

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

Mise en œuvre sur les tourbières de Luitel (Isère - ONF) et de Frasne (Doubs – ComCom Frasne Drugeon/Smix Haut-Doubs Haute-Loue)

Méthodologie interdisciplinaire pour la quantification du rôle de soutien d'étiage des tourbières : instrumentation, mesure, échantillonnage, analyse

Premiers résultats : hydrologie, hydrogéologie, géophysique, pédologie, géochimie, modélisation

Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage : du site au bassin versant

Rapport final

Phase 2 (2017-2019)

Action n°57

UMR CNRS 5600 EVS Mines Saint-Etienne SPIN-PEG (Frédéric Paron, Yvan Pascoletti, Didier Graillot, Florence Dujardin)

Mines Alès LGEI (Guillaume Artigue, Sébastien Pinel, Huseyin Caldirak et Anne Johannet)

UMR CNRS 5023 ENTPE (Thierry Winiarski)

UMR CNRS 5600 ISTHME UJM (Hervé Cubizolle, Thomas Jolly, Pierre-Olivier Mazagol, Céline Sacca, Jérémie Riquier)

UJM UMR CNRS 6524 LMV (Véronique Lavastre, June Chevet)

ONF Aude (Christophe Cocula, Etienne Ebrard et Benoit Laroque)

Décembre 2019

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 2019

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

Mise en œuvre sur les tourbières de Luitel (38) et de Frasné (25)

Statut du rapport :

Version de travail	○
Version intermédiaire	○
Version finale (phase 2)	😊

Auteurs :

- UMR CNRS 5600 EVS Mines Saint-Etienne SPIN-PEG (Frédéric Paran, Yvan Pascoletti, Didier Graillot, Florence Dujardin)
- Mines Alès LGEI (Guillaume Artigue, Sébastien Pinel, Huseyin Caldirak, Anne Johannet)
- UMR CNRS 5023 ENTPE (Thierry Winiarski)
- UMR CNRS 5600 ISTHME UJM (Hervé Cubizolle, Thomas Jolly, Pierre-Olivier Mazagol, Céline Sacca, Jérémie Riquier)
- UJM UMR CNRS 6524 LMV (Véronique Lavastre, June Chevet)
- ONF Aude (Christophe Cocula, Etienne Ebrard, Benoit Laroque)

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

Partenaires (données, soutien logistique, collaboration, analyses) :

- Tourbière de Luitel : ONF Isère (Carole Desplanque), Université de Grenoble IGE (Jean-Paul Laurent) ;
- Tourbière de Frasné : Smix Haut-Doubs Haute-Loue (Geneviève Magnon, Louis Collin, Thibault Van-Rijswijk, Vincent Berthus), Communauté de communes Frasné Dugeon (Thibault Van-Rijswijk, Vincent Berthus), Laboratoire Chrono-environnement - UMR 6249 CNRS-UFC (Catherine Bertrand, Guillaume Bertrand, Marie-Laure Toussaint, Alexandre Lhosmot)
- Analyses géochimiques : Université de Nîmes - EA7352 Chrome (Patrick Verdoux)
- Analyses pédologiques : Université Lyon 2 - UMR 5600 - Plateforme OMEAA (Vincent Gaertner)

Financements complémentaires : aucun

Nb d'exemplaires	-	Nb de pages hors Annexes	189
Diffusion	Zabr / AE-RMC	Nb d'illustrations hors Annexes	125 figures et 21 tableaux
Nb de volumes	2	Nb d'Annexes	10

Mots clés : zones humides, têtes de bassins versants, soutien d'été, hydrologie, hydrogéologie, statistique, modélisation, géophysique, pédologie, géochimie

Table des matières synthétique

Fiche signalétique.....	I
Table des matières synthétique	III
Résumé	V
Acronymes, sigles et abréviations.....	VII
Préambule.....	IX
Remerciements	XI
INTRODUCTION	1
1. Objectifs, planification, résultats clefs de la phase 1.....	1
2. Organisation du rapport phase 2 (2017-2019)	9
PARTIE I – Présentation des sites d'étude et compléments bibliographiques.....	11
1. Présentation des sites d'étude	12
2. Compléments bibliographiques sur un paramètre clef du bilan hydrologique (ETP) et la modélisation par réseaux de neurones	35
PARTIE II – Volet Hydrologie	43
1. Partage de données et suivis existants.....	44
2. Instrumentation et mesures pour le suivi hydrologique.....	46
3. Analyse statistique des données hydrologiques	51
4. Modélisation du rôle de soutien d'étiage	75
PARTIE III – Volets géophysique, pédologie, géochimie	91
1. Volet géophysique.....	92
2. Volet pédologie.....	100
3. Volet géochimie	114
PARTIE IV – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage.....	127
1. Indicateurs à l'échelle du site	127
2. Indicateurs à l'échelle du bassin versant	131
CONCLUSION.....	139
1. Bilan du travail de la phase 2	139
2. Mise en œuvre et objectifs de la phase 3	153
Références Bibliographiques – Phase 2	155
Références Bibliographiques – Phase 1	165
Liste des figures et tableaux	177
Table des matières complète.....	183
Tables des matières des Annexes	189

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 » (ZHTB) 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 (2017-2019)* - mesures et instrumentation des sites, développement d'indicateurs du potentiel de soutien d'étiage des zones humides ; *Phase 3 (2019-2021)* - 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 (notamment 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 d'attention 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 prend en compte le contexte environnant la ZH (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 (Tourbière de Luitel-38 et de Tourbière de Frasné-25) mis en œuvre en phase 2. Ainsi, l'instrumentation et les campagnes de mesures ont permis d'acquérir et de compléter les connaissances pédologiques, géophysiques, hydrologiques, hydrogéologiques et géochimiques. La quantification du soutien d'étiage nécessite en effet de : 1) d'analyser et de « 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 de la zone humide et ses propriétés hydrodynamiques (ex : perméabilité, porosité) ; 3) connaître l'origine, les voies de transfert et de mélange des eaux. Les données et connaissances acquises ont été utilisées pour modéliser le comportement de stockage/déstockage des tourbières sur un ou plusieurs cycles hydrologiques (modèles réservoir et réseaux de neurones), déterminer les paramètres et variables clefs et d'identifier une première série d'indicateurs de suivi.

En phase 3 du projet, ces indicateurs seront testés sur de nouveaux sites. Ces indicateurs seront développés à l'échelle du site et à l'échelle du bassin versant. 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).

À la suite du projet, la méthodologie interdisciplinaire proposée pourrait être complétée par d'autres indicateurs de type paysagers et écologiques. La prise en compte d'aspects sociaux (ex : perceptions, enjeux, besoins) pourrait 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

BP : Before present

BRGM : Bureau de recherche géologique et minière

BV : Bassin versant

CAEi : Conseil aménagement espace ingénierie

Cen : Conservatoires d'espaces naturels

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

Corine (land cover) : Inventaire biophysique de l'occupation des terres

CPCS : Commission de pédologie et de cartographie des sols

CTD : Conductivity temperature depth

DCE : Directive cadre européenne sur l'eau

DEA : Denitrification enzyme activity

Deb : Direction de l'eau et de la biodiversité

EMA : École des mines d'Alès

EMSE : École des mines de Saint-Etienne

ENS : Espaces naturels sensibles

ENTPE : École nationale des travaux publics de l'État

EPA : Environmental protection agency)

EPL : Établissement public Loire

ERC (principe) : Éviter, Réduire, Compenser

ERT : Electric Resistivity Tomography

Eso : Eau souterraine

Esu : Eau de surface

ET : Évapotranspiration

ETP : Évapotranspiration potentielle

ETR : Évapotranspiration réelle

EU : European Union

Eunis : European nature information system

EVS : Environnement ville société

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 : Geographic Information System

Gis : Groupement d'intérêt scientifique

GISP : Greenland ice sheet precipitation

GNIP : Réseau mondial de mesure des isotopes dans les précipitations

GPR : Ground Penetrating Radar

GPS : Global positioning system

GWDTE : Groundwater dependent terrestrial ecosystems

GWI : débit entrant souterrain

GWO : débit sortant souterrain

Habref : Référentiel national des habitats

HDPE : Polyéthylène à haute densité

HGM : Hydrogeomorphic approach

IAEA : Agence internationale de l'énergie atomique

IBK : Indice Beven-Kirby

IDPR : Indice de persistance des réseaux

IGE : Institut des géosciences de l'environnement

IGN : Institut géographique national

INPN : Inventaire national du patrimoine naturel

Isba : Interaction sol-biosphère-atmosphère

Isthme : Image société territoire homme mémoire environnement

KTH : Kultureller trockenhorizont

Lehna : Laboratoire d'écologie des hydrosystèmes naturels et anthropisés.

