LTHE), François Chambaud (AE-RMC), Frédéric Paron (UMR 5600 EVS), Didier Graillet (UMR 5600 EVS) et Jordan Ré-Bahuaud (UMR 5600 EVS)

Excusé :

Laurent Cadilhac (AE-RMC)

Rappel de l'ordre du jour :

1. Présentation du site de Luitel (Carole Desplanque)
2. Présentation du projet ZHTB et phasage (Frédéric Paron)
3. Visite de terrain

Plan du compte-rendu :

1. Rappel des critères de sélection des sites de zones humides
2. Description, équipement et données du site de Luitel
 - Annexe 1 : Carte et photographie aérienne IGN du site
 - Annexe 2 : Photographies de la visite de terrain du site de Luitel
 - Annexe 3 : Bibliographie (transmise par Jean-Paul Laurent)
 - Annexe 4 : Documents (transmis par Carole Desplanque)

Informations importantes et à retenir pour la suite... :

- Critères de sélection des sites de zones humides
- Autres visites de sites prévues à partir de janvier 2017 : Tourbière de Frasné (Geneviève Magnon), Marais de vaux (Sylvie Duret), Plateau de Gavot (Pierre Loiseau)

Documents joints et/ou envoyés par dl :

- ppt support de réunion

Adéquation du site de Luitel par rapport aux critères de sélection :

- Facilité d'accès notamment avec du matériel et possibilité de logement sur place
- Site relativement bien circonscrit avec une surface et un volume intéressant de tourbe
- Nombreuses données et études existantes
- Site déjà bien équipé
- Équipes de recherche déjà impliquées (UJF, LTHE, IMBE, ISTERRE...)
- Problématiques communes avec les gestionnaires, notamment le bouclage du bilan hydrique

Points de vigilance par rapport aux critères de sélection :

- Piézomètres non ancrés dans le substratum et qui peuvent se déplacer selon le gonflement/dégonflement de la tourbe
- Débits des exutoires relativement faibles et potentielles difficultés pour estimer le différentiel de débit amont/aval

Compléments d'équipement à mettre en œuvre si le site est retenu :

- Mettre en place d'un déversoir (PVC, triangulaire, sonde CTD) à la surverse du Lac
- Évaluer l'influence du niveau du lac par rapport aux débits à l'exutoire (possibilités de sous-écoulements)
- Surveiller les débits à l'aval de l'exutoire du lac (proche fontaine du Mulet ; 1107m)
- Effectuer un traçage des pertes du ruisseau de Fontfroide en complément de ceux déjà réalisés (Biju-Duval, 1983, 1994, 2001)

1. Rappel des critères de sélection des sites de zones humides

- **Contexte géologique et climatique**
- **Localisation :**
 - Têtes de bassins versants
 - Bassin hydrogéographique RMC
- **Dimension :**
 - Surface : 10 à 100 ha ; Impluvium : >100ha ; 10 à 200l/s
 - Exutoires bien identifiés
 - Épaisseur : 1 à plusieurs mètres
- **Connaissances, données et équipements :**
 - Station météo, Piézomètres, Station de jaugeage [nombre]
 - Sondages géophysique et pédologique, topographie [nombre]
 - Paramètres hydrodynamiques
 - Géochimie [date]
 - Autres
- **Flux d'eau**
 - Contexte simple
 - Apports aux limites connus
- **Activités humaines / Enjeux**
 - Restauration
 - Aménagements/Activités
- **Équipes de recherche impliquées**
- **Accès**

2. Description, équipement et données du site de Luitel

Contact : Carole Desplanque (ONF)

Site : Réserve Naturelle – Lac Luitel

Historique :

- 1943 : inscription du site (la loi du 2 mai 1930 relative à la protection des monuments naturels et des sites de caractère artistique, historique, scientifique, légendaire ou pittoresque conduit à protéger des espaces d'une très grande diversité)
- 1961 : classement du site (lac) en réserve naturelle nationale avant la loi de 1976
- 1991 : agrandissement du périmètre de la réserve (lac + tourbière du col)
- 2010 : site Natura 2000 n°FR8201732 (Tourbières du Luitel et leur bassin versant) reconnu en zone spéciale de conservation (ZSC ; JO RF : 31/05/2010). Coïncidence du périmètre de la ZSC avec celui de la réserve naturelle nationale.

Localisation :

- département de l'Isère (38)
- commune de Séchilienne

Altitude : 1200 à 1300m

Contexte géologique

Métamorphique, amphibolites, gneiss, Lias, glaciaire (moraines, farines glaciaires imperméables)
Le relief est hérité des glaciations et la structure très faillée et fissurée.

Type de zone humide

Le site s'est fortement boisé depuis 1880 (pins à crochet). Il est constitué principalement de tourbières acides à sphaignes :

- tourbière bombée
- lac tourbière à radeaux flottants (tremblants)

Surface :

- 8ha (tourbière bombée du col)
- 2ha (lac tourbière à radeaux flottants / tremblants)

Bassin hydrogéographique et bassins versants

Le site est situé sur le bassin hydrogéographique RMC.

Le lac et la tourbière du col sont localisés sur 2 bassins versants différents :

- Ruisseau du Bruyant, puis Romanche pour la Tourbière du col
- Ruisseau de Prémol puis Romanche pour l'exutoire du lac Luitel

Surface Impluvium

L'impluvium est grand et nettement supérieur à 100ha.

Exutoires :

- 1 au lac Luitel : surverse intermittente – ruisseau du Luitel (Q : 40l/s environ le jour de la visite)
- 2 à la tourbière du col (incertitude existante sur les flux sortant) : ruisseau de Fontfroide (nord) et ruisseau sud

Flux d'eau (Contexte et apports aux limites)

La tourbière est alimentée par les pluies, les eaux superficielles, essentiellement les ruisseaux de la forêt de Séchilienne (dont beaucoup sont temporaires) et les eaux souterraines.

À l'amont du site, il existe un réseau de tourbières. Il s'agit d'un bassin versant en cascade depuis les crêtes (2500m) jusqu'au site de Luitel (1200m) :

- lac Achard (1900m) et ruisseau de la Salinière
- tourbières soligènes de l'Arselle (1700m)
- micro tourbières, sagne de l'ours, sagne du pin

Le ruisseau de Rambert est déconnecté du site.

Hypothèse : déconnexion hydraulique de la tourbière du col et du lac Luitel.

Le lac est alimenté par 1 ruisseau temporaire. Il peut présenter un marnage assez important.

On observe des pertes (infiltration avec résurgence ; 5l/s le jour de la visite) du ruisseau de Fontfroide. La profondeur d'infiltration n'est pas connue.

L'âge de l'eau au fond de la tourbière est inconnue (stratification avec l'âge ?).

On note la présence de drains anciens (actuellement 1,5m) de profondeur.

Le bilan hydrique reste à établir

Épaisseurs :

- 0 à 11m tourbière du col (ancienne cuvette lacustre comblée du fait de sa profondeur plus faible que le lac à la fin des dernières glaciations) / max à 11m dans l'œil de la tourbière du col
- 0 à 16m lac tourbière / 0,1 à 4m pour les radeaux flottants

Station météo

Il existe une station météo complète à la tourbière du col depuis 2006 (pluviomètre, thermomètre, hygromètre, anémomètre...) couplée à des sondes (installées dans le sol à 3 profondeurs (T°C) et 1 piézomètre. Les sondes installées dans le sol permettraient de calculer le volume d'eau de la tourbière (effet tampon, courbe de retard).

- ETP : bien cernée (la tourbière se comporte comme une surface en eau libre)
- P : pluviomètre simple à auget + 1 autre pluviomètre chauffant installé chez un particulier proche du site (1000 à 1600mm par an) + station météo à Chamrousse
- Neige : difficulté à mesurer les hauteurs de neige sur le site car elles sont très variables selon le secteur

Piézomètres

Il existe un réseau de piézomètres implantés dans les différents groupements végétaux présents. Il y a 20 piézomètres manuels relevés en été depuis 2002 dont 6 avec capteurs de pression depuis 3 ans. Ces ouvrages sont enfoncés jusqu'au substratum dur et mesurent de 0,7 à 4m. Ils sont crépinés tout du long.

Les piézomètres n'étant pas ancrés dans le substratum, ceux-ci peuvent se déplacer avec le niveau de la tourbe. La variation du niveau piézométrique maximum est d'environ 1m.

Station de jaugeage

Il y a une station de jaugeage à l'exutoire de Fontfroide (courbe de tarage ; sonde pression, T°C, conductivité). Il existe une incertitude liée aux flux diffus. Des dosages au sel ont permis de mesurer un débit de l'ordre de 5 l/s en été.

Géophysique [Desplanque et Garambois, 2010]

- Résistivité électrique (1 transect)
- Radar géologique (12 profils interpolés pour une modélisation de la structure 3D du fond de la tourbière)
- Résonance magnétique protonique

Le volume de la tourbière du col est estimé à 400 000m³.

Les méthodes géophysiques sont plus faciles à mettre en œuvre en hiver avec le gel et la neige. Les fortes teneurs en sels routiers perturbent les investigations dans le lac. Il n'a jusqu'à présent pas été possible d'en déterminer la profondeur avec de telles méthodes.

Pédologie [Desplanque et Garambois, 2010]

Sondages existants

Hydrodynamique

Des essais de détermination de la teneur en eau libre ont été effectués par le LTHE. Les résultats sont difficiles à interpréter compte-tenu du tassement et des conditions de conservation de la tourbe.

Géochimie

- Campagne de mesure de la conductivité de l'eau : augmentation de l'amont vers l'aval (20μS/cm à la Sagne du Pin et 60 μS/cm au lac de Luitel)
- Analyses géochimique (Hg, Pb, Cs, Ti, Se, Nd, ...) des sédiments sur une carotte de 4,8 mètres (Laboratoire ISTERRE) [Guédron et al., 2016]
- Datations C14 sur carotte de 10,5 m

Autres

- Lidar : topographie de surface
- Bathymétrie du lac originel de la tourbière du col
- Paléoécologie (pollen, insectes) sur une carotte de 10,5 mètres (Laboratoire IMBE)

Activités humaines (Restauration, Aménagements, activités)

Restauration :

- 2 drains à reboucher (2020)
- 1 ruisseau (« ruisseau sud » de la tourbière) rectifié par la commune (2010) médiation pénale
- pose de 10 seuils pour éviter drainage de la tourbière
- pollution salée du lac : collecte des eaux de ruissellement de la route (étanchage) et récréation du ruisseau d'alimentation du lac présent avant la création de la route

Activités humaines :

- Sentier pédagogique sur caillebotis
- Pas de chasse, plus de pêche depuis 1991, pas de pâturage

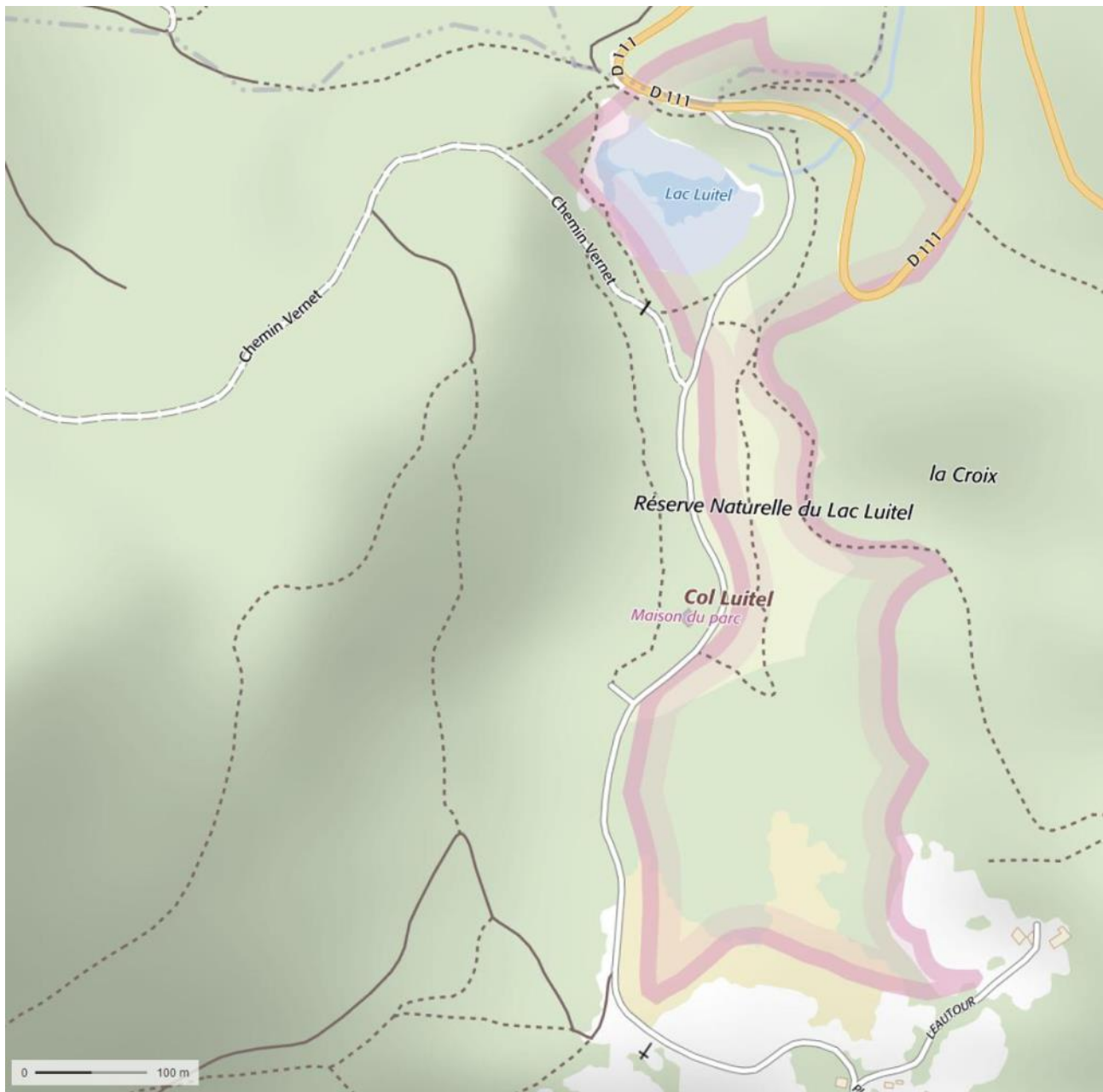
Équipes de recherche déjà impliquées sur le site / projets / rapports

- Jean Sarrot-Reynaud : thèse 1964 (publi 1972)
- Wegmüller (1977) et De Beaulieu (2010) : carottage et sondage
- Stéphane Garambois : méthodes géophysiques / manip annuelle avec des étudiants
- Faustine Cote : relevé du cours des ruisseaux (notamment ruisseaux temporaires) et préconisations de gestion (rapport de stage été 2016)
- ISTERRE : géochimie

Annexes

- IMBE (+EDYTEM) : Paléoécologie (échantillon de tourbe)
- LTHE : dosage des teneurs en eau libre de la tourbe
- Stage en cours : analyse des données hydro (par ex. fréquence des pluies...)

Annexe 1 : Carte et photographie aérienne IGN du site



Carte IGN – Réserve naturelle du lac Luitel
Géoportail IGN 16 décembre 2016 (<https://www.geoportail.gouv.fr>)



Photographie aérienne IGN - Réserve naturelle du lac Luitel
Géoportail IGN 16 décembre 2016 (<https://www.geoportail.gouv.fr>)

Annexe 2 : Photographies de la visite de terrain du site de Luitel



Panneau pédagogique (F. Chambaud)



Panneau d'avertissement (F. Chambaud)



Panneau signalétique (F. Paran)



Caillebotis (F. Chambaud)



Lac tourbière et tremblants de Luitel pris par les glaces (F. Paran)



Phragmitaie au lac Luitel (F. Paran)



Exutoire du lac Luitel – Vue amont (F. Paron)



Exutoire du lac Luitel – Vue aval (F. Paron)



Ruisseau du Luitel recalibré – Vue amont (F. Paron)



Ruisseau du Luitel recalibré – Vue aval (F. Paron)



Station météo de la tourbière du col (F. Chambaud)



Piézomètre de la tourbière du col (F. Paron)



Tourbière du col boisée (F. Paron)



« Œil » de la tourbière du col (F. Paron)



Piézomètre proche du versant de la tourbière du col (F. Paron)



Piézomètre en aval de la tourbière du col (F. Paron)



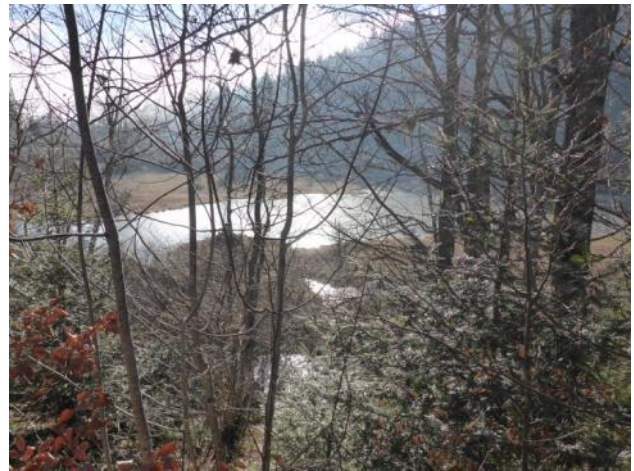
Ambiance : touradons et angéliques givrées (F. Paron)



Ambiance : touradons au soleil (F. Paron)



Souche d'arbre recolonisée par les sphaignes (F. Paran)



Ambiance : Vue du lac de Luitel (F. Paran)



Limnigraphe du ruisseau de Fontfroide (F. Paran)



Ruisseau de Fontfroide à l'aval du limnigraphe (F. Paran)



Pertes du ruisseau de Fontfroide (F. Paran)



Pertes du ruisseau de Fontfroide (F. Paran)

Annexe 3 : Bibliographie (transmise par Jean-Paul Laurent)

- Avenir, 2007. Dossier de prise en considération pour la préservation des tourbières du massif de Belledonne, Fiche 2 : Tourbière du Lac Luitel, Conservatoire des espaces naturels de l'Isère.
- Desplanque, C., 2007. La réserve naturelle du lac Luitel, Plan de gestion 2011-2020, Office National des Forêts.
- Desplanque, C., 2007. Le problème de la pollution par le sel de déneigement dans le lac-tourbière du Luitel (Isère). In: C.d.e.n.d.l.l. Avenir (Editor), 1ères rencontres pour la conservation des tourbières des Alpes, 20-21 Septembre 2007, pp. 41-46.
- Desplanque, C. and Cave, B., 2011. Réserve Naturelle Lac Luitel. 1961-2011, 50 ans. Office National des Forêts, Isère, pp. 14 pages.
- Desplanque, C. and Garambois, S., 2008. Caractérisation de la paléotopographie de la tourbière ombrotrophe du Luitel au moyen de méthodes géophysiques, Écologie et protection des tourbières. Coll. Tourbières, Ann. Sci. Rés. Bios. Trans. Vosges du Nord-Pfälzerwald, Bitche, pp. 305 - 315.
- Diren, R.-A., 2007. ZNIEFF DE TYPE I, Lac Luitel.
- Hustache, E., 2002. Étude du comportement hydrologique et hydrochimique du lac tourbière Luitel durant la période de dérivation Septembre 2001 à Août 2002, Rapport de DEA, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Hustache, E., 2004. Étude hydrologique de la tourbière du col. Réserve Naturelle du Lac Luitel, Office National des Forêts.
- Joly, R., 1960. Le lac du Luitel en Isère. Annales de l'École Nationale des Eaux et Forêts, 17(4): 497-508.
- Nedjai, R., Rovera, G. and Bonnet, M.-P., 2003. Les effets des épandages de sel sur la tourbière lacustre du Luitel (massif de Belledonne, France) : la dérivation des eaux du ruisseau du Rambert comme remède à la pollution. Revue de géographie alpine, 91(1): 51-66.
- Sarrot-Reynauld, J., 1972. Hydrogéologie du massif de Chamrousse. Exemple de liaison entre l'hydrogéologie et la structure tectonique. Revue de géographie alpine, 60(3).

Annexe 4 : Documents (transmis par Carole Desplanque)

Intitulés des fichiers transmis :

- 2016_12_12_Luitel_CD.pdf
- 2016_COTE_ruisseaux_BV_Luitel.pdf
- 1972_60_3_Sarrot_Reynauld.pdf
- 1983_09_29_Séchilienne_traçage_J_Biju_Duval.pdf
- 1994_08_01_Séchilienne_traçage_J_Biju_Duval.pdf
- 2001_03_Séchilienne_traçagesJ_Biju_Duval.pdf
- Guédron et al, 2016, ChemGeol, Hg isotopes Lake Luitel 100year.pdf

A3.7. Réunion-Visite de terrain – Plateau de Gavot : 7 mars 2017

Réunion - Visite de terrain – Projet ZHTB phase 1

7 mars 2017 – Plateau de Gavot (Saint-Paul en Chablais)

Participants présents :

CCPEVA : Pierre Loiseau, Lalie Chochon

SAEME : Patrick Lachassagne, Valériane Pele

ASTERS-CEN74 : Alexandre Guillemot, Clara Nicolitch

FRAPNA 74 : Marie Hébert

AE-RMC : Laurent Cadilhac

UMR5600 EVS : Frédéric Paran, Didier Graillot, Jordan Ré-Bahuaud

Excusés :

AE-RMC : François Chambaud, Martin Pignon

Rappel de l'ordre du jour :

1. Présentation du projet ZHTB et phasage (Frédéric Paran)
2. Présentation impluvium d'Évian / objectifs et enjeux p/r aux ZH (Patrick Lachassagne)
3. Présentation CC Pays d'Évian / objectifs et enjeux p/r aux ZH (Pierre Loiseau)
4. Présentation inventaire odonates des ZH du plateau de Gavot (Marie Hébert)
5. Discussion : a) adéquation du plateau de Gavot p/r aux objectifs du projet ZHTB ; b) modalités pour une collaboration
6. Visite de terrain

Plan du compte-rendu :

1. Rappel des critères de sélection des sites de zones humides
2. Description, équipement et données du site du plateau de Gavot
 - Annexe 1 : Cartes et photographies aériennes IGN du site
 - Annexe 2 : Photographies de la visite de terrain du site du plateau de Gavot
 - Annexe 3 : Documents transmis et bibliographie sommaire

Informations importantes et à retenir pour la suite... :

- Critères de sélection des sites de zones humides
- Autres visites de sites prévues : Tourbière de Frasne (Geneviève Magnon), Marais de vaux (Sylvie Duret)

Documents joints et/ou envoyés par dl :

- ppt projet ZHTB (UMR 5600 EVS)
- ppt Zones Humides du Pays de Gavot (CCPEVA)

Adéquation du site du plateau de Gavot par rapport aux critères de sélection :

- Collaboration avec la SAEME et le CCPEVA :
 - appui technique pour le suivi et le relevé de données (voire pérennisation)
 - compléments financiers envisageables pour l'instrumentation
 - problématiques communes
- Le site de PRAUBERT semble le plus adapté au projet ZHTB :
 - facilité d'accès
 - site bien circonscrit avec une surface et un volume intéressant
 - 2 piézomètres
- Les données existantes du site de MARAVANT pourraient être réutilisées pour recalculer des bilans hydrologiques

Points de vigilance par rapport aux critères de sélection (site de PRAUBERT) :

- Pas ou peu d'équipements déjà implantés / Peu de données existantes
- Difficulté par estimer les apports du BV (mont Bénand) / grande surface, gradient de pluviométrie, apports diffus
- Difficulté pour estimer les quantités infiltrées à travers les cordons morainiques à perméabilités variables
- Station météo éloignée du site

Compléments d'équipement à mettre en œuvre si le site est retenu (site de PRAUBERT) :

- Piézomètres complémentaires + sondes
- Seuils jaugés (ruisseau de Coppy et ruisseau de Rully) + sondes
- Au total : 6 sondes, 2 seuils et 5 piézomètres

1. Rappel des critères de sélection des sites de zones humides

- **Contexte géologique et climatique**
- **Localisation :**
 - Têtes de bassins versants
 - Bassin hydrogéographique RMC
- **Dimension :**
 - Surface : 10 à 100 ha ; Impluvium : >100ha ; 10 à 200l/s
 - Exutoires bien identifiés
 - Épaisseur : 1 à plusieurs mètres
- **Connaissances, données et équipements :**
 - Station météo, Piézomètres, Station de jaugeage [nombre]
 - Sondages géophysique et pédologique, topographie [nombre]
 - Paramètres hydrodynamiques
 - Géochimie [date]
 - Autres
- **Flux d'eau**
 - Contexte simple
 - Apports aux limites connus
- **Activités humaines / Enjeux**
 - Restauration
 - Aménagements/Activités
- **Équipes de recherche impliquées**
- **Accès**

2. Description, équipement et données du plateau de Gavot

Contacts :

Pierre Loiseau, Patrick Lachassagne, Marie Hébert, Alexandre Guillemot

Sites :

- Marais de Praubert à Saint-Paul en Chablais (sources du Coppy) / Bassin versant : marais de chez Gaillet, Lac Noir, Lac de la Beunaz, Étang Comblé, Mont Bénand
- Marais du Maravant à Saint-Paul-en-Chablais et Larringes (pertes à l'amont de Larringes)
- Marais de Piolan à Saint-Paul-en-Chablais

Historique :

- 1975 : Inventaire des Zones Humides DDAF 74
- 1984 : Classement APPB de 12 marais dont Piolan, Chez Gaillet, Praubert
- 1992 : APIEME (Association de Protection de l'Impluvium des Eaux Minérales d'Évian)
- 1997 : Classement APPB de 3 marais sur Lugrin dont Nord-Est de Praubert-Roseires
- 2003 : 38 zones humides inscrites au réseau de sites Natura 2000
- 2008 : Zone Impluvium labélisée RAMSAR (32 km²)
- 2012 : Label Géoparc-Chablais ou Geopark-Chablais (à l'anglaise)
- 2016 : actualisation du POS en PLU (approuvé en décembre 2016)
- 2016 : nouveau Docob Natura 2000

Localisation :

Haute-Savoie, Saint-Paul-en-Chablais, Larringes

À noter : 4 communes de résurgences (Publier, Évian-les-Bains, Neuvecelle et Maxilly-sur-Léman)

Altitude :

850 à 950m (Mont Bénand : 1284m ; Pic des Mémises : 1676m ; Évian : 372m)

PRAUBERT : 885m (Chez Gaillet : 940m ; Lac de la Beunaz : 952m)

PIOLAN : 904m

MARAVANT : 850m

Contexte géologique

La géologie du plateau de Gavot (environ 40km²) est marquée par les glaciations (contexte de marge glaciaire avec des formations morainiques déposées par le glacier lémanique). Sa structure est héritée de l'histoire glaciaire du quaternaire : retrait et avance des glaciers, dépôts fluvio-lacustres et fluvio-glaciaires. Les formations du quaternaire déposées sur le substratum (schistes, calcaires...) ont une épaisseur d'environ 200m à Saint-Paul-en-Chablais et 500m à Évian. On note les éléments suivants :

- le substratum est « beurré » par un placage de moraines de fond imperméables.
- le plateau de Gavot est constitué d'une alternance : 1) de placage de moraines de fond imperméables sur lesquelles on trouve les zones humides ; 2) de dépôts fluvio-glaciaires perméables permettant l'infiltration (pluie, zone de pertes pour les cours d'eau) et la recharge. À l'interface, on trouve des sources.
- d'une manière générale, le haut du plateau est plus infiltrant.
- des moraines latérales et des cordons morainiques sont présents sur le plateau de Gavot, leur perméabilité est variable.

Type de zone humide

Il n'y a pas de typologie hydro des zones humides du plateau.

Les zones humides sont organisées en réseau sur le plateau de Gavot. On trouve des tourbières et des sols hydromorphes (voir cartes Habitats du Docob pour plus de détails).

PRAUBERT : bas-marais alcalin, tourbière basse alcaline, tourbière de transition, tourbière haute acide [Marais de Chez Gaillet : prairies humides, bas-marais alcalin ; Lacs]

PIOLAN : prairie humide, tourbière basse alcaline, tourbière de transition, tourbière boisée

MARAVANT : marais ouvert, bas-marais alcalin

Surface :

Zones humides du plateau : 106 zones humides (202ha)

PRAUBERT : 23ha (zone centrale) + 19ha (zone périphérique) [Chez Gaillet : 1,7ha ; Lac de la Beunaz : 1,6ha ; Lac Noir : 0,6ha ; Étang comblé : 2,2ha]

PIOLAN : 8ha (zone centrale) + 20ha (zone périphérique)

MARAVANT : 13ha

Bassin hydrogéographique et bassins versants

Basse-Dranse, Ruisseau de Coppy affluent du Léman (Praubert), Ruisseau de Rully

Surface Impluvium

Impluvium d'Évian : 32 km²

PRAUBERT : 3,6km² (Marais de Chez Gaillet, Lac Noir, Lac de la Beunaz, Mont Bénand)

MARAVANT : 30000ha

Exutoires :

PRAUBERT : ruisseau Coppy qui se jette dans le Léman (+ 1 exutoire différent pour le marais Nord-Est Praubert-Roseires : ruisseau sans nom, intermittent, qui se jette dans le Léman)

MARAVANT : ruisseau de Maravant qui se jette dans la basse Dranse

Flux d'eau (Contexte et apports aux limites)

Des études et données antérieures montrent que :

- le temps médian de circulation de l'eau est de 45 ans du plateau de Gavot vers la source des eaux d'Évian
- 15% de l'eau de pluie s'infiltre vers les aquifères
- ETP = ETR (pas de stress hydrique) / Température moyenne annuelle : 8°C
- la pluviométrie annuelle est comprise entre 900 à 1400mm par an (moyenne 1250) sur un Impluvium d'environ 40km²
- la capacité de stockage/déstockage des zones humides du plateau reste à démontrer (sans doute plus en lien avec des apports souterrains)

PRAUBERT : 1) Apport d'eau de surface du ruisseau de Rully et de ruissellement diffus (lac de la Beunaz, Lac Noir, Étang comblé, Marais de chez Gaillet, Mont Bénand) ; 2) possibles résurgences de nappes. La zone humide au Nord-Est de Praubert-Roseires semble déconnectée tant au niveau des apports que de l'exutoire

MARAVANT : 1) Apport d'eau de surface par des cours d'eau et du ruissellement diffus ; 2) Pertes du Maravant à l'amont de Larringes / captées par la source de Saigny

PIOLAN : Apports d'un bassin versant boisé (anciens drains d'assèchement)

Épaisseurs :

PRAUBERT : 5m en moyenne (Data de prospection de tourbe de 1942) ; Lac Noir : profondeur 11m
MARAVANT : ??
PIOLAN : 2m / 70000m³

Station météo

Il y a un pluviomètre à proximité du marais du Maravant (prélèvement de nanotracés)

Les stations météo les plus proches sont situées à Scionnex et Thonon. Le gradient de la pluviométrie est bien connu pour le plateau de Gavot.