LGEI : Laboratoire de génie de l'environnement industriel

Lidar : Light detection and ranging

LMV : Laboratoire magma et volcans

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
 MHz : Mégahertz
 MNHN : Museum National d'Histoire Naturelle
 MNT : Modèle numérique de terrain
 MO : Matière organique
 MTES : Ministère de la transition écologique et solidaire
 MWL : Meteoric water line
 NRCS : Natural resources conservation service
 NSE : Nash-sutcliffe efficiency
 Omeaa : Observation et mesure des environnements actuels et anciens
 ONF : Office national des forêts
 Ospar (Convention) : Protection du milieu marin de l'Atlantique du nord-est
 P : précipitations
 Paf : perte au feu
 PEE (modèle) : Zones humides potentielles, effectives, efficaces
 PEG : Procédés pour l'environnement et les géoressources
 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
 PVC : Polychlorure de vinyle
 QMNA : Moyenne des débits journaliers du mois d'étiage
 REV : Revue de projets scientifiques et techniques au service de la gestion intégrée du bassin de la Loire et ses affluents
 Rhomeo : Observatoire de l'évolution du bon état des zones humides sur le bassin Rhône Méditerranée
 RMC : Rhône Méditerranée et Corse
 RN : Réserve naturelle
 RNN : Réserve naturelle nationale
 RNR : Réserve naturelle régionale
 RU : réserve utile
 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
 SIE : Système d'information sur l'eau
 SIG : Système d'information géographique
 SLAP : Standard light Antarctic
 SMOW : Standard Mean Ocean Water
 SNO : Service national d'observation
 SNO : Service national d'observation
 SNOT : Service national d'observation des tourbières
 SNPN : Société nationale de Protection de la Nature
 Spin : Science pour les processus industriels et naturels
 SPN : Service du patrimoine naturel
 SWI : débit entrant de surface
 SWO : débit sortant de surface
 UFC : Université de Franche Comté
 UHC : Unité hydraulique cohérente
 UICN : Union internationale pour la conservation de la nature
 UJM : Université Jean Monnet
 UK : United Kingdom
 UMR : Unité mixte de recherche
 US : United States
 USA : United States of America
 VCN : Débits d'étiage annuels au pas de temps journalier
 WetMec : Wetland water supply mechanisms
 WMMWL : West mediterranean meteoric water line
 Zabre : Zone atelier bassin du Rhône
 ZH : Zones humides
 ZHTB : Zones humides de têtes de bassins versants
 ZNIEFF : Zone naturelle d'intérêt écologique faunistique et floristique

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 et du travail engagé sur les sites de Luitel (Isère) et Frasné (Doubs) nous avons pris la mesure de l'objet zones humides dans sa diversité et sa complexité en traitant la question des bilans hydrologiques. L'analyse de la littérature 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.

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. La littérature scientifique montre qu'il est nécessaire de nuancer et de préciser selon le type de zones humides. Le travail réalisé, tant sur l'analyse de la bibliographie que sur le terrain nous permet d'ores et déjà de mettre en avant les points suivants :

- les zones humides sont structurées en mosaïque d'habitats et leur fonctions hydrologiques semblent compartimentées en plusieurs « réservoirs » aux propriétés différentes dans l'espace et dans le temps.
- le stockage et restitution d'eau à l'échelle d'une zone humide semblent globalement faible voire très faible. Une approche à l'échelle de sous-bassins versants (réseaux de zones humides) pourrait apporter un éclairage nouveau.
- les interactions des zones humides avec l'hydrosystème les environnant (bassin versant, eaux souterraines, cours d'eau, climat) sont prépondérantes pour comprendre leur fonctionnement.

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)

Remerciements

Nous tenons à remercions toutes les personnes qui de près ou de loin s'intéressent à différents titres au projet ZHTB, qu'il s'agisse d'un pur intérêt personnel ou d'une collaboration étroite dans la conduite du projet. L'ensemble de ces personnes est listé en annexe 5 : membres du comité de pilotage, gestionnaires et personnes liées à un, ou des sites de zones humides prospectés lors de la phase 1.

Dans le cadre des travaux réalisés sur les 2 sites d'études principaux du projet ZHTB, tourbière de Luitel et tourbière de Frasne, nous remercions chaleureusement toutes les personnes qui localement nous ont apporté leur aide lors de nos missions que ce soit pour le partage de données, de bibliographie, de connaissance, leurs conseils, l'aide au repérage sur le terrain... Grâce à elle, nous avons pu nous approprier plus rapidement ces deux sites de zones humides et gagner un temps précieux.

Pour la tourbière de Luitel, nos remerciements vont tout particulièrement à Carole Desplanque (Conservatrice de la RN du Luitel – ONF) et à Jean-Paul Laurent (IGE – Université de Grenoble).

Pour la tourbière de Frasne, nos remerciement s'adressent en particulier : 1) aux agents de de la Communauté de Communes Frasne Drugeon et du Smix Haut-Doubs Haute-Loue : Geneviève Magnon, Louis Collin, Thibault Van Rijswijk, Vincent Bertus, Michel Sauret ; 2) aux scientifiques de l'UMR Chrono Environnement : Catherine Bertrand, Marie-Laure Toussaint, Guillaume Bertrand.

De plus, nous souhaitons saluer les personnes qui nous ont grandement facilité la vie lors de l'organisation et de la conduite des campagnes de géophysique : 1) Philippe Alpy (Marie de Frasne) pour le déneigement et l'autorisation de circulation sur la route de la réserve de la tourbière de Frasne ; 2) Thierry et Edith Salomon (Gîte de la Sauge à Mignovillard) pour les facilités de réservation.

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, planification, résultats clefs de la phase 1

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. Les zones humides sont des objets emblématiques pour la biodiversité recoupant de nombreux enjeux. Ce sont des entités complexes faisant l'objet de nombreux travaux interdisciplinaires.

1.1. Problématique, finalités et objectifs

Il existe un fort besoin en termes de connaissance du fonctionnement de la triple interface zones humides/eaux souterraines/eaux de surface, il s'agit ainsi de :

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

Les résultats du projet seront utiles dans le cadre de la DCE pour l'évaluation du bon état des masses d'eau, notamment souterraines le texte exigeant que leur état quantitatif ne remette pas en cause leur fonction d'alimentation des milieux aquatiques et terrestres supports de biodiversité qui leur seraient liés, le dimensionnement et le suivi d'opérations de restauration ou de préservation (ex : identification/typologie, risque/dégradation, surveillance, indicateurs pluridisciplinaires). D'un point de vue opérationnel, il y a des fortes attentes en termes de :

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

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 :

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

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

Quel est le rôle réel des zones humides (ex : tourbières) dans le stockage de l'eau et 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 pendant laquelle leur soutien par les précipitations est le plus faible (étiage estival et pas hivernal).

Les trois grands objectifs du projet sont les suivants :

- 1) quantifier les capacités, le potentiel, de stockage et de transfert d'eau des zones humides ;
- 2) faire la part et quantifier les origines des apports d'eau aux cours d'eau d'amont bassins 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.

La réalisation de ces objectifs tiendra compte :

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

1.2. Phases de l'étude

Le projet ZHTB est planifié en 3 phases dont les sous-objectifs principaux sont les suivants :

- 1) phase 1 (réalisée en 2016-2017) - État de l'art – Choix des sites – Construction de l'approche méthodologique – plan d'action (instrumentation, mesures, échantillonnages)
- 2) phase 2 (toujours en cours 2017-2018) - Mesures et instrumentation sur 2 sites test – Modélisation – Réflexion sur des indicateurs de potentiel de soutien d'étiage – Réflexion sur le changement d'échelle ;
- 3) phase 3 (2019-2021) - Analyse et interprétation des données – Changement d'échelle – Test des indicateurs – Synthèse et 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 (gestionnaires) et de documents de valorisation selon les destinataires (grand public, élus...).

1.3. Phase 1 : Sélection des compétences et des sites, état de l'art

1.3.1. Présentation synthétique de la phase 1

Les tâches effectuées 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).

1.3.2. Résultats et points clefs de la phase 1

Cette phase a fait d'un rapport⁵. Les points clefs de ce rapport sont présentés ci-dessous :

• Choix des sites

Environ 25 gestionnaires du bassin versant RMC ont été contactés pour décrire les sites dont ils ont la charge à l'aide de critères prédéterminés. Au total, une trentaine des sites de zones humides a été évaluée selon les critères de sélection. Ensuite, 5 sites ont été retenus pour des visites de terrain, puis hiérarchisés à leurs tours. Au final, l'ordre de classement des sites du plus pertinent au moins pertinent est le suivant :

- 1) Tourbière de Luitel (Isère) ;
- 2) Tourbière de Frasne (Doubs) ;
- 3) Tourbière de Praubert (Haute-Savoie) ;
- 4) Marais de Vaux (Ain) ;
- 5) Tourbière de Montselgues (Ardèche).

Dans un premier temps de la phase 2, l'instrumentation et l'investigation ont été réalisées sur les sites de Luitel et de Frasne.

• Apports du travail bibliographique (points clefs)

La synthèse de l'analyse bibliographique réalisée en phase 1 a permis de déterminer de manière qualitative les effets positifs ou négatifs des zones humides tourbeuses (en relation avec une nappe ou un cours d'eau), leur rôle hydrologique (stockage et restitution). Le Tableau 1 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 »)
- 3) des facteurs qui dépendent des particularités de la zone humide (par exemple minerotrophe/ombrotrophe) qui peuvent varier d'un site à l'autre (« facteurs conditionnels »).

Le Tableau 2 présente de manière synthétique les points clefs pour l'étude du potentiel de soutien d'étiage des zones humides de têtes de bassins versants, ce qui est névralgique car conditionnant les écoulements de surface à l'aval. Il met aussi en avant les points de vigilance et les points à développer lors de la phase 2 du projet et de la phase 3 à venir.

Les sites qui ont été sélectionnés pour la réalisation de la phase 2 du projet ZHTB sont des tourbières de têtes de bassins versants. Pour établir des bilans hydrologiques de ces zones humides dans l'objectif de quantifier le soutien d'étiage il est important de bien connaître les types de zones humides étudiées et 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

⁵ Paran, 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.

Introduction

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 à construire en phase 3 sur la base des paramètres décrits dans le Tableau 1 et des points clefs du Tableau 2.

	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 pas 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 1 : 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 clefs décrivant :

- facteur permanent : commun à toutes les zones humides tourbeuses en tout temps ;
- facteur transitoire : lié à des variations interannuelles ou pluriannuelles ;
- facteur conditionnel : lié aux caractéristiques spécifiques d'une zone humide.

[S : porosité efficace ; K : perméabilité ; ETP : Évapotranspiration]

	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'emménagement, 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 2 : Synthèse des travaux de la phase 1 : points clefs et points de vigilance

Introduction

En résumé les enseignements importants de la phase 1 du projet ZHTB sont les suivants :

- la typologie des zones humides repose sur de très nombreux types (dont fonctionnels). Les zones humides présentent la plupart du temps une structuration en mosaïque correspondant à des types différents. En conséquence, la fonction hydrologique des ZH est compartimentée en plusieurs « réservoirs » aux propriétés différentes dans l'espace et dans le temps.
- le stockage et restitution d'eau par les zones humides semblent globalement faible voire très faible. Le « rôle d'éponge » dont donc être mis en question (soutien d'étiage, ralentissement des crues). En conséquence, si le travail à l'échelle du site (zone humide) reste pertinent, il convient de développer une approche à l'échelle de sous-bassins versants (réseaux de zone humides).
- les interactions des zones humides avec l'hydrosystème les environnant (bassin versant, eaux souterraines, cours d'eau, climat) est prépondérant pour comprendre leur fonctionnement. En conséquence, réaliser le bilan hydrologique d'une zone humide est une affaire complexe qui nécessite l'intégration de la zone humide dans son hydrosystème.

1.4. Phase 2 : Mesures et instrumentation

1.4.1. Présentation synthétique de la phase 2

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.

1.4.2. Points clefs pour la mise en œuvre de la phase 2

La phase 1 du projet a donc conduit à la sélection de 2 sites d'études principaux, la tourbière de Luitel (Isère, France) et la tourbière de Frasné (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 et à la validation d'une méthodologie interdisciplinaire (Figure 1), de plans d'instrumentation et d'acquisition de données sur les 2 sites d'étude principaux.

Ainsi, l'instrumentation et les campagnes de mesures prévues 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 en 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 est 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 ont été utilisées pour modéliser le comportement de stockage / restitution d'eau des tourbières sur un ou plusieurs cycles hydrologiques et valider ainsi les paramètres

et variables clefs identifiés en phase 1 (Tableau 1 et Tableau 2) ; ceci en vue d'élaborer des indicateurs pertinents de soutien d'étiage qui seront construits et testés en phase 3.

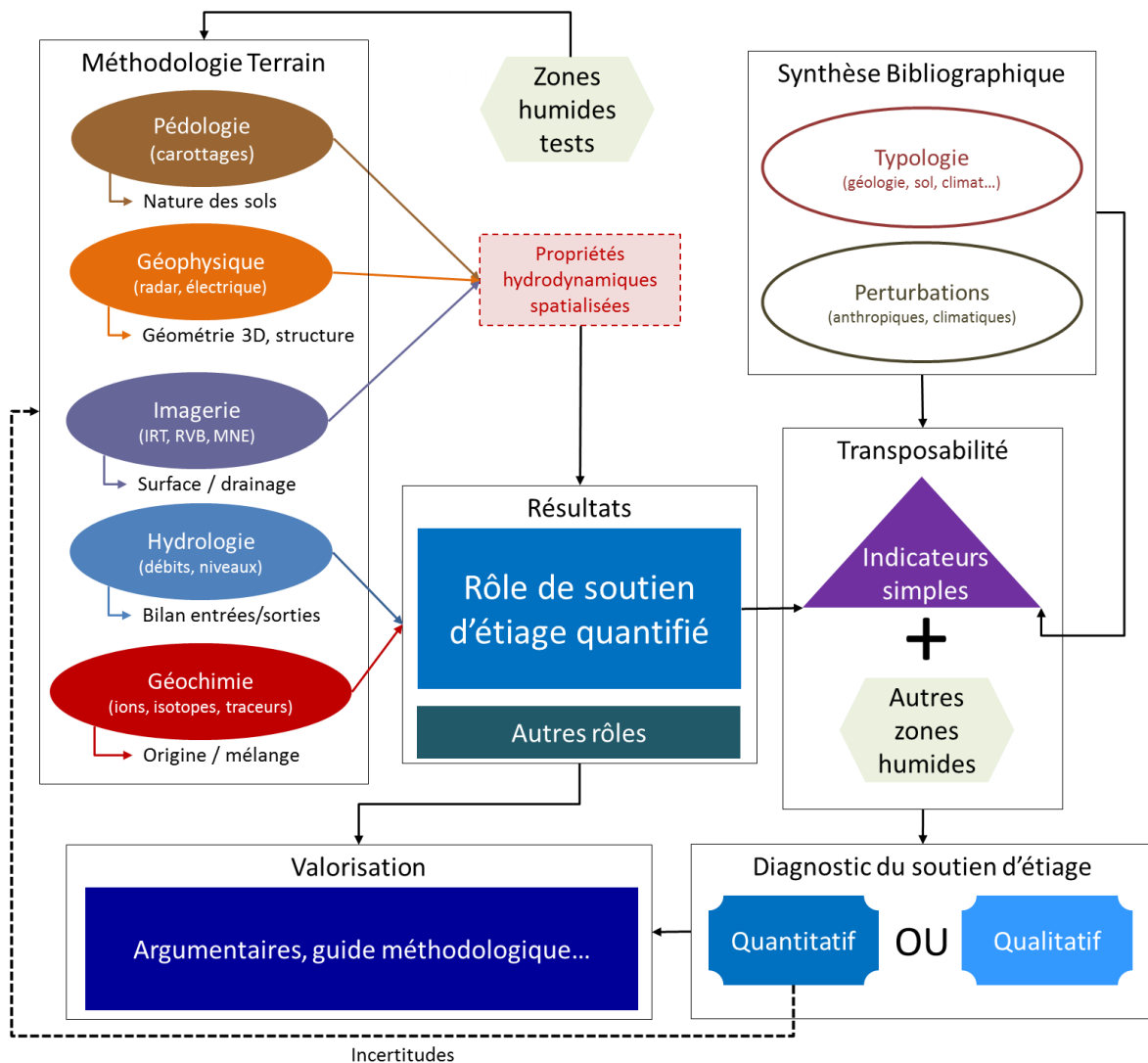


Figure 1 : Articulation interdisciplinaire du projet ZHTB (Phase 1, 2 et 3)

Les résultats attendus pour la phase 2 sont les suivants :

- Première analyse des données existantes (Luitel et Frasne) : écologie (végétation), géophysique, géochimie, géomorphologie, pédologie, hydrologie, météorologie...
- Première analyse des données hydrologiques acquises (Luitel et Frasne) :
 - chronique de débits entrant et sortant de la zone humide
 - chronique de niveaux d'eau souterraine
 - chronique météo (pluie, ETP)
 - premiers bilans hydrologiques (modélisation stockage/déstockage sur Luitel uniquement)
- Première analyse des données physico-chimiques acquises (Luitel) :
 - chroniques T °C et conductivités (eaux souterraines, cours d'eau)
 - détermination des contrastes géochimiques
 - estimation des mélanges d'eau si les contrastes sont suffisants (détermination des apports diffus) / amélioration des bilans hydrologiques

Introduction

- Première caractérisation de la géométrie 3D du Luitel :
 - analyse des profils du radar géophysique (recherche des interfaces)
 - analyse des carottes de tourbe (structure pédologique et propriétés hydrodynamiques)
 - validation et calibration des profils radar avec les données pédologiques et détermination d'unités au fonctionnement hydrologique homogène par croisement des données radar, pédologiques et écologiques (végétation)
 - interpolation croisées des profils radar validés et calibrés / géométrie 3D de la zone humide / amélioration du bilan hydrologique
- Précision des bassins-versants topographiques et des aires d'alimentation souterraines de la tourbière de Frasne à partir des données radar, hydrologiques, géochimiques, pédologiques et écologiques (végétation)
- Prédétermination d'indicateurs de soutien d'étiage (à tester en phase 3)

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

Les objectifs de la phase 3 sont les suivants :

- Objectif 1 (2019 et années suivantes) : suite de l'acquisition d'information et de données (hydrologiques, géochimiques, pédologiques, géophysiques) pour couvrir au moins 1 cycle hydrologique complet supplémentaire.
- Objectif 2 (2019 et années suivantes) : analyse et synthèse des données acquises en phases 2 et 3.
- Objectifs 3 (2019) : poursuite des travaux de modélisation / modèles réservoirs (commencés en phase 2) et réseaux de neurones
- Objectif 4 (2020) : élaboration d'indicateurs synthétiques permettant d'évaluer le soutien d'étiage des zones humides. Ce travail pourrait être conduit à 2 échelles : zone humide et bassin-versant
- Objectif 5 (2020) : test et transférabilité des indicateurs (nouveaux sites issues de la prospection réalisée en phase 1, zones humides de l'Aude (lien accord cadre AERMC/ONF).
- Objectif 6 (2021) : restitution et valorisation
 - sur le plan scientifique (en fin de projet) : rapport, publication, communication (SNO tourbières,...). En fin de projet, il est prévu une restitution globale des résultats. Celle-ci contiendra l'analyse et l'interprétation de l'ensemble des données acquises lors du projet. Une telle synthèse sera complétée par des préconisations en matière de gestion des zones humides et des propositions de valorisation.
 - sur le plan opérationnel (en fin de projet) : fiches techniques indicateurs de soutien d'étiage
 - sur le plan opérationnel (à la suite du projet) : guide (technique) destiné aux gestionnaires pour qu'ils puissent évaluer le soutien d'étiage des zones humides à l'aide d'indicateurs synthétiques.