Piézomètres

Plateau de Gavot : plusieurs piézomètres SAEME de 1992 à 2000

PRAUBERT : 2 anciens piézomètres (voir thèse Giugni 1990)
MARAVANT : suivi piézométrique de 1972 à 1980
PIOLAN : suivi piézométrique (voir thèse Giugni 1990)

Station de jaugeage

PRAUBERT : non
PIOLAN : non

MARAVANT : 1) Section de jaugeage en béton (voir thèse Peirolo 1979 ; Thèse Henriot 2012 ; Blavoux 1976 et 1981 ; Jeremie 1974) + jaugeage volant ; 2) Drain agricole en amont à section rectangulaire (installation possible d'un seuil de jaugeage)

Géophysique

NON

Pédologie

PRAUBERT : prospection de 1942 des épaisseurs de tourbe en vue d'exploitation
PIOLAN : non
MARAVANT : non

Hydrodynamique

NON

Géochimie

Isotopes dont ¹⁸O ; Ions majeurs dont Cl⁻ et NO₃⁻ ; Pas de traçages artificiels

Autres

LIDAR ; Palynologie (à confirmer)

Suivi Odonates : Les Lanches, Praubert, Lacs, Piolan en 2017 (FRAPNA 74) + Projet odonate : Piolan, Praubert, Laprau, Pessay, Plaine Rebet / Fonctionnalité des mares, approche corridors, approche bio-indication possible (espèces ubiquistes vs espèces spécifiques d'apports d'eaux souterraines)

Activités humaines (Restauration, Aménagements, activités)

Anciens drains comblés lors des travaux de restauration réalisés entre 1998 et 2002

Projet 1: les exutoires des cours d'eau s'incisant (érosion due à de forts orages), il est prévu de mettre en place des micro-seuils, voire de vrais seuils, à la sortie des écoulements superficiels pour conserver l'eau le plus possible dans les zones humides

Annexes

Projet 2 : certaines zones humides pourraient servir de bassin de rétention pour la gestion des eaux Pluviales ; réouverture de milieux (végétation)

Route qui sépare le marais de Praubert en 2 ; agriculture, chasse, promenade

Problématique : reboisement des zones ouvertes (+30% de colonisation par les ligneux), espèces envahissantes présentes (Solidage), incisions généralisées des cours d'eau à l'exutoires des zones humides

Équipes de recherche déjà impliquées sur le site / projets / rapports

SA des Eaux Minérales d'Évian (SAEME) / M. LACHASSAGNE ; problématiques quantification entrées d'eau, stockage, déstockage, infiltration, résurgence + structuration ZH ;

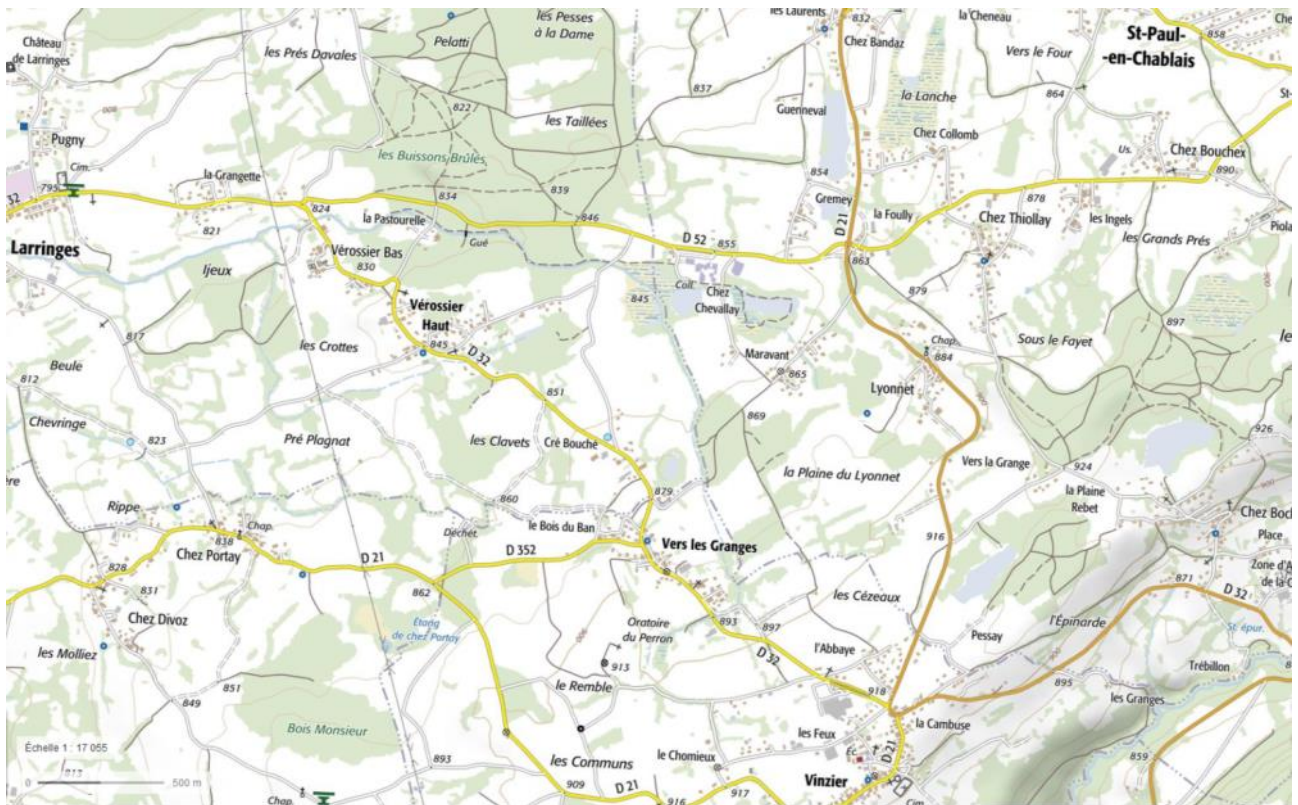
Stage en cours de Valériane Pele (SAEME) : suivi hydro de Petite et Grande Gouille, Lac Noir et de la Beunaz, origine des lacs

Stage en cours de Clara Nicolitch (ASTERS-CEN74) : paramètres hydrodynamiques des zones humides

Annexe 1 : Cartes et photographies aériennes IGN du site



Carte et photographie aérienne IGN – Plateau de Gavot : Praubert, Lac de la Beunaz, Piolan
Géoportail IGN 8 mars 2017 (<https://www.geoportail.gouv.fr/>)



Carte et photographie aérienne IGN – Plateau de Gavot : Maravant
Géoportail IGN 8 mars 2017 (<https://www.geoportail.gouv.fr/>)

Annexe 2 : Photographies de la visite de terrain du site du plateau de Gavot



Marais de Praubert vu du haut d'une moraine latérale



Mont Bénand : bassin versant du Marais de Praubert



Ruisseau de Coppy : exutoire du bassin versant



Marais de Praubert Nord-Est de Roseires



Apport latéral du marais Nord-Est Praubert



Marais de Praubert Nord-Est : touradons de *Carex paniculata*



Marais de Chez Gaillet Est (amont de Praubert)



Exutoire du marais de Chez Gaillet Est : ruisseau de Rully



Exutoire de surface du lac de la Beunaz et du lac Noir (amont du marais de Chez Gaillet Ouest)





Exutoire du lac Noir



Panneau d'information : Lac Noir et lac de la Beunaz



Lac Noir



Panneau d'information : Lac Noir



Bloc erratique : Lac Noir



Boisement de Hêtre au lac Noir sur une moraine latérale



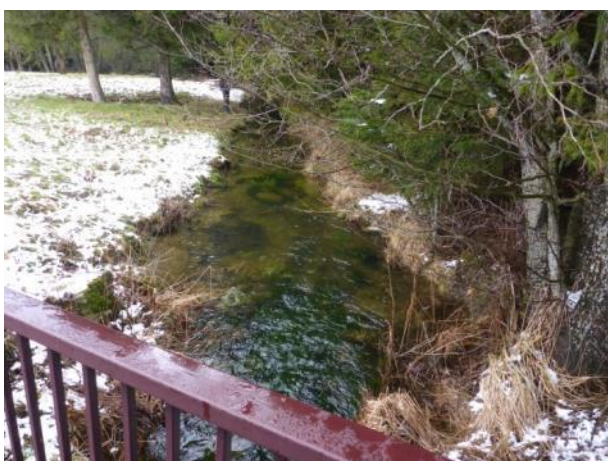
Lac de la Beunaz



Étang comblé (entre Lac de la Beunaz et Lac Noir)



Marais du Maravant amont : Drain agricole



Marais du Maravant en aval des deux marais : exutoire-source du cours d'eau du Maravant





Marais du Maravant (Collège)



Photo de groupe

Annexe 3 : Documents transmis et bibliographie sommaire
--

Thèses :

- Giugni G. (1990) Étude phytoécologique des bas-marais et marais de pente (caricion davallianae) des Préalpes chablaisiennes (suisses et françaises) : phytosociologie, morphophénologie, microclimatologie, hydrologie, pédologie, cartographie. Thèse Université de Lausanne.
- Henriot A. (2012) Élaboration du modèle conceptuel et mise au point d'une méthodologie de modélisation numérique d'un hydrosystème minéral complexe, l'aquifère glaciaire d'Évian (Haute Savoie, France). Thèse UAPV.
- Peirol J. (1979) Les composantes de l'écoulement d'un bassin versant en fonction de l'humidité d'une toposéquence. Thèse UPMC.

Rapports/études :

- Blavoux B. (1976) Étude de l'écoulement sur le bassin versant représentatif de Maravant. UPMC. Extraits (débits, bilan hydrologique).
- Blavoux B. (1981) Application des travaux de thèse de J. Peirol à une meilleure connaissance de l'infiltration sur la zone d'alimentation des sources minérales d'Évian. Extraits (pluviométrie, humidité du sol, piézométrie, ETR, bilan hydrologique, aquifère d'Évian, pédologie, toposéquence).
- Jeremie J.J. (1974) Étude hydrologique d'un bassin versant de la zone d'alimentation des eaux minérales d'Évian : le bassin de Maravant. Extraits (pluviométrie, ETP, débit, bilan hydrologique)
- Lamouille-Hébert M. (2016) Actualisation des connaissances sur les odonates de l'impluvium des eaux d'Évian. FRAPNA 74. 30p.

Autres :

Fiches Docob + Cartes habitats : Maravant, Piolan, La Beunaz, Chez Gaillet Est, Tourbière de Praubert

A3.8. Réunion-Visite de terrain – Marais de Vaux : 23 mars 2017

Réunion - Visite de terrain – Projet ZHTB phase 1

23 mars 2017 – Marais de Vaux (Hauteville-Lompnes)

Participants présents :

CEN Ain : Sylvie Duret, Géraldine Garnier

AE-RMC : Laurent Cadilhac, François Chambaud

UMR5600 EVS : Frédéric Paran, Didier Graillot, Jordan Ré-Bahuaud

Excusés :

AE-RMC : Martin Pignon

Rappel de l'ordre du jour :

1. Présentation du projet ZHTB et phasage (Frédéric Paran)
2. Présentation du marais de Vaux et des projets de restaurations hydro en cours (Sylvie Duret)
3. Discussion : a) adéquation du marais de Vaux p/r aux objectifs du projet ZHTB ; b) modalités pour une collaboration
4. Visite de terrain

Plan du compte-rendu :

1. Rappel des critères de sélection des sites de zones humides
2. Description, équipement et données du site du marais de Vaux
 - Annexe 1 : Carte et photographie aérienne IGN du site
 - Annexe 2 : Photographies de la visite de terrain du site du marais de Vaux
 - Annexe 3 : Documents transmis et bibliographie sommaire

Informations importantes et à retenir pour la suite... :

- Critères de sélection des sites de zones humides
- Autres visites de sites prévues : Tourbière de Frasne (Geneviève Magnon)

Documents joints et/ou envoyés par dl :

- ppt support de réunion : ZHTB
- ppt support de réunion : Marais de Vaux

Adéquation du site du marais de Vaux par rapport aux critères de sélection :

- Collaboration avec le CEN Ain (appui technique, problématique commune)
- Site moyennement instrumenté (à compléter)
- Données préalables existantes (piézométrie et Lidar notamment)
- Un exutoire bien identifié
- Projet de restauration hydraulique : possibilité de travailler sur l'effet des travaux sur le soutien d'étiage

Points de vigilance par rapport aux critères de sélection :

- Bassin versant très karstifié :
 - infiltration potentielle des eaux de pluie tombant sur l'impluvium vers d'autres bassins versants
 - nombreuses sources et apports diffus notamment au niveau du bassin versant est
 - pertes dans le lac des Lésines
- Projet de restauration hydraulique : difficulté pour le positionnement durable de l'instrumentation
- Pas de géométrie de la zone humide

Compléments d'équipement à mettre en œuvre si le site est retenu :

- Station de jaugeage à l'amont sur le bief des Vuires
- Et/ou station de jaugeage en zone médiane sur le bief des Vuires
- Piézomètres complémentaires + sondes

1. Rappel des critères de sélection des sites de zones humides

- **Contexte géologique et climatique**
- **Localisation :**
 - Têtes de bassins versants
 - Bassin hydrogéographique RMC
- **Dimension :**
 - Surface : 10 à 100 ha ; Impluvium : >100ha ; 10 à 200l/s
 - Exutoires bien identifiés
 - Épaisseur : 1 à plusieurs mètres
- **Connaissances, données et équipements :**
 - Station météo, Piézomètres, Station de jaugeage [nombre]
 - Sondages géophysique et pédologique, topographie [nombre]
 - Paramètres hydrodynamiques
 - Géochimie [date]
 - Autres
- **Flux d'eau**
 - Contexte simple
 - Apports aux limites connus
- **Activités humaines / Enjeux**
 - Restauration
 - Aménagements/Activités
- **Équipes de recherche impliquées**
- **Accès**

2. Description, équipement et données du marais de Vaux

Contact :

Sylvie Duret

Sites :

Marais de Vaux

Autres site potentiellement intéressant : Marais en Jarine à Aranc [30ha, Florent Pelizaro]

Historique :

1830 : premiers aménagements pour l'agriculture (assainissement du marais, construction de 30km de fossés, recalibrage du ruisseau des Vuires)

1945 : mise en place du champ captant

1950 : abandon de la fauche (blache), arrêt de l'agriculture car l'assainissement du marais est un échec

1963 : plan d'eau des Lésines (remblais construit par l'armée)

1971 : recalibrage ruisseau

1992 : travaux de l'université de Lyon (UMR 5023) – préservation du patrimoine naturel

Localisation :

Ain, Bugey, Hauteville-Lompnes, Cormaranche en Bugey

Altitude :

760m

Planachat (bassin versant est) : 1234m ; Forêt de Dergit (bassin versant ouest) : 1001m

Contexte géologique :

Calcaire, Karst (nombreux gouffres et grottes sur le bassin versant), Glaciaire

Type de zone humide :

Plan d'eau des Lésines (15ha)

Marais : au sud tourbière alcaline ; au centre résidus de tourbière acide ; au nord organo-minéral

Surface :

120ha

Bassin hydrogéographique et bassins versants

Bief des Vuires (sources à l'amont de Vaux Saint-Sulpice), affluent de la Mélogne puis de l'Albarine
[Lésines = Lapiaz]

Surface Impluvium

10 km²

Exutoires :

1 exutoire bien identifié au niveau du seuil/remblais des Lésines (parfois sec en été)

Pertes karstiques étanchées (pertes masquées potentielles) sous le plan d'eau des Lésines / plusieurs colmatages des pertes ont été effectués suite à la vidange du lac (dernière vidange accidentelle au début des années 2000)

Flux d'eau (Contexte et apports aux limites)

Au moins 10 résurgences karstiques intermittentes ou non (à l'est du marais) et apports diffus
Déversoir d'orage de Cormaranche en Bugey (+ eau d'assainissement)
1 ou 2 sources karstiques (ouest du marais)
Pertes karstiques

Épaisseurs :

0 à 3m

Station météo

MétéoFrance (Hauteville-Lompnes)

Piézomètres

5 piézomètres équipés de sondes enregistreuses et 6 manuels

Station de jaugeage

Oui sur l'exutoire (limnimètre et courbe de tarage)

Géophysique

NON

Pédologie

Sondages Rhemo : 3 transects, 16 sondages à 50cm [Tourbe : sud ; Organo-minéral : nord]

Hydrodynamique

NON

Géochimie

Chimie ponctuelle dans le captage

Autres

Lidar

Photo aériennes (drône du syndicat)

IBGN

Activités humaines (Restauration, Aménagements, activités)

Les activités et impact humains sur le marais sont les suivants :

- champ captant AEP pour Hauteville-Lompnes. Ce captage n'est plus utilisé du fait des fortes concentrations en fer (typique des milieux réducteurs) et de la présence de coliformes (STEP Cormaranche en Bugey dans le périmètre de protection). Il est toutefois mis en route régulièrement pour pouvoir être utilisé au cas où comme captage de secours.