2. Organisation du rapport phase 2 (2017-2019)

Si la phase 1 du projet ZHTB a été axée essentiellement sur la bibliographique, la recherche de site et le développement méthodologique, la phase 2 quant à elle consiste en une phase de mise en œuvre et d'acquisition de données sur les 2 sites sélectionnés (Luitel et Frasné).

La partie I de ce rapport propose une présentation rapide de chacun des sites, suivie par des compléments bibliographiques sur des aspects non traités en phase 1. Il s'agit notamment de compléments sur l'ETP et les réseaux de neurones.

Les 2 parties suivantes présentent les tâches mises en œuvre afin de déterminer la capacité de stockage (volume, origine des eaux stockées) et de restitution (vitesse, origine des eaux restituées) d'eau des zones humides étudiées. Pour rappel, les tâches mises en œuvre sur chaque site visent à :

- établir son bilan hydrologique (Suivis hydrologique, hydrogéologique et météorologique...);
- caractériser sa géométrie (Carottes pédologiques, géophysique, topographie, types de végétations...);
- déterminer ses propriétés hydrodynamiques (Carottes pédologiques);
- déterminer l'origine de l'eau et sa partition (Géochimie).

La partie II présente le travail effectué sur le volet hydrologique. Après une présentation rapide de l'instrumentation (complémentaire à l'existant) mise en place sur les sites, cette partie propose une première analyse statistique des données hydrologiques et les premiers essais de modélisation du soutien d'étiage. Ces travaux ont permis une première caractérisation du fonctionnement hydrologique des 2 sites et une première quantification du soutien d'étiage sur la tourbière du Luitel.

La partie III présente le travail effectué pour préciser le bilan hydrologique. L'articulation des volets géophysique et pédologique a permis de mieux connaître la géométrie, la structure et les propriétés hydrodynamiques de la tourbière du Luitel. Sur ce site, le volet géochimie nous apporte un meilleur éclairage sur l'origine des eaux stockées et restituées par la tourbière.

La partie IV propose un premier bilan sur des indicateurs du potentiel de soutien d'étiage des tourbières fondé sur les points clefs mis en avant dans la phase 1 et les travaux en cours pour chaque volet de la phase 2. Une première approche porte sur des indicateurs à l'échelle du site. Une seconde approche vise à proposer des indicateurs à l'échelle de bassins-versant ou de sous-bassins versants.

La conclusion tire le bilan de la phase 2 du projet ZHTB et présente les perspectives pour la phase 3.

PARTIE I

—

Présentation des sites d'étude et compléments bibliographiques

Contenu de la Partie I

1. Présentation des sites d'étude		p12
1.1. Tourbière de Luitel	p13	
1.2. Tourbière de Frasn	p28	
2. Compléments bibliographiques		p35
2.1. Point sur l'ETP	p35	
2.2. Modélisation par Réseaux de neurones	p37	

1. Présentation des sites d'étude

L'histoire des 2 sites de zones humides principaux sélectionnés dans le cadre du projet ZHTB, les tourbières de Luitel et de Frasnne, même s'ils ne reposent pas sur le même substratum géologique, respectivement de type métamorphique et carbonatée, commence à la même période : la fin de la dernière glaciation et la fonte des glaciers.

Sur le site de Frasnne, la géomorphologie héritée est d'origine glaciaire (moraine, buttes et dépressions). La formation de tourbe commence il y a 7 000/8 000 ans lorsque le climat se réchauffe. Plus précisément, la datation d'une carotte de tourbe à Frasnne fait remonter l'apparition de la tourbe à 7400 BP (E. Gauthier non publié).

Au Luitel, la disparition des glaciers semble marquer le point de départ de la formation du complexe. La chronologie simplifiée de la formation du complexe tourbeux du Luitel est présentée Figure 2. Le relief hérité de l'action des glaciers est découvert suite à leur fonte. Ils laissent place à un paysage de moraines et de cuvettes, vraisemblablement tapissées de farines glaciaires imperméables. Les cuvettes, au départ remplies d'eau, sont peu à peu couvertes de radeaux flottants jusqu'à leur comblement complet pour constituer des réservoirs organiques (tourbes). Aujourd'hui, au Luitel on peut encore observer différents stades de comblement et de structuration du complexe tourbeux. De gauche à droite sur la Figure 2 (schéma du bas), on observe dans les 3 cuvettes originelles : 1) le lac Luitel avec ces radeaux de tourbes flottants ; 2) « l'œil de la tourbière » indiquant un lac récemment comblé et 3) la tourbière bombée boisée marquant le stade de développement le plus avancé.

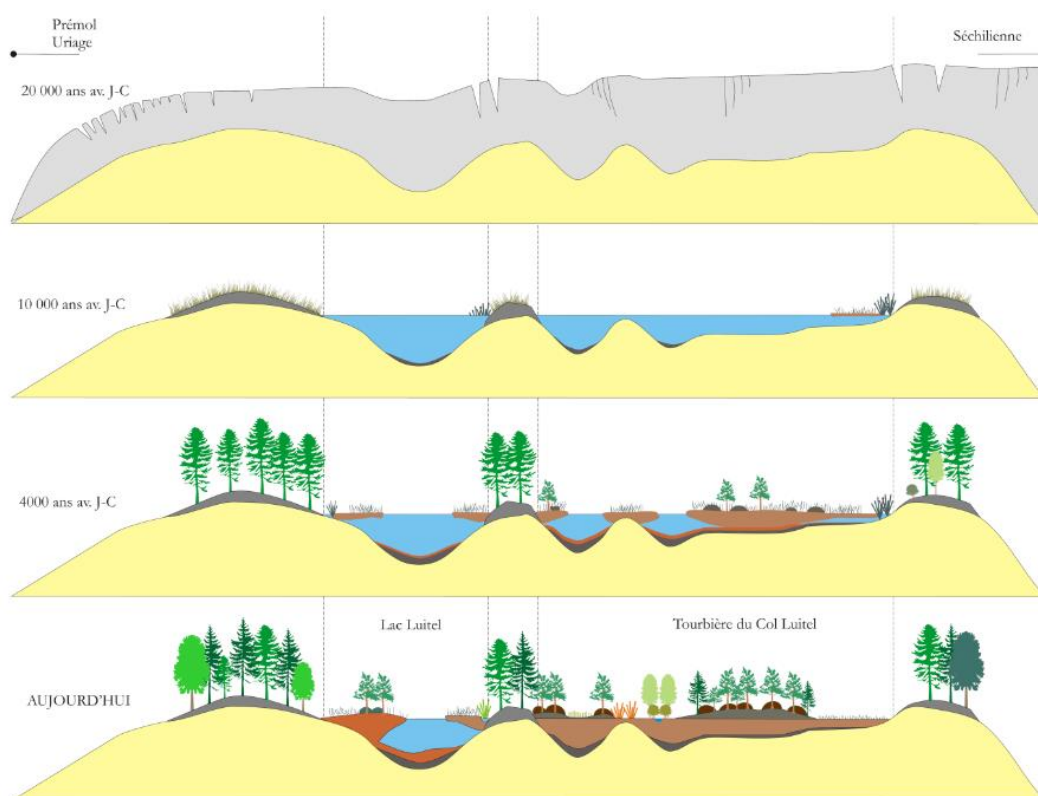


Figure 2 : Histoire simplifiée de la formation du complexe tourbeux du Luitel depuis la fonte des glaciers (Desplanque, 2011)

1.1. Tourbière de Luitel

1.1.1. Situation géographique et typologie

1.1.1.1. Situation géographique

La tourbière de Luitel fait partie de la réserve naturelle du Luitel (Figure 3), située sur la commune de Séchilienne, à 25 km au Sud-Est de l'agglomération grenobloise dans le département de l'Isère, région Auvergne-Rhône-Alpes. La réserve est bordée par une route départementale menant à la station de ski de Chamrousse située 3.2 km au Nord-Est. Cette réserve naturelle s'étend sur 17 hectares. La réserve se compose de deux ensembles tourbeux, au Nord le Lac Luitel, et au Sud la tourbière du Col du Luitel. Ces deux ensembles ont, *a priori*, un fonctionnement hydrologique indépendant. La tourbière est également située en tête de bassin versant de la Romanche. Le site d'étude est bordé à l'Ouest par le versant du Pic de l'Oeilley, et à l'Est par le versant sous le plateau de l'Arselle. La tourbière du Col du Luitel s'étend sur une surface de 100 000 m² et possède un bassin versant propre de 625 929 m² (Figure 4). Il est à noter que le flanc ouest s'écoule peu, voire pas, dans la tourbière, la route construite jouant le rôle d'une digue peu perméable.

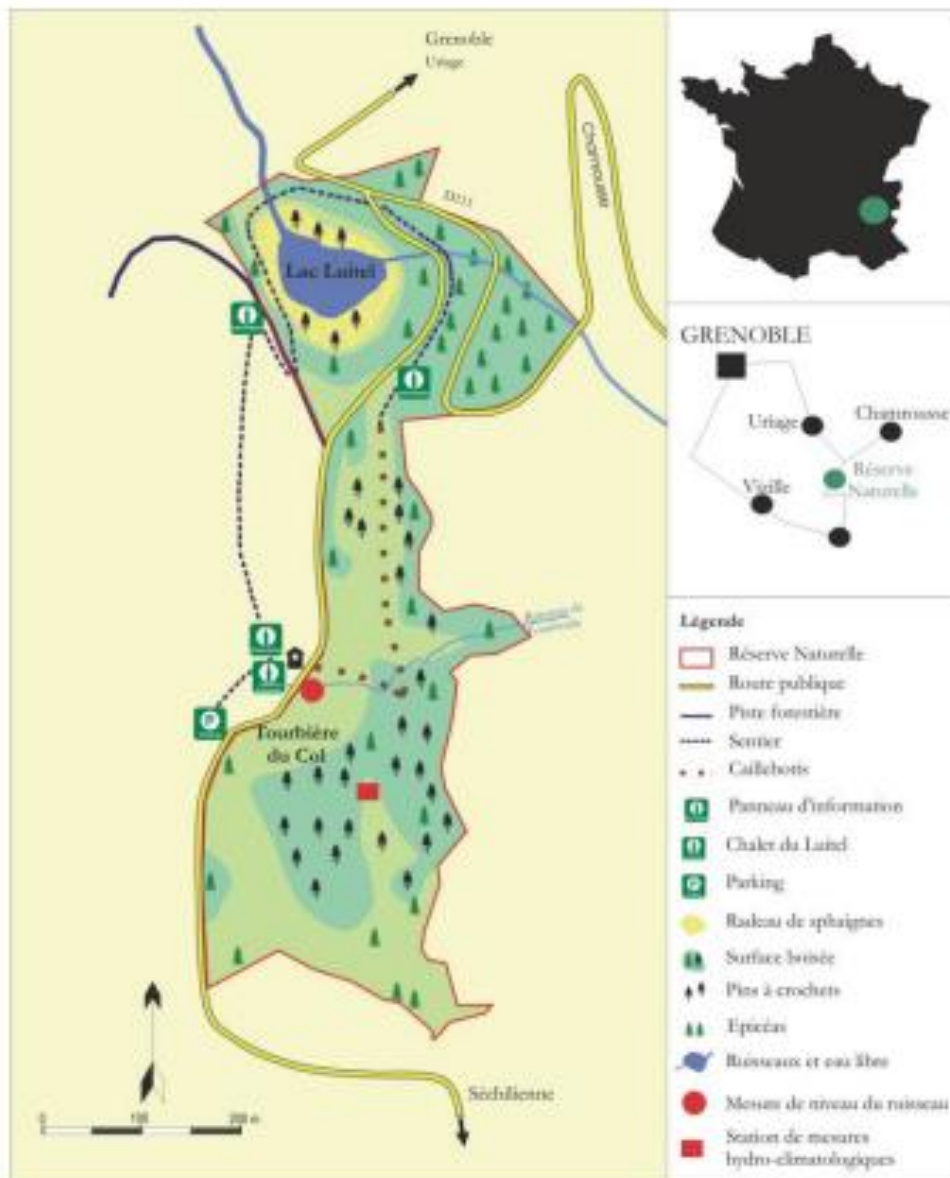


Figure 3 : Localisation et emprise de la réserve naturelle du Luitel (Desplanque, 2011)

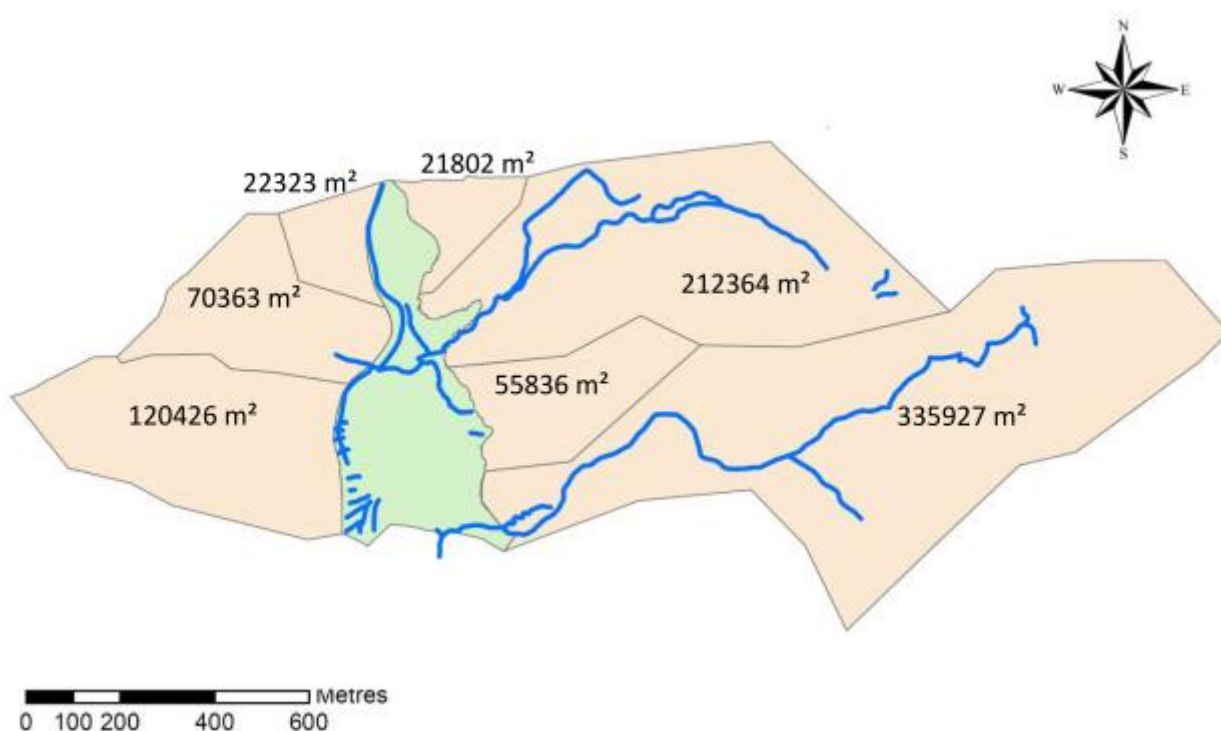


Figure 4 : La tourbière du col et les sous-bassins versants (Pascoletti, 2018)

1.1.1.2. Typologie

La tourbière du Col du Luitel est définie comme une tourbière limnogène ombrotrophe bombée et partiellement minérotrophe. Pour ce qui est de son origine (Figure 2), la tourbière du Col du Luitel comme indiquée est limnogène, c'est-à-dire issue d'une cuvette lacustre creusée par un glacier. Ainsi, il y a 20 000 ans, la région était occupée par les glaciers dits würmiens (la glaciation de Würm correspond à la dernière période de glaciation dans les Alpes au cours du Pléistocène). Ces glaciers ont façonné le relief au niveau du Luitel. Aux alentours de 10 000 av. JC., le réchauffement du climat fait progressivement fondre ces glaciers puis les surcreusements du relief se remplissent d'eau, formant des lacs. Ces lacs sont ensuite colonisés par la végétation. Vers 4000 av. JC., des sphaignes se développent et forment les radeaux flottants qui progressent vers le centre du lac. La matière organique mal décomposée s'accumule au fond du lac et forme la tourbe. Enfin, de nos jours, la tourbière du col a atteint son stade final, elle est dite « bombée ». La tourbe a continué de croître après avoir comblé la cuvette lacustre et provoque l'élévation du niveau du sol.

Concernant sa source dominante d'apport en eau, la tourbière est désignée comme ombrotrophe et partiellement minérotrophe. Les secteurs ombrotrophes se situent au Nord et au centre de la partie Sud de la tourbière. Ces secteurs ne sont approvisionnés que par les précipitations. Celles-ci n'étant que très peu minéralisées, les milieux qu'elles alimentent sont oligotrophes. Une végétation caractéristique telle que les sphaignes se développe ainsi dans ces types de milieux en les acidifiant. Dans les secteurs minérotrophes, l'alimentation hydrique provient des ruisseaux dont l'eau est légèrement minéralisée. Sur la tourbière du Col du Luitel, ce sont ainsi les zones environnant les deux cours d'eau, Fontfroide et la source Pezanti, qui sont qualifiées de minérotrophes. L'ombrotrophie se différencie de la minérotrophie par des conductivités électriques plus faibles. Ainsi, une carte des conductivités (Figure 5) résume la répartition entre zones minérotrophes et zones ombrotrophes de la tourbière.