- 2 chasses communales
- 4 agriculteurs en MAEC
- Association Tarpan (Cheval)
- Sentiers pédagogiques (Scolaires)
- Société de pêche des Lésines (carpe) / gestion communale du plan d'eau (vocation esthétique, récréative, pêche, soutien des captages)

Annexes

La gestion actuelle du marais vise à limiter de l'enfrichement et le boisement lié au drainage : fauche mécanique, pâturage (bovin, tarpans). Des actions sont aussi menées pour lutter contre le solidage.

Un projet de restauration hydraulique du marais est à l'étude : défrichage, reméandrage du bief des Vuires et comblement fossés (2018-2019). Le marais compte à l'heure actuel 30km de fossés de drainage et un ruisseau rectifié (bief des Vuires). L'objectif de la restauration vise à rétablir l'équilibre fonctionnel du marais, ouvrir le paysage, et valoriser le site par :

1. Défrichage, broyage, arrachage (en cours)
2. Reméandrement du ruisseau des Vuires (2018) / bouchage de l'ancien lit, reconstruction d'un lit guide
3. Comblement des fossés (sciure, planche) (2019) / Tourbière de Frasne

Un rejet d'eaux pluviales chargé d'eaux grises contamine le marais (matières organiques, déchets solides). Les travaux d'assainissement de la commune de Cormaranche devraient pallier ce problème d'ici quelques mois

Équipes de recherche déjà impliquées sur le site / projets / rapports

NON

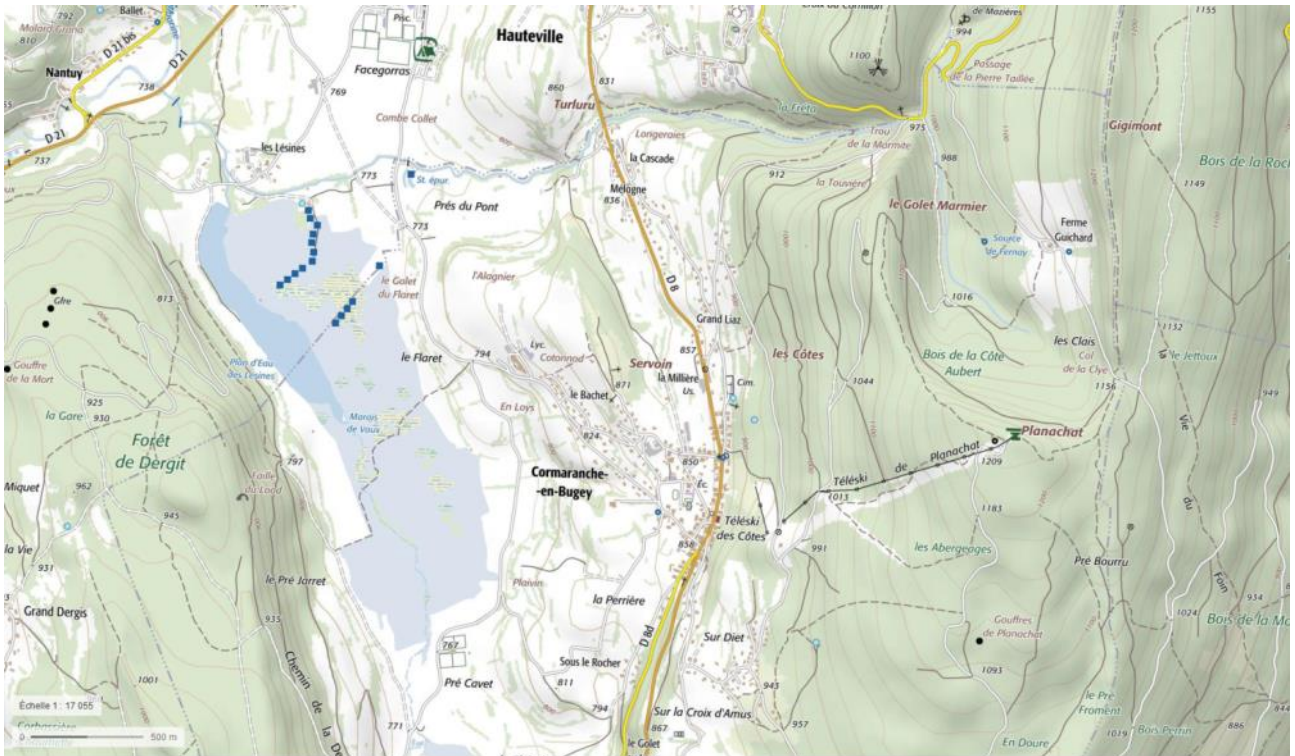
Remarques

Foncier :

- Marais de vaux - Foncier communal (ENS)
- Amont marais : fort potentiel écologique mais maitrise du foncier problématique

Syndicat de l'Albarine SIABVA : Contrat de territoire (travaux d'assainissement prévus)

Annexe 1 : Carte et photographie aérienne IGN du site



Carte et photographie aérienne IGN – Marais de Veaux (Hauteville-Lompnes)
Géoportail IGN 3 avril 2017 (<https://www.geoportail.gouv.fr/>)

Annexe 2 : Photographies de la visite de terrain du site du marais de Vaux



Grotte de Vaux : amont du bassin versant (Vaux Saint-Sulpice)



Sources de Dardena et bief : amont du bassin versant (Vaux Saint-Sulpice)



Bief des Vuires amont (Vaux Saint-Sulpice) / aval bassin de lagunage



Bois joli en fleur (*Daphne mezereum*)



Touradons : *Carex* sp.



Marais de Vaux : secteur amont



Bief de Vuire : zone médiane du Marais de Vaux





Planachat : bassin versant est (Rive droite)



Lac des Lésines (Rive gauche)



Sources et apports diffus : bassin versant en rive droite



Tarpan



Âne



Rejet dans le marais, via le collecteur d'eaux pluviales, d'eaux usées avec une charge organique importante (algues queues de mouton du genre *Sphoerotilus*) et de déchets solides



Déversoir d'orage et eau d'assainissement (RD)



Station de pompage : zone aval du marais de Vaux



Champ captant : zone aval du marais de vaux



Piézomètre : zone aval du marais de vaux



Ouvrage du champ captant



« Taupinière » : sédiment oxydé



Ouvrages sur la Mélogne



Seuil/remblais : exutoire lac des Lésines - Limnimètre



Bief des Vuires à l'aval de l'exutoire des Lésines (karstification)



Photo de groupe

Annexe 3 : Documents transmis, données et bibliographie sommaire

Rapports transmis

Teleos (2015) Projet de restauration hydromorphologique du marais de vaux

Icea (2016) Étude hydrogéologique préalable à l'avis de l'hydrogéologue agréé

Données transmises

Niveaux piézométriques : p10, p11, p12, p13, p14, p15 (mars 2016 à mars 2017 ; pas de temps 1h)

Rapports et données à rechercher

Étude écologique : UMR 5023 Fournier 1992

Étude comblement des fossés : Philippe Grovermier

Étude pédologique : Eric Lucot Univ. Besançon

Data liées au champ captant à rechercher (essais de pompage, productivité, chimie, log forage, paramètres hydrodynamiques...)

A3.9. Réunion-Visite de terrain- Tourbière de Frasne : 29 mars 2017

Réunion - Visite de terrain – Projet ZHTB phase 1 29 mars 2017 – Tourbière de Frasne (Frasne)

Participants présents :

SMMAHD : Geneviève Magnon, Thibault Van Rijswijk, Louis Collin

Univ. Franche-Comté : Daniel Gilbert, Marie-Laure Toussaint, Thibault Garin

Univ. Orléans : Catherine Bertrand,

Pôle National Tourbière : Grégory Bernard

AE-RMC : Laurent Cadilhac, François Chambaud

UMR5600 EVS : Frédéric Paron, Didier Graillot, Jordan Ré-Bahuaud

Excusés :

SMMAHD : Cyril Thévenet, Philippe Alpy

Univ. Orléans : Fatima Laggoun-Defarge

AE-RMC : Martin Pignon, Émilie Lunaud, Lionel Perrin

Autres personnes potentiellement intéressées :

Univ. Franche-Comté : Quentin Guillory, Sébastien Gogo

Rappel de l'ordre du jour :

1. Présentation du projet ZHTB et phasage (Frédéric Paron)
2. Présentation SNO Tourbière (Daniel Gilbert)
3. Présentation de la tourbière de Frasne (Geneviève Magnon)
4. Discussion : a) adéquation de la tourbière de Frasne p/r aux objectifs du projet ZHTB ; b) modalités pour une collaboration
5. Visite de terrain

Plan du compte-rendu :

1. Rappel des critères de sélection des sites de zones humides
2. Description, équipement et données du site de la tourbière de Frasne
 - Annexe 1 : Carte et photographies aériennes IGN du site
 - Annexe 2 : Photographies de la visite de terrain du site de la tourbière de Frasne
 - Annexe 3 : Documents transmis et bibliographie sommaire

Informations importantes et à retenir pour la suite... :

- Critères de sélection des sites de zones humides
- Autres visites de sites prévues : 0

Documents joints et/ou envoyés par dl ou accessibles via un hyperlien :

- 3 ppt supports de réunion : ZHTB, Tourbière de Frasne, SNO Tourbière
- Monographie sur la réserve naturelle régionale des tourbières de Frasne-Bouverans [25] : http://www.pole-tourbieres.org/IMG/UserFiles/Files/monographie_Frasne_VF.pdf
- Lien vers la base documentaire du Pole-Relais tourbières : <http://164.132.102.174:8080/dyn/portal/index.seam?page=home&fonds=2>

Adéquation du site de la tourbière de Frasne par rapport aux critères de sélection :

- Problématiques communes et/ou complémentaires avec le SMMAHD et les scientifiques déjà impliqués sur le site
- Site très encadré scientifiquement / projets importants passés et en cours
- Inscription du projet ZHTB dans le Plan de Gestion pour faciliter l'implantation de matériel et l'accès au site
- Site déjà bien instrumenté avec de nombreuses données structurées en bases de données
- Appui technique envisageable (Technicien du SMMAHD)
- Site bien circonscrit, présentant un volume intéressant avec des apports latéraux potentiellement très limités

Points de vigilance par rapport aux critères de sélection :

- Contexte karstique/glaciaire : zones de perte, apports et pertes diffuses potentiels
- Grande surface de tourbière

Compléments d'équipement à mettre en œuvre si le site est retenu :

- Sonde dans la doline du Creux du Lard
- Seuils jaugés et sondes aux 2 ruisseaux qui alimentent l'exutoire principal de la tourbière active
- Sonde au Lac de l'Entonnoir

1. Rappel des critères de sélection des sites de zones humides

- **Contexte géologique et climatique**
- **Localisation :**
 - Têtes de bassins versants
 - Bassin hydrogéographique RMC
- **Dimension :**
 - Surface : 10 à 100 ha ; Impluvium : >100ha ; 10 à 200l/s
 - Exutoires bien identifiés
 - Épaisseur : 1 à plusieurs mètres
- **Connaissances, données et équipements :**
 - Station météo, Piézomètres, Station de jaugeage [nombre]
 - Sondages géophysique et pédologique, topographie [nombre]
 - Paramètres hydrodynamiques
 - Géochimie [date]
 - Autres
- **Flux d'eau**
 - Contexte simple
 - Apports aux limites connus
- **Activités humaines / Enjeux**
 - Restauration
 - Aménagements/Activités
- **Équipes de recherche impliquées**
- **Accès**

2. Description, équipement et données de la tourbière de Frasne

Contact :

Geneviève Magnon

Sites :

Tourbière de Frasne

Complexe tourbeux de Forbonnet 240ha (+ Dugeon : 2000ha environ de tourbières en site Natura 2000)

Historique :

- 1790 : début de l'extraction de tourbe
- 1830 : apogée de l'extraction de tourbe
- 1850 : premiers travaux de drainage du marais en zone forestière
- 1950 : fin de l'extraction de tourbe
- 1967 : premières études écologiques
- 1986 : création de la RNR des tourbières de Frasne-Bouverans
- 2004 : début des études hydrauliques
- 2005 : travaux de comblement des fossés du bas-marais (aval tourbière active)
- 2008-2011 : projet ANR Peatwarm
- 2012 : site du SNO tourbières
- 2015-2016 : neutralisation de 2 grands fossés et construction d'un barrage enterré (Secteur Creux du Lard)

Localisation :

Doubs, Frasne, Bouverans

Altitude :

Environ 850m

Contexte géologique

Calcaire karstifié : Dolines ; Glaciaire : buttes morainiques, fond morainique irrégulier

Le site de Frasne est situé sur la dernière marche glaciaire du Würm. Le relief hérité est constitué d'une succession de buttes morainiques et de dépressions dans lesquelles on trouve les tourbières. Les plus vieilles tourbières du secteur sont âgées d'environ 7000 ans.

Type de zone humide

Tourbières acides qui échappent à l'alimentation du bassin versant et bas-marais alcalin dont le rajeunissement est lié à l'exploitation passée de la tourbe.

Plusieurs secteurs de tourbières :

- tourbière bombée
- tourbière vivante (active) : très instrumentée, hot spot botanique avec plus de 30 espèces protégées
- tourbière boisée et Forbonnet

Surface :

Frasne : 230ha dont 100ha en RNR ; 10 à 100ha selon les sites

Bassin hydrogéographique et bassins versants

Bassin versant Dugeon

Le site de Frasne comprend 3 bassins versants principaux :

- centre : impluvium de la perte du Lard (doline – pertes)
- nord : ruisseau des Oyettes (100ha)
- sud : ruisseau de Noirbief (affluent du Dugeon) (81ha)

Surface Impluvium

Grand >100ha et limité principalement à l'extension de la tourbière

Exutoires :

1 exutoire principal équipé (jaugeage, mesure en continu) et au moins 6 autres majeurs

La tourbière active possède un seul exutoire principal alimenté par 2 ruisseaux.

Flux d'eau (Contexte et apports aux limites)

Le secteur est principalement drainé par la Vallée du Dugeon. Les moraines glaciaires posées sur du karst sont potentiellement drainées par celui-ci. En bordure d'anticlinal, des alimentations karstiques sont possibles (ex : lac de l'Entonnoir) vers les moraines. On note aussi la présence de dolines fonctionnant en pertes ou en alimentation (potentiel émissif).

Sur le site de Frasne :

- la tourbière active et le bas-marais sont isolés par un cordon morainique
- le Creux du Lard alimente les sources de la papeterie (Ain) (traçage : 8 jours 14,4km 0,02m/s), il est aussi potentiellement émissif.

Questions en suspens ou à préciser :

- Quelles sont les relations de la tourbière avec les eaux souterraines ?
- Quel est le rôle hydraulique du creux du Lard ?
- Quels sont les chemins d'écoulement préférentiels dans la tourbière (horizon saprique, horizon fibrique, horizon étanche...) ?

Remarque : les niveaux ont été exceptionnellement bas pour l'hiver 2016/2017. Forte problématique liée aux épisodes de sécheresse sur le site.