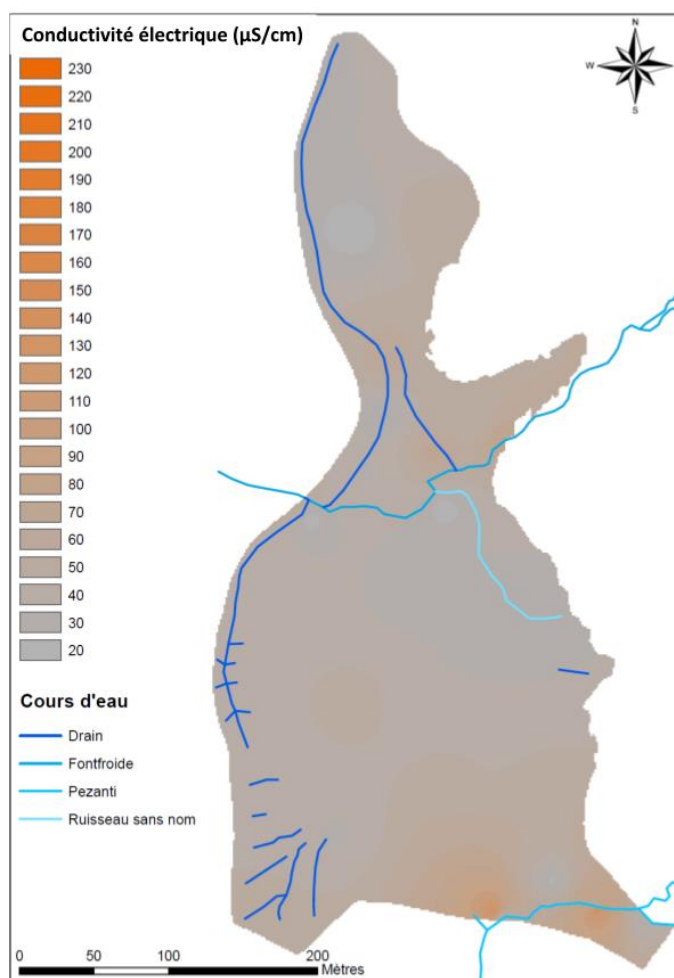


Figure 5 : Carte des conductivités électriques (Pascoletti, 2018)

1.1.2. Géologie

1.1.2.1. Généralités

La tourbière du Col du Luitel se situe au cœur de la chaîne de Belledonne, massif cristallin externe des Alpes. Cette chaîne est parcourue par un réseau de failles longues de plusieurs kilomètres. La principale de ces failles passe à côté du Lac Luitel, il s'agit de « l'accident médian de Belledonne ». Cet accident forme une cassure longitudinale qui sépare le rameau⁶ externe de Belledonne (versant Ouest) et le rameau interne (versant Est).

Le versant Ouest (rameau externe) constitue un ensemble monotone au relief peu élevé. Il est essentiellement formé de micaschistes. Les micaschistes sont des roches métamorphiques cristallophylliennes surtout caractérisées par la présence de cristaux de micas. Ces roches, feuilletées et peu cohérentes, s'érodent facilement. Le versant Est (rameau interne) constitue l'essentiel du massif. Sa composition est plus variée, elle comprend des gneiss, des amphibolites et des gabbros. Les gneiss sont également des roches métamorphiques cristallophylliennes mais très compétentes et donc plus résistantes à l'érosion. Les amphibolites sont aussi des roches métamorphiques. Les gabbros sont des roches intrusives qui se sont constituées par la cristallisation du magma.

Les roches décrites ci-dessus sont recouvertes d'une moraine formée par le glacier Würmien de la Romanche. Une moraine désigne un amas de débris rocheux véhiculés par un glacier. Quant aux alluvions fluviales modernes notées Fz sur la carte géologique (Figure 6), elles correspondent à

⁶ Massifs qui se détachent d'une chaîne de montagne en suivant des directions diverses.

l'emprise spatiale de la tourbière du Luitel (trait rouge). Il s'agit donc en fait de dépôts tourbeux, la tourbe étant considérée d'un point de vue géologique comme un dépôt sédimentaire carboné.

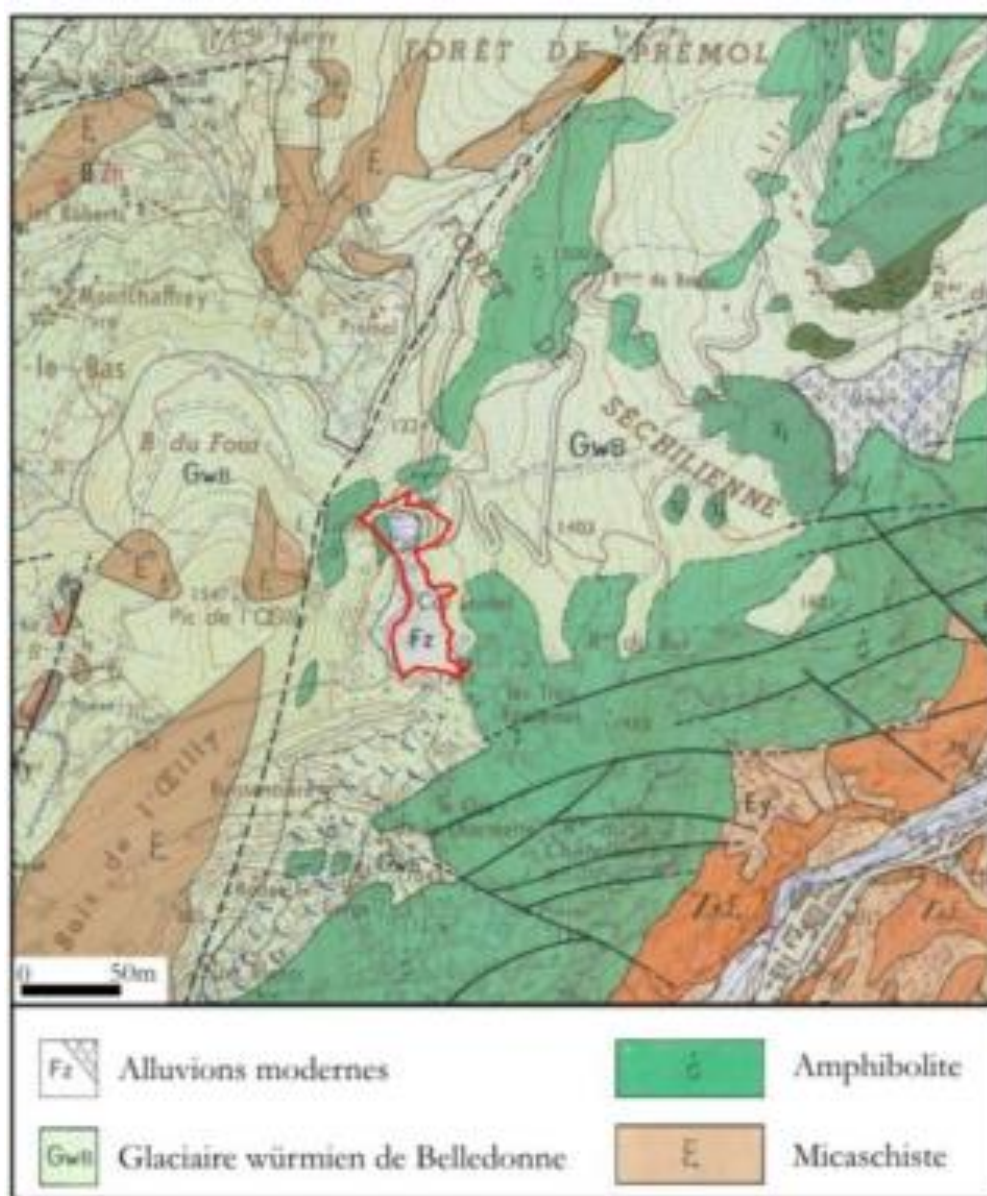


Figure 6. Géologie du Luitel (Barféty et al., 1972)

1.1.2.2. Géomorphologie

La géomorphologie de la tourbière est connue grâce aux campagnes géophysiques menées en 2006 (Garambois et Cloarec, 2006) (Figure 7a). La prospection géophysique a été réalisée à l'aide de la technique du *Ground Penetrating Radar* qui utilise la réfraction des ondes électromagnétiques à haute fréquence dans le sol. Cet outil a été retenu parce qu'il peut être mis en œuvre de façon simple et rapide et donne de bons résultats (Desplanque et Garambois, 2010). Des antennes de 50 MHz et 100 MHz ont ainsi été déplacées sur 13 transects. L'objectif de ces campagnes était de déterminer la profondeur du socle, i.e. de définir l'interface entre la tourbière et le substrat rocheux, voire les éboulis, sur lesquels elle repose.

Les résultats montrent que l'assise de la tourbière du Col du Luitel est composée de deux cuvettes. Une interpolation de ces résultats a permis de modéliser le socle minéral (Figure 7b). La partie la plus au

Nord est appelée « œil de la tourbière » car il s'agit de la zone la plus profonde, la roche mère se situant à 11 mètres sous la tourbe. C'est ce secteur que la turfigenèse⁷ a refermé en dernier. La partie Sud se compose de la cuvette à proprement parler, qui avoisine les 8 mètres de profondeur, et d'une remontée de socle qui forme un plateau à environ 4 mètres de profondeur et sur lequel se situe une pinède. Cette interpolation permet de plus d'évaluer le volume de tourbe. On estime ainsi qu'il est de 325 000 m³ (Ravatin, 2017).

a)

b)

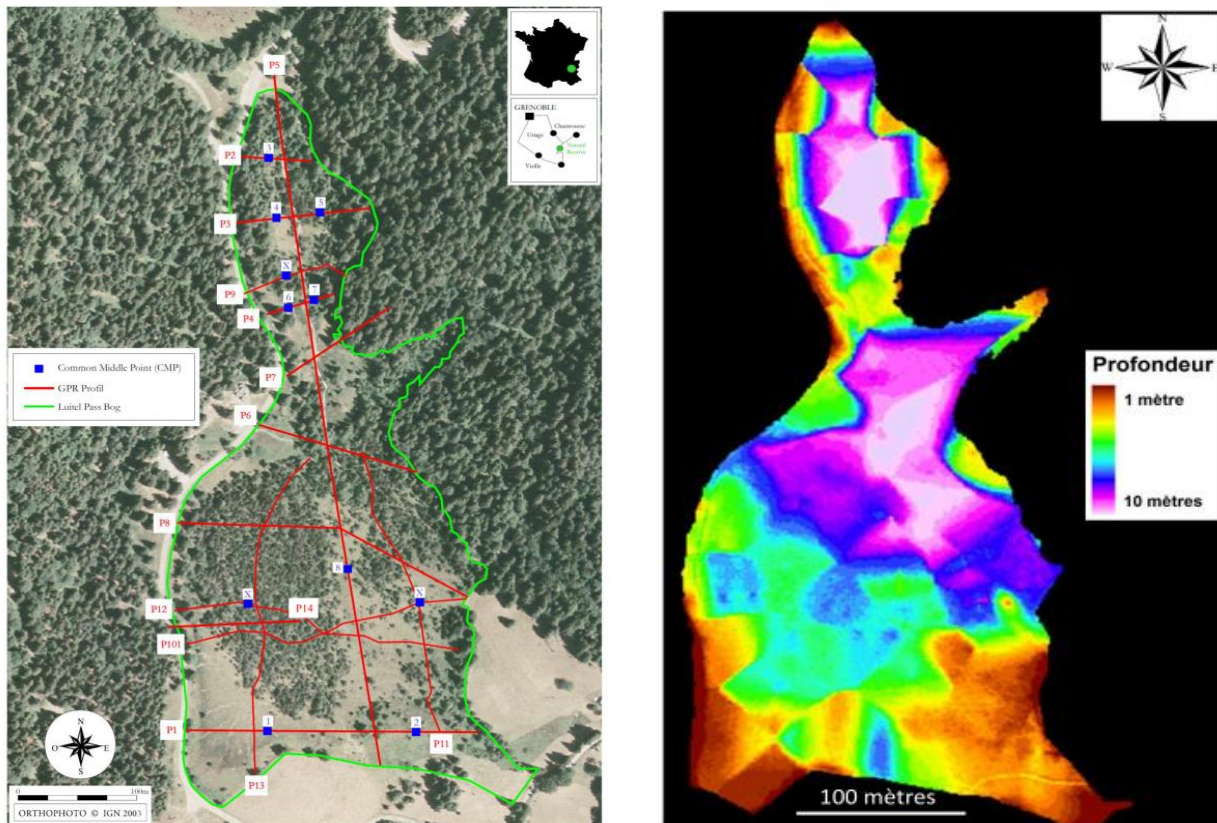


Figure 7. a) Carte des profils d'acquisitions géophysiques (Garambois, 2008) b) Cartographie du socle minéral de la tourbière du Col du Luitel par interpolation des profils géophysiques (Ravatin, 2017)

1.1.2.3. Pédologie

D'un point de vue pédologique, la tourbe se classe dans la catégorie des histosols. En vue de l'installation des piézomètres sur la tourbière, en 2004, plusieurs prélèvements de tourbe ont été réalisés à l'aide d'une tarière pédologique (Figure 8a). Ces prélèvements ont été analysés, en vue d'une meilleure appréhension des types d'histosols (Hustache, 2004). La tourbe prélevée est de plusieurs types : blonde, brune ou noire et de texture fibrique ou saprique (Figure 8b). Dans les couches les plus profondes, il est important de noter la présence d'argile qui semble tapisser le socle.

⁷ Turfigenèse (tourbification) : production de tourbe par la végétation dite alors turfigène (Manneville et al., 1999)

a)



b)

Point	Longueur du prélèvement (cm)	Caractéristique de la tourbe
3	351	Blonde sur 50 cm. Puis brune fibrique
4	388	Noire très argileuse
5	376	Noire, saprique et fluente sur 1,5 m Puis devient plus blonde et fibrique
7	120	Noire, collante et compacte sur 1 m Puis devient plus blonde
8	49	Noire et collante
9	387	Noire, fluide et collante
12	350	Brune sur 3,5 m Puis argile verte
13	240	Brune
14	315	Fibrique noire sur 1 m Saprique et collante de 1 à 1.5 m Blonde de 1,5 à 1,8 m Noire de 1,8 à 2,9 m Puis devient argileuse
15	146	Brune avec quelques cailloux
18	117	Blonde sur 40 cm Niveau caillouteux Noire fibrique sur 70 cm
20	119	Noire très fibrique et sèche

Figure 8. a) Points de prélèvements de tourbe (Hustache, 2004), b) Tableau des caractéristiques de la tourbe selon les points de prélèvements (Hustache 2004)

1.1.3. Climatologie

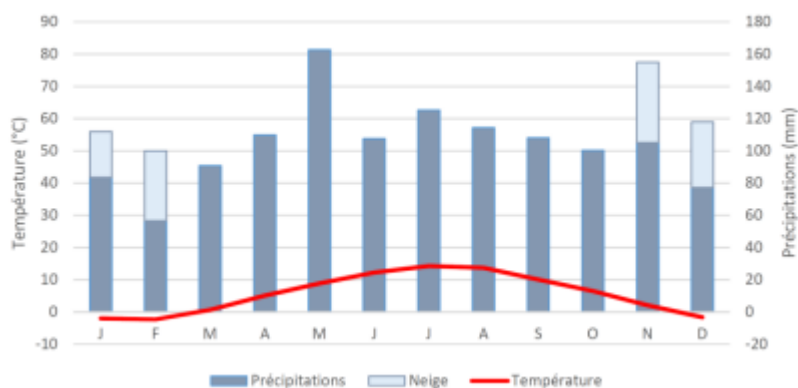


Figure 9. Diagramme ombrothermique du Luitel 2007 – 2016 (Ravatin, 2017)

Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat au Luitel est de type Dfb c'est-à-dire continental (Peel et al., 2007). Les précipitations sont ainsi réparties régulièrement tout au long de l'année et les températures sont plutôt basses. La situation de la tourbière sur un col à 1260 m légèrement en creux lui confère un microclimat froid et humide. Bordée à l'Ouest par le Pic de l'Oeilley et à l'Est par le versant sous le plateau de l'Arselle, elle est tributaire d'un environnement qui induit le stationnement des nuages et du brouillard et ne permet qu'un faible ensoleillement. Les étés sont plutôt frais et même marqués par la présence du brouillard. Enfin, la tourbière est enneigée de façon abondante et continue de la mi-décembre jusqu'à avril. Le diagramme ombrothermique réalisé sur la période 2007-2016

caractérise le climat du Luitel (Figure 9). Sur cette période, la température moyenne est de 5,7 °C et la moyenne des précipitations annuelles est de 1233 mm (Ravatin, 2017).

1.1.4. Hydrologie et hydrogéologie

La tourbière de Luitel est traversée par trois ruisseaux (Fontfroide, Pezanti et le ruisseau dit « anonyme »), et un ensemble de fossés de drainage (deux principaux, un secondaire et plusieurs tertiaires) (Figure 10).

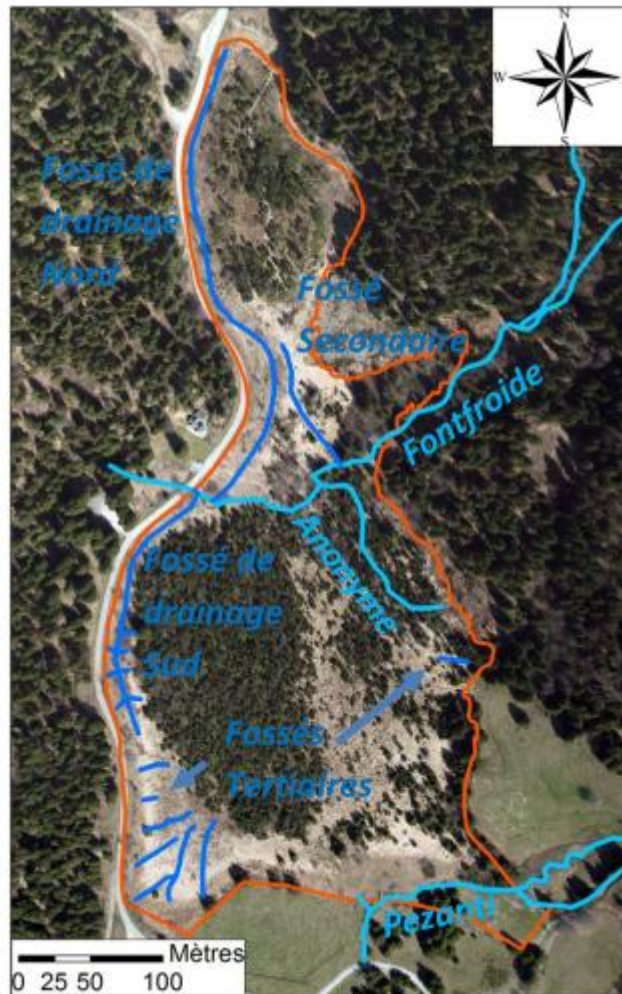


Figure 10. Réseau hydrographique de la tourbière du Col du Luitel (Pascoletti, 2018)

Le ruisseau de Fontfroide la traverse d'Est et Ouest et se situe légèrement au Sud de la remontée de substrat qui sépare les deux cuvettes. Ce ruisseau constitue le principal exutoire de la tourbière. La taille du bassin versant associé à ce ruisseau est estimée à 625 929 m².