Épaisseurs :

1 à 7m (3 à 5m fréquemment)

Combe d'écoulement Nord-Ouest : épaisseur bas-marais 1,5 à 3m

Station météo

Station météo (SNO Tourbière – ANR Peatwarm)

Air : Rayonnement, Température, Humidité, Anémomètre, Pluviomètre

Sol : Température, teneur en eau, flux de chaleur, niveau d'eau

Piézomètres

Au total : 38 piézomètres (12 auto P, T suivi 2014 et 24 manuel suivi depuis 2004 et 2014)

La tourbière active est la plus équipée : une vingtaine de piézomètres dans le bas-marais (relevé manuel tous les 15 jours depuis 2003) + piézomètre au creux du Lard depuis 2014 avec sondes enregistreuses + piézomètres en flute de pan + sonde CTD à l'exutoire. La plupart des piézomètres sont crépinés sur toute la hauteur (parfois existence de log). Le battement de nappe est d'environ de 30cm pour le P5.

Station de jaugeage

Station de jaugeage à l'exutoire de la tourbière active (Q, pH, COD, flux) – sonde CTD ott depuis 2014

Conductivité et température de l'eau le jour de la visite : 44µS/cm et 7,4°C

Débit estimé le jour de la visite : 3l/s

Géophysique

1 transect (tomo/résistivité) de 400m + investigation géologiques (Bichet et Richard 2014 ; Bichet, 2015)

Pédologie

150 sondages à la tarière manuelle en profondeur (dans la tourbe) + fosse à la pelle mécanique
Indice KTH (Goubet) – mise en évidence d’horizons typiques liés à la présence de bétail (horizon étanche/nappe perchée)
Géomorphologie fine tourbière active : Louis Collin 2016 (M2 Besançon)

Hydrodynamique

Perméabilité des sédiments (J. Thomas)

Géochimie

Chimie isotopique, ^{18}O , D, ^{14}C , chimie ponctuelle à différentes profondeurs (Diagraphies chimiques)
Datation de la tourbe (carottages) : 910 ans / 2,1m de tourbe (Centre radiocarbone de Lyon/Goubet) ; 7250 ans, 4m de tourbe (Peatwarm)

Autres études

De nombreux travaux ont été réalisés (ou sont en cours) sur le secteur (notamment dans le cadre du SNO Tourbière, du Projet Peatwarm et du Plan de Gestion) :

- Orthophoto 1956-2015
- Lidar (SMMAHD) 2009-2011 Tourbière de Frasne et Bassin du Dugeon
- Mat de mesure du carbone atmosphérique et du CH_4
- Serre de réchauffement sur la tourbe
- Analyse de macro-restes végétaux (variation historique du niveau des eaux) - Goubet
- Suivi diptère, flore
- Hydrologie du passé : paléo-environnement (indicateurs = communautés d’amibes)
- ...

Activités humaines (Restauration, Aménagements, activités)

Activités et impacts anthropiques :

- Exploitation de la tourbe : depuis 1790, apogée en 1830, fin en 1950 (nombreuses fosses à tourbes)
- Drainage du marais pour l’exploitation forestière ; organisation d’un réseau de fossés autour du Creux du Lard pour drainer le marais
- tourisme et pédagogie

Gestion du site :

- Natura 2000, RAMSAR ZH bassin du Dugeon, RNR
- Plan de gestion :

Le SMMAHD est gestionnaire délégué par la Communauté de communes Frasne-Dugeon (le site de Frasne est sur des terrains communaux). Le nouveau plan de gestion est en cours de rédaction (2017-2021).

- Programme LIFE restauration hydraulique de la tourbière de Frasne (2014-2020)

Les travaux ont conduit à la neutralisation des fossés (2) de drainage et à la création d'un barrage pour « renaturer » les flux d'eau [2015-2016 terminé]. Cette restauration hydrologique a permis de renvoyer vers la tourbière les écoulements qui avaient été déviés vers la doline du Creux du Lard.

Vidéo des travaux hydrauliques réalisés sur la tourbière de Frasne en 2015 :

<https://www.youtube.com/watch?v=22gIHxjE-jE>

Équipes de recherche déjà impliquées sur le site / projets

Projet Peatwarm (2008-2012) / CC réchauffement, puits et source de carbone ; chronoenv. (Daniel Gilbert), EPFL, Neuchâtel... ; Catherine Bertrand (Hydrogéologue chronoenv.) ; Vincent Bichet (Hydrogéologue)

SNO Tourbière (INSU-SIC) [<http://www.sno-tourbieres.cnrs.fr/>]...

... et ANR PeatWarm [<http://peatwarm.cnrs-orleans.fr/>]

Le SNO Tourbière est en lien avec : IR OZCAR (zone critique), IR ICOS (en cours), SNO Karst, ZA Arc Jurassien.

Le SNO tourbière travaille sur les tourbières à Sphaigne. Sa problématique part du constat que si les tourbières n'occupent que 3% de la surface des continents, elles assurent le stockage de 30% du carbone.

En contexte de changement climatique, la hausse des températures de l'air pourrait provoquer un déstockage massif de ce carbone piégé et ainsi augmenter l'émission de gaz à effet de serre (GES).

Le SNO tourbière travaille donc sur les processus biogéochimiques impliqués dans le stockage/déstockage du carbone dans la tourbe. Des mesures de flux de GES et des bilans carbone sont estimés. Les relations sol/plante/microorganisme conditionnent fortement les processus biogéochimiques. Un plan d'action sur 10 à 15 ans est en œuvre.

Le SNO tourbières est constitué d'un réseau :

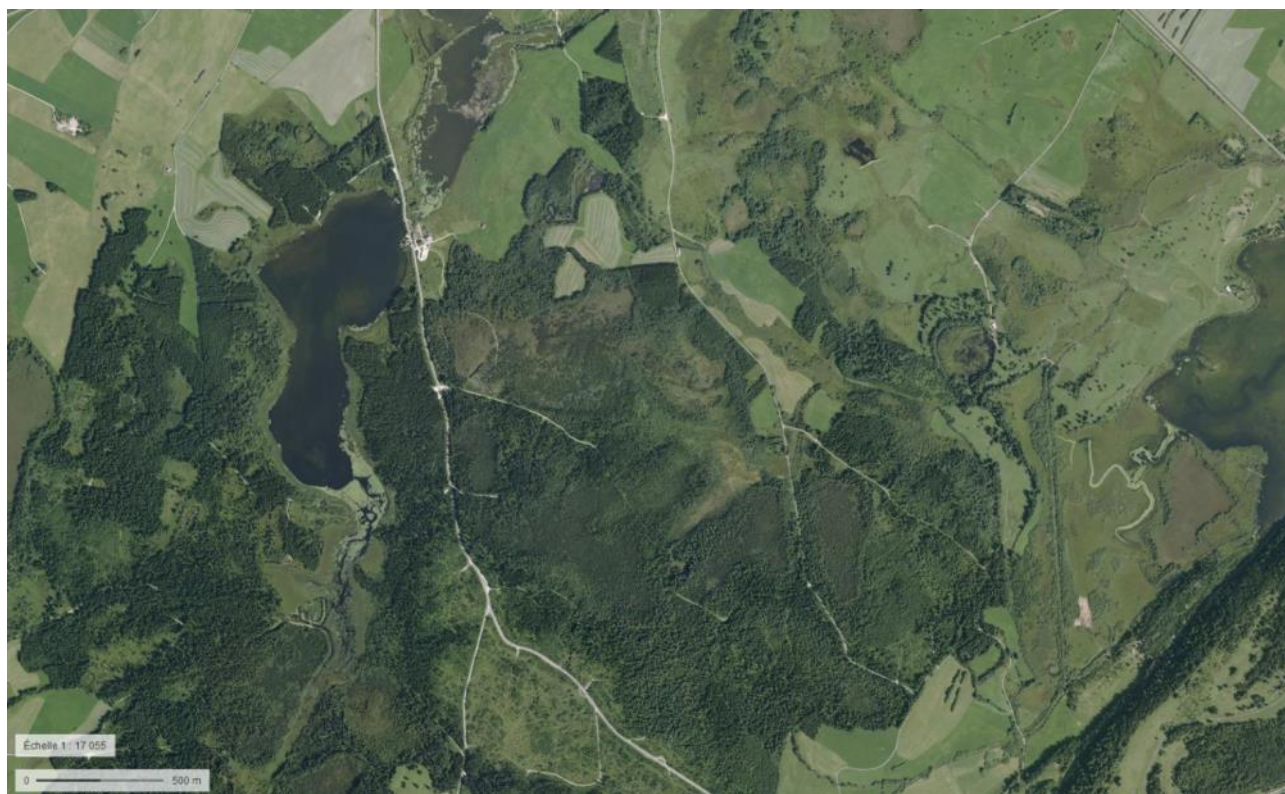
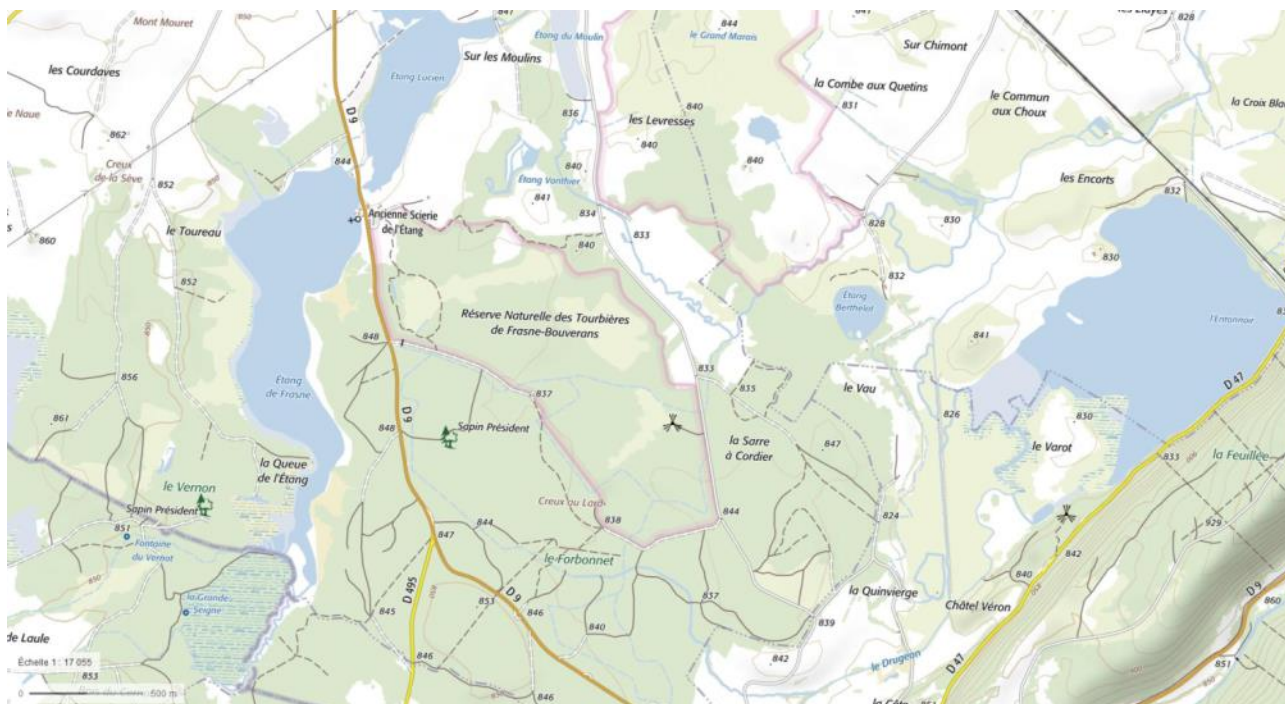
- de 4 sites en France : Tourbière de Landemarais (Rennes), Tourbière de La Guette (Orléans), Tourbière de Frasné, Tourbière de Bernadouze (Toulouse) ;
- sites en Pologne et Sibérie

Sur ces sites 42 variables cibles sont mesurées depuis 2008 : météo, hydro, flux de gaz, biogéochimiques. Un SIE a été mis en place (BDD et SIG).

Une perspective de ces travaux vise à quantifier les services écosystémiques des tourbières (Montpellier ; Pierre Courtois) en explorant notamment deux questions :

- Comment inclure les tourbières dans le marché du carbone ?
- Quelles sont les variables hydro clefs pour construire un modèle économique ?

Annexe 1 : Carte et photographie aérienne IGN du site



Carte et photographie aérienne IGN – Tourbière de Frasne (Frasne)

Géoportail IGN 4 avril 2017 (<https://www.geoportail.gouv.fr/>)



Photographie aérienne IGN – Tourbière de Frasne (Frasne)
Installations : projet ARN Peatwarm dans la tourbière active (haut)
Tourbière bombée et anciennes fosses à tourbe (bas)
Géoportail IGN 4 avril 2017 (<https://www.geoportail.gouv.fr/>)

Annexe 2 : Photographies de la visite de terrain de la tourbière de Frasne



Panneau d'information : parking des tourbières



Étang Lucien



Tourbière bombée et anciennes fosses à tourbe en voie de colonisation par les Sphaignes



Lycopodes (*Lycopodium annotinum*)



Linaigrettes (*Eriophorum vaginatum*)



Fossés et ouvrage – Chemin ouest



Tourbe incisée par un fossé – Chemin ouest



Doline : Creux du Lard



Affleurement de calcaire : Creux du Lard



Station météo : tourbière active



Tourbière active : vue du « panorama »



Panoramique de la tourbière depuis la station Peat Warm



Dispositif ANR Peatwarm et SNO Tourbière : tourbière active



Placette « réchauffement » : ANR Peatwarm



Placette témoin : ANR Peatwarm



Sarracénie : tourbière active



Tourbière active et ruisseau 1 : vue du chemin est



Seuil de relèvement ruisseau 1 : tourbière active



Confluence ruisseaux 1+2 : tourbière active



Datalogger : ruisseaux 1+2 tourbière active



Ruisseau 2 : tourbière active



Piezomètres en flute de pan



Fosse à tourbe liée aux travaux de restauration



Barrage en planches enterré dans la tourbe



Zone de comblement de fossé de drainage



Moraine borant la zone humides composées de touradons (motu) de laîche



Dépérissements de bouleau et de pin à crochet suite à des travaux de réhaussement de la ligne d'eau dans la moliniaie



Zone d'emprunt de tourbe pour reboucher le fossé comblé



Cicatrisation de travaux par réimplantation spontanée d'espèces hygrophiles (Molinie bleuâtre, Carex sp, Polytic commun, Sphaigne...)



Exutoire : chemin est



Touradons immolés par le feu : chemin est



Exutoires : chemin nord



Photo de groupe

Annexe 3 : Documents transmis et bibliographie sommaire
--

Document transmis

Monographie sur la réserve naturelle régionale des tourbières de Frasne-Bouverans [25] :

http://www.pole-tourbieres.org/IMG/UserFiles/Files/monographie_Frasne_VF.pdf

Ce document contient de très nombreuses références bibliographiques.

Bibliographie sommaire :

- Station biologique de l'université de Franche-Comté à Bonnevaux (surtout écologues (+pédologues+géologues+historiens)) (1967 à 1998)
- Marc Briot (2004) DEA Étude hydro pour restauration des capacités biogènes
- Philippe Grosvernier (BE Suisse Lin'Eco) (2004-2005) Étude hydro-écologique
- Travaux de fermeture du 1er fossé du bas-marais (aval tourbière active) (2005)
- Bichet et Campy (2008) Étude géologique et géomorphologique
- Campagne LIDAR sur la tourbière de Frasne et le bassin du Dugeon (2009-2011)
- Lin'Eco (2011) « Enjeux de conservation et potentialités de restauration de la tourbière du Forbonnet »
- Binet et al. (2013) J. Hydrology
- Lin'Eco (2014) « Examen de la situation hydrologique et des possibilités d'intervention »
- V.Bichet et H.Richard (déc 2014) Compléments d'investigation du sous-sol géologique
- J.Thomas (Scop Sagnes) (dec 2014) analyse de la perméabilité des sédiments
- Lin'eco/Scop Sagnes (2014-2015) « Assistance au suivi piézométrique et préparation de la faisabilité du chantier de restauration (LIFE)
- V.Bichet (Univ FC 2015) Transect géophysique- panneaux électriques
- Goubet (2015) Analyse des macrorestes végétaux
- Travaux d'intervention hydrologiques tourbière active (programme LIFE tourbière du Jura : 2015-2016)
- Louis Collin (2016) Géomorphologie fine tourbière active (M2 Besançon)

- PNRZH : Négrel P. isotope et méthodes géophysiques aéroportées

Annexe 4 : Critères de sélection des sites de zones humides

Critères de sélection des sites de zones humides

- **Contexte géologique et climatique**
- **Localisation :**
 - Têtes de bassins versants
 - Bassin hydrogéographique RMC
- **Dimension :**
 - Surface : 10 à 100 ha ; Impluvium : >100ha ; 10 à 200l/s
 - Exutoires bien identifiés
 - Épaisseur : 1 à plusieurs mètres
- **Connaissances, données et équipements :**
 - Station météo, Piézomètres, Station de jaugeage [nombre]
 - Sondages géophysique et pédologique, topographie [nombre]
 - Paramètres hydrodynamiques
 - Géochimie [date]
 - Autres
- **Flux d'eau**
 - Contexte simple
 - Apports aux limites connus
- **Activités humaines / Enjeux**
 - Restauration
 - Aménagements/Activités
- **Équipes de recherche impliquées**
- **Accès**

Annexe 5 : Personnes impliquées ou contactées (ZHTB phases 1 et 2)

A5.1. Comité de pilotage

Prénom	Nom	Organisme	e-mail	rmq
Nadine	Bosc-Bossut	AE-RMC	Nadine.BOSCOSSUT@eaurmc.fr	-
Laurent	Cadilhac	AE-RMC	laurent.cadilhac@eaurmc.fr	Référent projet
François	Chambaud	AE-RMC	Francois.CHAMBAUD@eaurmc.fr	Référent projet
Émilie	Lunaud	AE-RMC	Emilie.LUNAUD@eaurmc.fr	-
Lionel	Perrin	AE-RMC	Lionel.PERRIN@eaurmc.fr	-
Martin	Pignon	AE-RMC	Martin.PIGNON@eaurmc.fr	-
Stéphane	Stroffek	AE-RMC	Stephane.STROFFEK@eaurmc.fr	-
Cécile	Zys	AE-RMC	Cecile.ZYS@eaurmc.fr	-
Delphine	Danancher	CEN RA Vourles	delphine.danancher@espaces-naturels.fr	-
Jérôme	Porteret	CEN Savoie	j.porteret@cen-savoie.org	-

A5.2. Sites d'études

Prénom	Nom	Organisme	e-mail	Sites
Cyril	Thevenet	CD Doubs	Cyril.Thevenet@doubs.fr	Frasne
Grégory	Bernard	CEN	gregory.bernard@reseau-cen.org	Frasne
Antony	Garcia	CEN	antony.garcia@espaces-naturels.fr	Frasne
Louis	Collin	SMMAHd	l.collin@smmahd.fr	Frasne
Geneviève	Magnon	SMMAHd	g.magnon@smmahd.fr	Frasne
Thibault	Van Rijswijk	SMMAHd	technicien.mr@smmahd.fr	Frasne
Catherine	Bertrand	Univ. Franche-Comté	catherine.bertrand@univ-fcomte.fr	Frasne
Daniel	Gilbert	Univ. Franche-Comté	daniel.gilbert@univ-fcomte.fr	Frasne
Quentin	Guillory	Univ. Franche-Comté	Quentin.Guillory@bourgognefranchecomte.fr	Frasne
Marie-Laure	Toussaint	Univ. Franche-Comté	marie-laure.toussaint@univ-fcomte.fr	Frasne
Sébastien	Gogo	Univ. Orléans	sebastien.gogo@univ-orleans.fr	Frasne
Fatima	Laggoun-Defarge	Univ. Orléans	Fatima.Laggoun-Defarge@univ-orleans.fr	Frasne
Carole	Desplanque	ONF Isère	carole.desplanque@onf.fr	Luitel
Jean-Paul	Laurent	Univ. Grenoble	jean-paul.laurent@univ-grenoble-alpes.fr	Luitel
Olivier	Manneville	Univ. Grenoble	Olivier.Manneville@univ-grenoble-alpes.fr	Luitel
Géraldine	Garnier	CEN	geraldine.garnier@espaces-naturels.fr	Marais de Vaux
Sylvie	Duret	CEN RA Charnoz sur Ain	sylvie.duret@espaces-naturels.fr	Marais de Vaux
Benoit	Pascault	CEN	benoit.pascault@espaces-naturels.fr	Montselgues
Fabrice	Grégoire	URM 5600	fabrice.gregoire@orange.fr	Montselgues
Alexandre	Guillemot	ASTER-CEN 74	alexandre.guillemot@asters.asso.fr	Plateau de Gavot
Thomas	Martin	ASTER-CEN 74	thomas.martin@asters.asso.fr	Plateau de Gavot
Clara	Nicolitch	ASTER-CEN 74	clara.nicolitch@asters.asso.fr	Plateau de Gavot
Lalie	Chochon	CCPEVA	espacesnaturels@valleedabondance.fr	Plateau de Gavot
Pierre	Loiseau	CCPEVA	pierre.loiseau@cc-peva.fr	Plateau de Gavot
Marie	Lamouille-Hebert	FRAPNA Haute-Savoie	marie.hebert@frapna.org	Plateau de Gavot
Patrick	Lachassagne	SAEME	Patrick.LACHASSAGNE@danone.com	Plateau de Gavot
Valérie	Pele	SAEME	valeriane.pele@danone.com	Plateau de Gavot

A5.3. Autres sites complémentaires potentiels

Prénom	Nom	Organisme	e-mail	Sites
Marion	De Groot	Asters CEN Haute-Savoie	marion.degroot@asters.asso.fr	Plateau de Beauregard
Thomas	Martin	Asters CEN Haute-Savoie	thomas.martin@asters.asso.fr	Megève, Plateau des Bornes, Tourbière de Lossy, Les Gets
Aude	Sourellat	Asters CEN Haute-Savoie	aude.sourellat@asters.asso.fr	Les Gets
Hélène	Chevalier	Atelier des cimes	helen.chevallier@mac.com	Bouillouses
Jean-Baptiste	Vachon	CC Vallée de Thônes	urba@ccvt.fr	Plateau de Beauregard
Yoann	Bunz	CD Haute-Savoie	yoann.bunz@hautesavoie.fr	Tourbières du Plateau des Glières
Lionel	Quelin	CEN PACA Pôle Alpes du sud	lionel.quelin@cen-paca.org	Marais de Névache, Marais du Bouret, Plateau de Bayard, Marais de Manteyer
Sylvie	Duret	CEN RA Charnoz sur Ain	sylvie.duret@espaces-naturels.fr	Marais des Bidonnes, marais de Prodons
Antony	Garcia	CEN RA Charnoz sur Ain	antony.garcia@espaces-naturels.fr	Rougemont (Albarine)
Céline	Hervé	CEN RA Vourles	celine.herve@espaces-naturels.fr	Couty
Jérôme	Porteret	CEN Savoie	j.porteret@cen-savoie.org	Marais de Val Coisin, Les Creusates
Thomas	Jacques	Scop Sagne / KAIROS	jacques@sagne.coop	Pyrénées
Stéphanie	Bardeau	SIABH	s-bardeau@pays-herbasse.com	ZHE de l'Herbasse, Plateau de Chambaran
Ludovic	Finiels	SM3A	-	Tourbière de Sommand sur Mieussy
Marion	Rivollet	SM3A	amenagement@hautchablais.fr ; mrivollet@sm3a.com	Tourbière de Sommand sur Mieussy
Geneviève	Magnon	SMMAH	g.magnon@smmahd.fr	Grandes Saignes
M	Chateaufieux	SMRD	mchateaufieux@ladrome.fr	Marais des Boulignons
Jérôme	Duval	SMRD	j.duval@smrd.org	Marais des Boulignons
Chrystel	Fermond	SMRD	c.fermond@smrd.org	Marais des Boulignons
Fabrice	Gonnet	SMRD	f.gonnet@smrd.org	Marais des Boulignons
Benoît	Laroque	ONF	benoit.larroque@onf.fr	Zones humides de l'Aude
Isabelle	Gehin	ONF	isabelle.gehin@onf.fr	Zones humides de l'Aude
Christophe	Cocula	ONF	christophe.cocula@onf.fr	Zones humides de l'Aude

A5.4. Chercheurs de l'équipe projet

Prénom	Nom	Organisme	e-mail	rmq
Anne	Johannet	EMA	Anne.Johannet@mines-ales.fr	
Jordan	Re-Bahaud	EMA	jordan.re-bahaud@mines-st-etienne.fr	
Didier	Graillot	EMSE UMR 5600	didier.graillot@mines-st-etienne.fr	
Frédéric	Paran	EMSE UMR 5600	frederic.paran@mines-st-etienne.fr	
Thierry	Winiarski	ENTPE UMR 5023	Thierry.WINIARSKI@entpe.fr	
Hervé	Cubizolle	ISTHME UMR 5600	herve.cubizolle@univ-st-etienne.fr	
Damien	Fayeaux	IUT Saint-Etienne	damien.fayeaux@univ-st-etienne.fr	
Arnaud	Duranel	Univ. Saint-Etienne	arnaud_duranel@yahoo.fr	
Véronique	Lavastre	Univ. Saint-Etienne	veronique.lavastre@univ-st-etienne.fr	

Annexe 6 : Poster du projet

Étude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins versants (ZHTB) dans le soutien d'étiage des cours d'eau (2016 – 2018... 2020)

Problématique

Quelle est le rôle des zones humides pour le soutien d'étiage des cours d'eau ?

Objectifs

1. Quantifier les capacités de stockage et de transfert d'eau des zones humides
2. Faire la part des origines des apports d'eau au cours d'eau à l'étiage
3. Déterminer des indicateurs simples du rôle de soutien d'étiage et des critères de présence, maintien et évolution des zones humides

Finalités

Scientifiques :

- mieux comprendre les interactions cours d'eau/zones humides/eaux souterraines
- mieux comprendre la transformation du signal hydrologique à travers les zones humides

Opérationnelles :

- transfert de connaissance : guide méthodologique ou technique
- argumentaires pour la protection des zones humides
- indicateurs simples de diagnostic et de suivi (ex. restauration, bon fonctionnement...)

Planification

Phase 1 (2016) : État de l'art / Choix des sites, des compétences et de l'instrumentation

Phase 2 (2017-2018) : Mesures et instrumentation sur 3 sites test

Phase 3 (à planifier) : Analyse et interprétation / Test des indicateurs sur de nouveaux sites / Valorisation

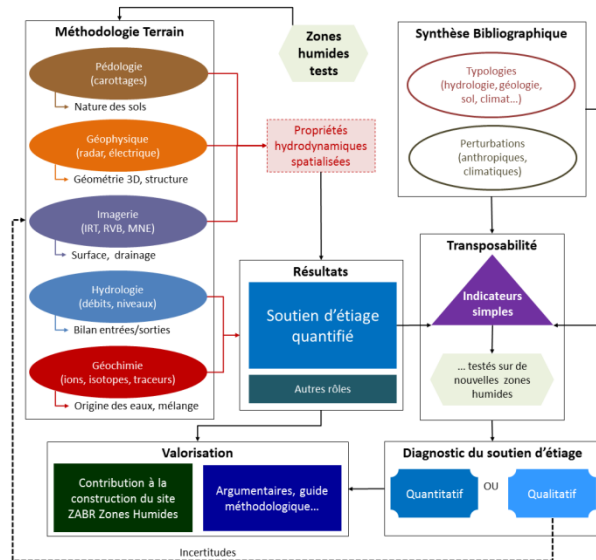
Perspectives

1. Modélisation de la répartition des zones humides
2. Prise en compte d'aspects sociaux : perceptions, enjeux, besoins...
3. Intégration d'indicateurs paysagers et écologiques (odonates, végétation, diptères, amibes...)
4. Quantification de services écosystémiques : marché du carbone, stockage, régulation...

Équipe projet:

- UMR 5600 EVS – Mines Saint-Etienne : suivi et analyses hydrologiques et hydrogéologiques (Didier Graillot, Frédéric Paron)
- EMA : analyse statistique, hydrologie, météorologie (Anne Johanne, Jordan Ré-Sahuau)
- UMR 5600 EVS – Isthme : pédologie (histosols), géomorphologie (Hervé Cubizolle)
- UJM - LMV : géochimie (Véronique Lavastre)
- UJM – IUT : imagerie aéroportée MNE/IRT (Damien Fayeaux)
- UMR 5023 LEHNA – ENTPE : géophysique pour la géométrie des tourbières (Thierry Winarski)
- AE-RMC : Laurent Cadilhac, François Chambeaud, Émilie Lunaud, Martin Pignon, Nadine Bosc-Bossut, Joël Hervo, Cécile Zys, Lionel Perrin
- CREN : Delphine Dananher, Jérôme Portet

Contact : Frédéric Paron - frederic.paron@mines-stetienne.fr



Organisation interdisciplinaire du projet



Lac Luitel (Isère)



Tourbière de Frasse (Doubs)



Tourbière de Praubert (Haute-Savoie)

3 sites des zones humides test

- Sites complémentaires potentiels**
- Marais de Vaux (Ain)
 - Tourbières de Montselgues (Ardèche)
 - Zones humides de l'Aude
 - Marais de Névache, Marais du Bourget (Hautes-Alpes)
 - Tourbière des Creusates (Savoie)
 - Tourbière de Sommand (Haute-Savoie)
 - Marais des Bouligons (Drôme)
 - Tourbière de Gimel (Loire)
 - ...



Annexe 7 : Présentation type phase 1

27 mars 2017

ONF, CD Aude, AE-RMC Délégation Montpellier



Etude et compréhension du rôle hydrologique et hydrogéologique des zones humides de têtes de bassins (ZHTB) dans le soutien d'étiage des cours d'eau

+

autres équipes impliquées en phase 2 - 2017/2018

Recherche de références dans les contextes très contrastés du bassin du Rhône

UMR 5600 EVS

EMA – LGEI

UJM – LMV et IUT

UMR 5023 LEHNA – ENTPE

Phase 1 – 2016 (---> 2017)



INSPIRING INNOVATION  INNOVANTE PAR TRADITION

Projets interdisciplinaires ZABR – AE-RMC

■ Échanges nappes/Rhône – 2006-2015

- 5 phases, 1 thèse, 1 guide méthodologique (2015)
- projet ONEMA NAPROM en 2011 (guide technique en 2017)
- ex site ZABR Axe Rhône – OHM-VR

■ Échanges karst/rivières (Cèze) – 2013-2018

- 3 phases, 1 thèse, 1 guide méthodologique (2019)
- site ZABR Rivières cévenoles

■ Zones humides/soutien d'étiage – 2016-2020

- 3 phases prévues, 1 guide méthodologique/technique (2020)
- projet AFB (ex ONEMA) potentiel ??
- site ZABR Zones Humides

Contexte et problématique

Rôle supposé important des zones humides
(ex : tourbière) **dans le stockage et le soutien d'étiage**
des cours d'eau (voire des eaux souterraines)

- **Comment faire la part des origines des apports d'eau à l'étiage ?**
- **Comment quantifier les capacités** (stockage et transfert d'eau) **des zones humides à soutenir les cours d'eau à l'étiage ?**

3

02/06/2017

Institut Mines-Télécom

École des Mines de Saint-Étienne



Finalités du projet ZHTB

- **Scientifique :**
 - Mieux comprendre le fonctionnement des échanges ESU / ZH / ESO
 - Mieux appréhender les services rendus en termes de soutien d'étiage (régulation thermique, stockage...)
 - Préciser les vulnérabilités physiques des ZHTB pour une meilleure protection et gestion
- **Opérationnelle :**
 - Compléter le diagnostic de l'interface ESO / ESU
 - Ouvrir le domaine d'applicabilité des guides méthodologiques Nappes/Rhône et NAPROM et à de nouveaux contextes géomorphologiques

4

02/06/2017

Institut Mines-Télécom

École des Mines de Saint-Étienne



Objectifs du projet ZHTB

- **Séparer et quantifier les contributions des différents compartiments (ESO et ZH) au soutien d'étiage des cours d'eau par l'étude des flux d'entrées et sorties en précisant les incertitudes liées aux mesures**
- **Evaluer la capacité des ZH à contribuer au soutien d'étiage suivant le contexte altitudinal, géologique, géomorphologique, climatique selon leur typologie (ex: tourbières ombrotrophiques, géotrophiques...)**
- **Identifier les éventuelles conséquences des éventuelles pressions anthropiques (ex : prélèvements, drainages, pollutions...)**

5

02/06/2017

Institut Mines-Télécom

École des Mines de Saint-Étienne



Planification et durée du projet ZHTB

- **Durée : 2016 – 2020 (au moins 3 ans voire 4)**

■ Phasage

- Phase 1 (2016---> 2017) : Etat de l'art, choix des sites, des compétences et de l'instrumentation
- Phase 2 (2017/2018) : Mesures et instrumentation sur 2 ou 3 sites retenus maximum (selon données existantes)
- Phase 3 : Analyse et interprétation / Valorisation

6

02/06/2017

Institut Mines-Télécom

École des Mines de Saint-Étienne



Comité de suivi

- **AE-RMC** : L. Cadilhac, F. Chambaud, E. Lunaud, M. Pignon, N. Bosc-Bossut, J. Hervo, L. Perrin
- **CREN RA** : D. Danancher
- **CEN Savoie** : J. Porteret
- ...

7

02/06/2017

Institut Mines-Télécom

École des Mines de Saint-Étienne



Phase 1 – 2016 (---> 2017)

Sélection des compétences et des sites

- **Tâches :**
 - Etat de l'art sur l'hydrologie des ZH et les différentes typologies des ZH
 - **Contacts avec les gestionnaires et acteurs locaux**
 - **Constitution d'un réseau « zones humides » en lien avec le projet**
 - **Présélection des sites ayant déjà fait l'objet d'investigations et d'acquisition de données**
 - **Reconnaissance de terrain sur les sites les plus intéressants**
 - **Choix des sites et plan d'instrumentation et de l'échelle de travail :**
 - Locale : Echelle de la ZH et du cours d'eau d'accompagnement
 - Régionale : Echelle du bassin versant regroupant plusieurs ZH
 - **Choix des variables et paramètres à étudier**
 - **Etablissement d'un plan de suivi et d'instrumentation (protocole expérimental)**
- **Livrable : rapport** (et document de valorisation du travail bibliographique)
- **Consortium : sélection des compétences pour la suite du projet**

8

02/06/2017

Institut Mines-Télécom

École des Mines de Saint-Étienne



Phase 2 – 2017/2018

Mesures et instrumentation

- **Traitement et exploitation des données hydrologiques/hydrogéologiques et biologiques** (ex : odonates) **pour les sites déjà équipés et sélectionnés** : bilans hydrologiques, corrélations statistiques spatiales et temporelles à partir des chroniques disponibles
- **Détermination des indicateurs pertinents vis-à-vis du rôle dans le soutien d'étiage** (ex : variables géomorphologiques, hydro-météorologiques, ...)
- **Acquisition d'information hydrologique/hydrogéologique sur les sites choisis pour être équipés et début d'exploitation des données**

9

02/06/2017

Institut Mines-Télécom

École des Mines de Saint-Étienne



Phase 2 – 2017/2018

Équipes de recherche impliquées

- **UMR 5600 EVS – EMSE** : suivi et analyses hydrologiques et hydrogéologiques (D. Graillot, F. Paran)
- **EMA** : analyse statistique, hydrologie, météorologie (A. Johannet, J. Ré-Bahuaud, D. Salze)
- **UMR 5600 EVS – Isthme** : pédologie (histosol), géomorphologie (H. Cubizolle)
- **UJM** : géochimie (V. Lavastre) ; imagerie aéroportée MNE/IRT (D. Fayeaux)
- **UMR 5023 LEHNA – ENTPE** : géophysique pour la géométrie des tourbières (T. Winiarski)

Autres compétences :

- **UMR 5600 EVS – Biogéophile** : géographie sociale (M. Cottet, E. Comby)
- **Irstea (MALY)** : Odonates
- **EDYTEM / Univ. Franche-Comté** : Écologie végétale

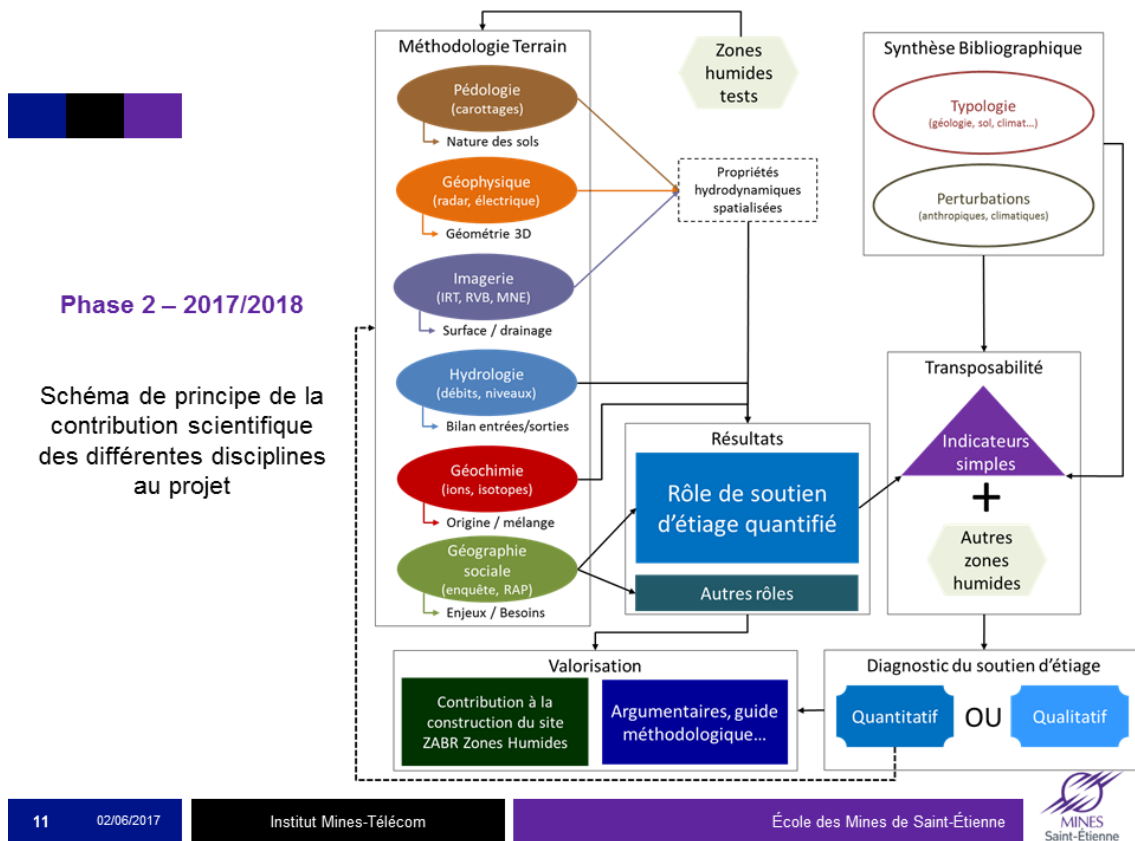
10

02/06/2017

Institut Mines-Télécom

École des Mines de Saint-Étienne





Phase 3 – 2019/2020 (???, à développer)

Analyse, interprétation du fonctionnement, mise en évidence du rôle de soutien d'étiage et préconisations en matière de gestion

- **Suite de l'acquisition d'information et exploitation des données au cours des cycles hydrologiques correspondants**
- **Analyse et synthèse des données acquises en phases 2**
- **Restitution et valorisation**
 - Scientifique : rapport, publication, communication
 - Opérationnel : extension du guide méthodologique/technique, site web
 - Grand public : plaquettes, site web, panneaux signalétiques
- **Perspectives**
 - Projet national AFB ??
 - Intégration des problématiques de changement global

Choix des sites de ZH

- **Présélection de sites**
- **Sites déjà visités : tourbière de Montselgues, Lac Luitel, Plateau de Gavot, Marais de Vaux, Tourbière de Frasne**
- **Sites à visiter : -**

13

02/06/2017

Institut Mines-Télécom

École des Mines de Saint-Étienne



Critères de choix des sites

- **Contexte géologique et climatique**
- **Localisation : tête de bassin versant sur RMC**
- **Dimension :**
 - Surface : 10 à 100 ha ; Impluvium : >100ha ; 10 à 200l/s
 - Exutoires bien identifiés
 - Épaisseur : 1 à plusieurs mètres
- **Connaissances, données et équipements :**
 - Station météo, Piézomètres, Station de jaugeage
 - Sondages géophysique et pédologique, topographie
 - Paramètres hydrodynamiques
 - Géochimie
 - Autre
- **Flux d'eau**
 - Contexte simple et Apports aux limites
- **Activités humaines / Enjeux**
 - Restauration ; Aménagements/Activités
- **Équipes de recherche impliquées**
- **Accès**

14

02/06/2017

Institut Mines-Télécom

École des Mines de Saint-Étienne





A suivre...

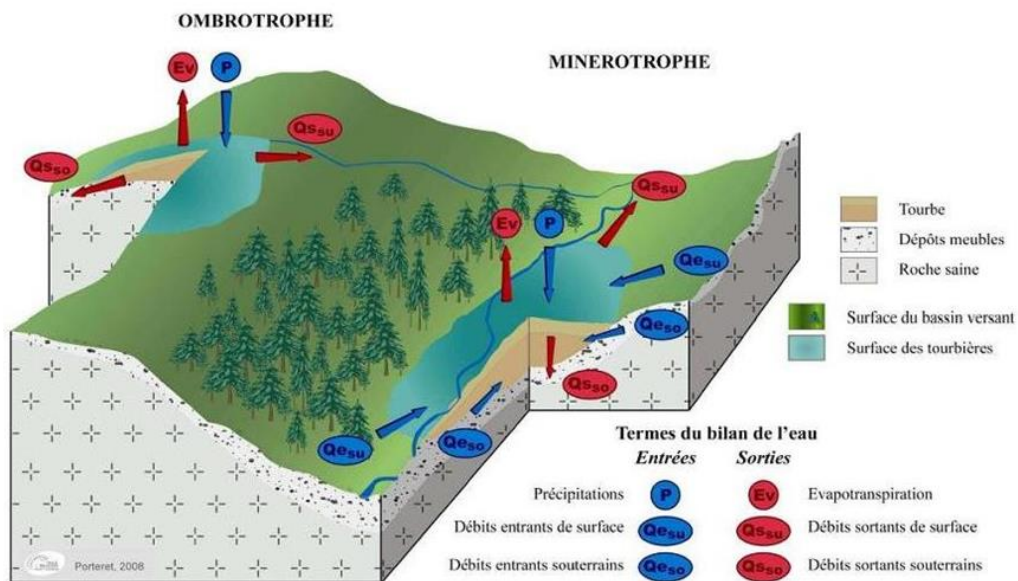
www.mines-stetienne.fr



Une école de l'Institut Mines-Télécom

INSPIRING INNOVATION  INNOVANTE PAR TRADITION

Echanges d'eau à l'interface nappes/tourbières/rivières [Porteret, 2008]



Annexe 8 : Typologies de zones humides

A8.1. Typologie de zones humides applicables aux Sdage et aux Sage (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2005)

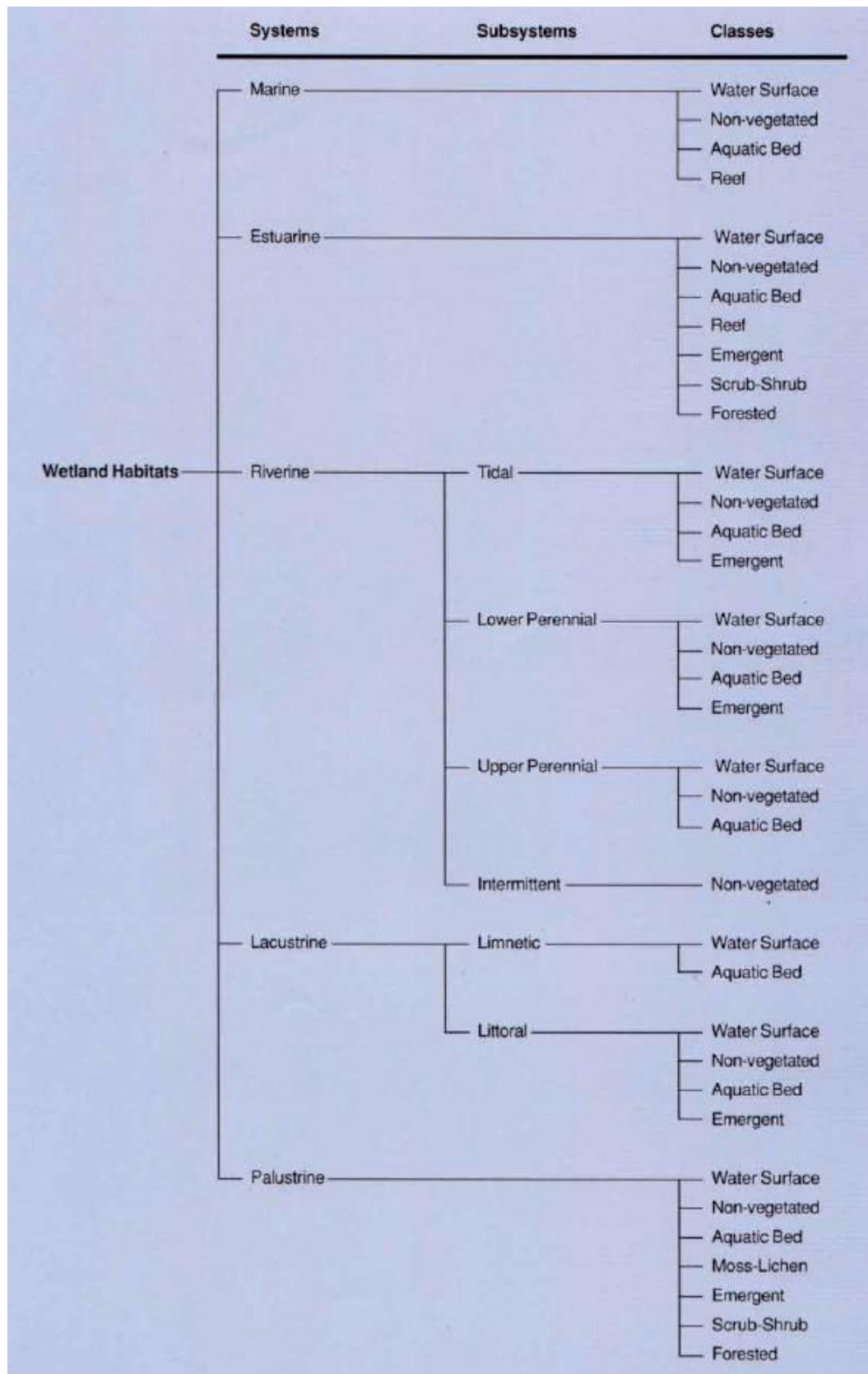
Typologie des zones humides applicable aux Sdage et Sage

DOMINANTES		TYPES-MAJEURS	SDAGE	SAGE (SOUS-TYPE)
SALINITÉ	RÉGIME HYDRIQUE			
EAU SALÉE SAUMÂTRE	Eau courante influencée par la marée	Côtières Estuariennes	1 Grands estuaires	Herbiers Récifs
	Eau stagnante		2 Baies et estuaires moyens plats 3 Marais et lagunes côtiers	Vasières Prés-salés Arrières - dunes Lagunes
	Pas influencée		4 Marais saumâtres aménagés	Marais salants Bassins aquacoles
EAU DOUCE	Eau courante inondée de manière :			
	✓ Permanente ✓ Saisonnière	Fluviales	5 Zones humides des cours d'eau et bordures boisées 6 Plaines humides mixtes liées aux cours d'eau	{ Ripisylve et fourrés alluviaux Herbacée (prairies inondables), Palustre (roselière, cariçaie) à végétation submergée
	✓ Permanente ✓ Saisonnière		7 Zones humides de montagnes, collines et plateaux	Marais d'altitude (source, combe à neige) Tourbières Zones humides de bas- fond en tête de bassin Zones humides boisées
EAU DOUCE	Eau stagnante :			
	✓ Temporaire ✓ Saisonnière ✓ Permanente	Lacustres (lac, étang)	8 Régions d'étangs 9 Bordures de lacs	Herbacée (roselières, prairies inondables) Palustres (roselières, cariçaies) Végétation submergée
	✓ Temporaire ✓ Saisonnière ✓ Permanente		10 Marais et landes humides de plaine	Landes humides Prairies tourbeuses
	✓ Permanente ✓ Saisonnière	Zones humides ponctuelles	11 (Zones humides liées à un plan d'eau ponctuel)	Petits lacs, mares, ...
	✓ Temporaire ✓ Saisonnière		12 (Prés-salés continentaux)	Prés-salés continentaux
	✓ Permanente ✓ Temporaire	Zones humides aménagées en eau douce	13 Marais agricoles aménagés 14 Zones humides aménagées diverses	Rizières, Prairies amendées, Peupleraies Réservoirs - barrages Carrières en eau Lagunages
			7 types majeurs	13 types / SDAGE 28 types / SAGE

A8.2. Classification des zones humides de Ramsar (Frazier, 1999)

	Code	Types Ramsar
Zones humides marines ou côtières	A	Eaux marines peu profondes et permanentes, dans la plupart des cas d'une profondeur inférieure à six mètres à marée basse; y compris baies marines et détroits.
	B	Lits marins aquatiques subtidaux; y compris lits de varech, herbiers marins, prairies marines tropicales.
	C	Récifs coralliens.
	D	Rivages marins rocheux; y compris îles rocheuses, falaises marines.
	E	Rivages de sable fin, grossier ou de galets; y compris bancs et langues de sable, îlots sableux, systèmes dunaires et dépressions intradunales humides.
	F	Eaux d'estuaires; eaux permanentes des estuaires et systèmes deltaïques estuariens.
	G	Vasières, bancs de sable ou de terre salée intertidaux.
	H	Marais intertidaux; y compris prés salés, schorres, marais salés levés, marais cotidaux saumâtres et d'eau douce.
	I	Zones humides boisées intertidales; y compris marécages à mangroves, marécages à palmiers nipa et forêts marécageuses cotidales d'eau douce.
	J	Lagunes côtières saumâtres/salées; y compris lagunes saumâtres à salées reliées à la mer par un chenal relativement étroit au moins.
Zones humides intérieures	K	Lagunes côtières d'eau douce; y compris lagunes deltaïques d'eau douce.
	Zka	Systèmes karstiques et autres systèmes hydrologiques souterrains, marins/côtiers.
	L	Deltas intérieurs permanents.
	M	Rivières/cours d'eau/ruisseaux permanents; y compris cascades.
	N	Rivières/cours d'eau/ruisseaux saisonniers/intermittents/irréguliers.
	O	Lacs d'eau douce permanents (plus de 8 hectares); y compris grands lacs de méandres.
	P	Lacs d'eau douce saisonniers/intermittents (plus de 8 hectares); y compris lacs des plaines d'inondation).
	Q	Lacs salés/saumâtres/alcalins permanents.
	R	Lacs salés et étendues/saumâtres/alcalins saisonniers/intermittents.
	Sp	Mares/marais salins/saumâtres/alcalins permanents.
	Ss	Mares/marais salins/saumâtres/alcalins saisonniers/intermittents.
	Tp	Mares/marais d'eau douce permanents; étangs (moins de 8 hectares), marais et marécages sur sols inorganiques; avec végétation émergente détrempée durant la majeure partie de la saison de croissance au moins.
	Ts	Mares/marais d'eau douce saisonniers/intermittents sur sols inorganiques; y compris fondrières, marmites torrentielles, prairies inondées de manière saisonnière, marais à laïches.
	U	Tourbières non boisées; y compris tourbières ouvertes ou couvertes de buissons, marécages, fagnes.
	Va	Zones humides alpines; y compris prairies alpines, eaux temporaires de la fonte des neiges.
	Vt	Zones humides de toundra; y compris mares de la toundra, eaux temporaires de la fonte des neiges.
	W	Zones humides dominées par des buissons; marécages à buissons, marécages d'eau douce dominés par des buissons, saulaies, aulnaies; sur sols inorganiques.
	Xf	Zones humides d'eau douce dominées par des arbres; y compris forêts marécageuses d'eau douce, forêts inondées de manière saisonnière, marais boisés; sur sols inorganiques.
	Xp	Tourbières boisées; forêts marécageuses sur tourbière.
Zones humides artificielles	Y	Sources d'eau douce; oasis.
	Zg	Zones humides géothermiques.
	Zkb	Systèmes karstiques et autres systèmes hydrologiques souterrains, continentaux.
	1	Étangs d'aquaculture (par ex. poissons, crevettes).
	2	Étangs; y compris étangs agricoles, étangs pour le bétail, petits réservoirs; (généralement moins de 8 hectares).
	3	Terres irriguées; y compris canaux d'irrigation et rizières.
	4	Terres agricoles inondées de manière saisonnière*.
	5	Sites d'exploitation du sel; marais salants, salines, etc.
	6	Zones de stockage de l'eau; réservoirs/barrages/retenues de barrages/retenues d'eau; (généralement plus de 8 hectares).
	7	Excavations; gravières/ballastières/glaisières; sablières, puits de mine.
	8	Sites de traitement des eaux usées; y compris champs d'épandage, étangs de sédimentation, bassins d'oxydation, etc.
	9	Canaux et fossés de drainage, rigoles.
	Zkc	Systèmes karstiques et autres systèmes hydrologiques souterrains, artificiels.

A8.3. Système hiérarchique de description des habitats de zones humides MedWet (Farinha et al., 1996)



A8.4. Comparaison des classifications de zones humides reconnus à l'échelle nationales et internationale (Agence de l'eau Loire-Bretagne, 2011)

Sdage agence de l'eau	MNHN	Guide technique inter-agence	Classification des zones humides et habitats en eaux profondes, USA	Classification des zones humides espagnoles	Classification des zones humides à la conférence RAMSAR
1. Grands estuaires	1. Grands estuaires		Marine subtidal (milieu subtidal marin)		Marin (LITTORAL ET MARIN)
2. Baies et estuaires moyens plats	2. Baies et estuaires moyens plats		Estuarine subtidal (milieu subtidal estuarien)	Deltas (LITTORAL)	Milieu estuarien (LITTORAL ET MARIN)
3. Marais et lagunes côtiers	3. Marais et lagunes côtiers	1. Vasières et prés salés, vases salées végétalisées 2. Lagunes et marais saumâtres	Marine intertidal (milieu intertidal marin) Estuarine intertidal (milieu intertidal Estuarien)	Lagunes littorales (LITTORAL)	Milieux lacustre et palustre (LITTORAL ET MARIN)
4. Marais saumâtres aménagés	4. Marais saumâtres aménagés	2. Lagunes et marais saumâtres		Étendues salées (BASSIN INTERIEUR)	
5. Bordures de cours d'eau	5. Bordures de cours d'eau	4. Forêts alluviales et ripisylves 3. Lits mineurs	Riverine lower perennial (berges à pente douce et débit lent)	Rivières et cours d'eau en région désertique (BASSIN INTERIEUR)	Milieu fluvial (BASSIN INTERIEUR)
6. Plaines alluviales	6. Plaines alluviales	5. Marais fluviaux et prairies humides	Riverine tidal (zone de plus hautes eaux) Riverine intermittent (milieu de rivière temporaire)	Lit majeur des rivières (BASSIN INTERIEUR)	
7. Zones humides de bas-fonds en tête de bassin		7. Zones humides d'altitude : lacs, marais, tourbières	Riverine upper perennial (berges à pente forte et débit élevé)	Sources et karst (BASSIN INTERIEUR) Marécages, marais humides (LITTORAL)	
8. Régions d'étangs	8. Régions d'étangs	9. Étangs, mares, bordures de lacs		Complexes endoréique (BASSIN INTERIEUR)	
9. Bordures de plans d'eau (lacs, étangs)	9. Bordures de plans d'eau (lacs, étangs)	9. Étangs, mares, bordures de lacs	Lacustrine limnetic (milieu Lacustre limnétique) Lacustrine littoral (milieu lacustre des berges)	Tourbières (BASSIN INTERIEUR) Lacs (BASSIN INTERIEUR)	Milieu lacustre (BASSIN INTERIEUR)
10. Marais et landes humides de plaine	10. Marais et landes humides de plaine 7. Zones humides de bas-fonds en tête de bassin	8. Zones humides de plaine : marais déconnectés, tourbières et landes humides	Palustrine (milieu palustre)		Milieu palustre (BASSIN INTERIEUR)
11. Zones humides ponctuelles	11. Zones humides ponctuelles	8. Zones humides de plaine : marais déconnectés, tourbières et landes humides			
12. Marais aménagés dans un but agricole	12. Marais aménagés dans un but agricole			Rizières (ARTIFICIELLES)	Agriculture (ZH ARTIFICIELLES)
13. Zones humides artificielles	13. Zones humides artificielles	10. Plans d'eau artificiels		Aquaculture (ARTIFICIELLES) Mine de gravier (ARTIFICIELLES) Techniques de restauration (ARTIFICIELLES) Marais salant (ARTIFICIELLES)	Aquaculture (ZH ARTIFICIELLES) Urbain et industriel (ZH ARTIFICIELLES) Marais salant (ZH ARTIFICIELLES)
					Zones humides géothermiques (BASSIN INTERIEUR)

Annexe 9 : Solutions analytiques et séparation des contributions

• Solutions analytiques

Il existe des solutions analytiques pour la création de classes et de références afin de statuer sur la qualité du soutien d'étiage des ZH (coefficient de tarissement, K, S, etc.)

Il s'agit de simuler le tarissement d'un volume élémentaire de tourbe (particulièrement l'acrotelme) initialement saturée en eau et de comparer ces résultats à ceux issus de remplissages sédimentaires correspondant à des textures minérales poreuses (ex : graviers, sables grossiers, sables moyens, sables fins, limons, argiles). Ces simulations font références aux travaux de Boussinesq (1877) qui considère que la forme de la courbe de décroissance des débits, en régime non influencé, est directement liée aux propriétés hydrodynamiques de l'aquifère (Lang, 2007). Pour le cas général en 1 dimension, l'équation prend la forme suivante :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{K}{\varphi} \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right)$$

K = perméabilité [L²/T] ; φ = coefficient d'emménagement [-] ;
 h = charge hydraulique [L] ; t = temps [T].

Boussinesq (1903) propose une loi de tarissement dont la formulation quadratique non linéaire est la suivante :

$$Q_t = \frac{Q_0}{(1 + \alpha t)^2}$$

Q_0 = débit initial au début de la phase de tarissement [L³/T] ; Q_t = débit au temps t [L³/T] ;
 α = coefficient de tarissement [T⁻¹] ; t = temps [T].

Lorsque l'on applique cette loi de tarissement pour des conditions hydrogéologiques simples, illustrées figure ci-après, les solutions analytiques qui en découlent sont les suivantes :

$$Q_0 = 0.862 * K * l * \frac{h^2}{L}$$

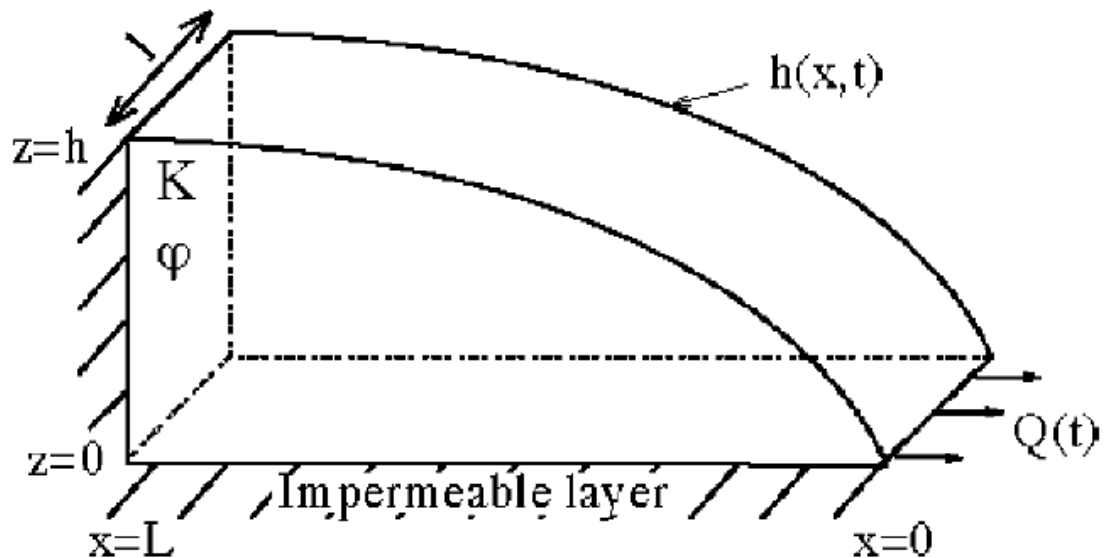
et

$$\alpha = \frac{1.115 * K * h}{\varphi * L^2}$$

l = largeur de l'aquifère [L] ; L = longueur de l'aquifère [L].

Ainsi, le coefficient de tarissement α et le débit initial Q_0 présentent l'avantage de tenir compte de la géométrie et des propriétés hydrodynamiques du milieu poreux contrairement à d'autres formulations déduites de l'analyse des hydrogrammes :

$$\alpha = \frac{\left(\sqrt{\frac{Q_0}{Q_t}} \right) - 1}{t}$$



Conditions hydrogéologiques d'application des solutions analytiques de Boussinesq (1903) (figure issue de Dewandel et al., 2002)

Une géométrie de type monocouche de longueur L et de largeur l ;

Des propriétés hydrodynamiques (K et φ) homogènes et isotropes sur la couche considérée ;

Des conditions aux limites qui supposent qu'il n'y ait pas d'alimentation (latérale ou recharge par les précipitations) et un drainage qui se fait latéralement (par exemple par un cours d'eau).

- **Séparation des contributions :**

- les méthodes de filtrage (Gustard et Demuth, 2008 ; Chapman et Maxwell, 1996 ; Eckhardt, 2005) permettant de filtrer la composante rapide des écoulements correspondant à du ruissellement, de la composante lente correspondant au drainage de la nappe ;
- les méthodes d'analyse de récession (Maillet, 1905 ; Boussinesq, 1904 ; Coutagne, 1948 ; Mangin, 1970 ; MRC, RORA, IRS) permettant de séparer de l'hydrogramme la part du débit correspondant à la décrue de la part correspondant au tarissement (coefficient de tarissement α).