À l'aval, peu après sa sortie de la tourbière, le ruisseau de Fontfroide fait l'objet de trois pertes, i.e. trois zones d'infiltration, situées dans des dépressions (« gouilles »). Biju-Duval (2001) a montré, à l'aide de traçages colorimétriques, que les eaux perdues ressortaient 750 m plus au Sud à la source Manquat. Ce phénomène de pertes semble confirmer la présence d'une faille orientée Nord 15 à 20° Est, dans les amphibolites, passant à proximité de la tourbière comme suggéré par Sarrot-Reynaud (1972). La faille mettant en contact les amphibolites du versant est et les micaschistes du versant ouest est située un peu plus à l'ouest. La source Pezanti, située tout à fait au Sud, constitue un second exutoire pour la tourbière (Hustache, 2004), mais celui-ci n'est pas pérenne. Quant au ruisseau anonyme, d'une longueur de 141 m, il rejoint et approvisionne Fontfroide au centre de la tourbière, mais ne s'écoule que temporairement. Enfin, la tourbière est également marquée par un réseau de fossés de drainage. Ceux-ci

PARTIE I : Présentation des sites d'étude et compléments bibliographiques

ont une influence directe sur le comportement hydrologique de la tourbière car ils provoquent une décharge rapide quand il cesse de pleuvoir (Manneville, 2016).

Sarrot-Reynaud (1972) nous permet de replacer le Luitel dans son contexte hydrogéologique. Sur le versant de Chamrousse la couverture sédimentaire du Trias n'est pas développée et la couverture quaternaire (éboulis, lessivage, décomposition) est très peu épaisse notamment en altitude. En dessous, les formations à micaschistes et amphibolites sont très peu perméables (coefficient d'infiltration d'environ 5% et jamais supérieur à 10%) sauf dans les secteurs faillés (coefficient d'infiltration pouvant atteindre 50% voire plus) et les zones d'altération dont l'épaisseur peut atteindre 1 à 2 m. Les zones d'éboulis quant à elles sont très perméables (faible coefficient de rétention) alors que les moraines présentent un fort coefficient de rétention mais un faible débit de restitution potentiel.

Ainsi, d'après Sarrot-Reynaud (1972) il existe 2 types de source sur le secteur : 1) les sources liées au faille à l'écoulement pérenne (ex : Fontfroide au Luitel) ; et 2) les sources liées à la couverture quaternaire à l'écoulement temporaire (ex : ruisseau du Lac au Luitel).

Comme on peut le constater, les informations disponibles sont fragmentaires concernant la géologie, la géomorphologie et l'hydrogéologie à l'échelle du site du Luitel et plus spécifiquement de la tourbière du col qui constitue un des deux terrains d'étude du projet ZHTB. Nous disposons de très peu d'information localement sur l'emprise et l'épaisseur des formations en présence (zones altérée du socle rocheux, éboulis, moraine...).

En l'état des connaissances la tourbière du Luitel (tourbière du col) les principales sources d'alimentation sont : 1) les eaux de précipitation (pluie et neige) ; 2) un ruisseau pérenne (Fontfroide) et 3) deux ruisseaux intermittents (Pezanti et ruisseau anonyme). Des apports souterrains par le fond semblent à exclure du fait de la nature des dépôts (farines glaciaires et argiles lacustres). Toutefois, des apports souterrains latéraux ne sont pas à exclure, notamment sur le versant est. Des eaux de versant peuvent circuler via le jeu de faille ou dans les zones altérées du socle rocheux vers la tourbière à travers les moraines ou les éboulis. Des apports du versant ouest, qu'ils soient souterrains ou superficielles semblent à exclure.

Concernant les sorties d'eau du complexe tourbeux du Luitel on peut distinguer : 1) l'évapotranspiration ; 2) les cours d'eau pérennes ou temporaires ; 3) des fuites potentiels à travers les moraines, notamment sur le versant ouest, voire à travers des éboulis. Ces fuites représentent vraisemblablement des volumes faibles et ne doivent concerner que la partie supérieure des cuvettes de la tourbière du col. De même, une connexion hydraulique entre la tourbière du col et le lac est possible mais peu vraisemblable.

1.1.5. Habitats

La carte des habitats naturels de la tourbière du col (Figure 11) met en évidence la présence de forêts tourbeuses qui forment de grandes unités d'habitats. Le pin à crochets reste l'espèce la plus représentée, elle recouvre toute la zone Sud-Ouest de la tourbière et, pour partie, la cuvette Nord. La partie Sud-Est est beaucoup plus ouverte et forme un prébois où se développent quelques pins à crochets. Enfin, les pourtours et la zone qui sépare les deux cuvettes sont occupés par des formations herbacées constituées de joncs, de molinie bleue et de canche flexueuse. Ces zones se superposent aux secteurs drainés de la tourbière, ce qui illustre bien le lien entre l'hydrologie et l'écologie. Au niveau floristique, ce sont les bryophytes qui sont les plus caractéristiques de ce type de milieux, en particulier les sphaignes qui se développent dans les tourbières acides.

La tourbière du Col du Luitel comprend également plusieurs espèces protégées. Trois d'entre elles font l'objet d'une protection nationale : la Laïche des bourbiers (*Carex limosa*), la Rossolis à feuilles rondes (*Drosera rotundifolia*) et la Scheuchzérie des marais (*Scheuchzeria palustris*) (Desplanque, 2011). Concernant la faune, notons l'importance particulière que revêt le site du Luitel pour les odonates, il héberge en effet 6 espèces de la Liste Rouge France.

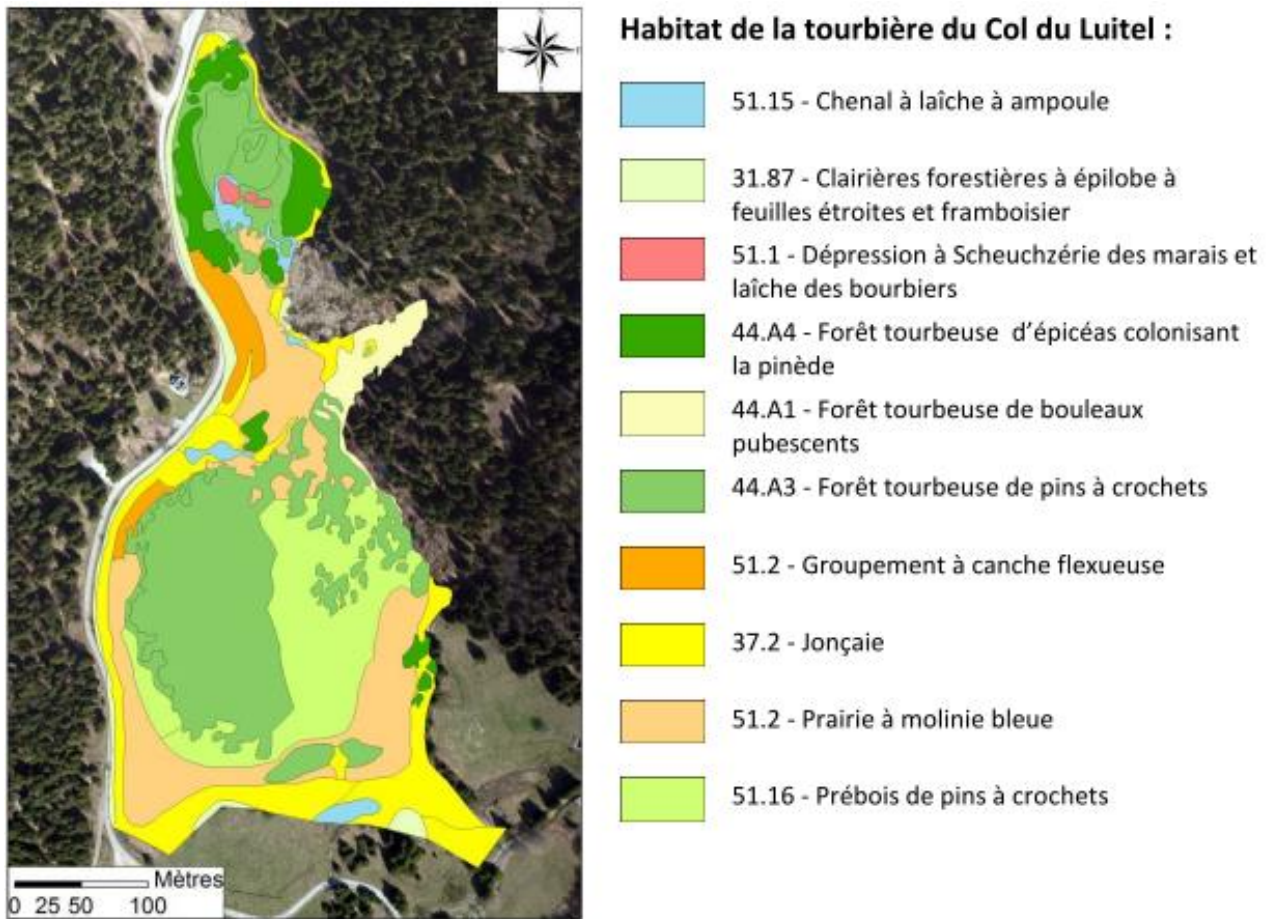


Figure 11. Habitats naturels de la tourbière du col basée sur la typologie CORINE-Biotopes. La dénomination spécifique de la légende diffère de celle de la typologie CORINE-Biotopes s'adapte ainsi à notre échelle de travail qui est relativement fine (Pascoletti, 2018).

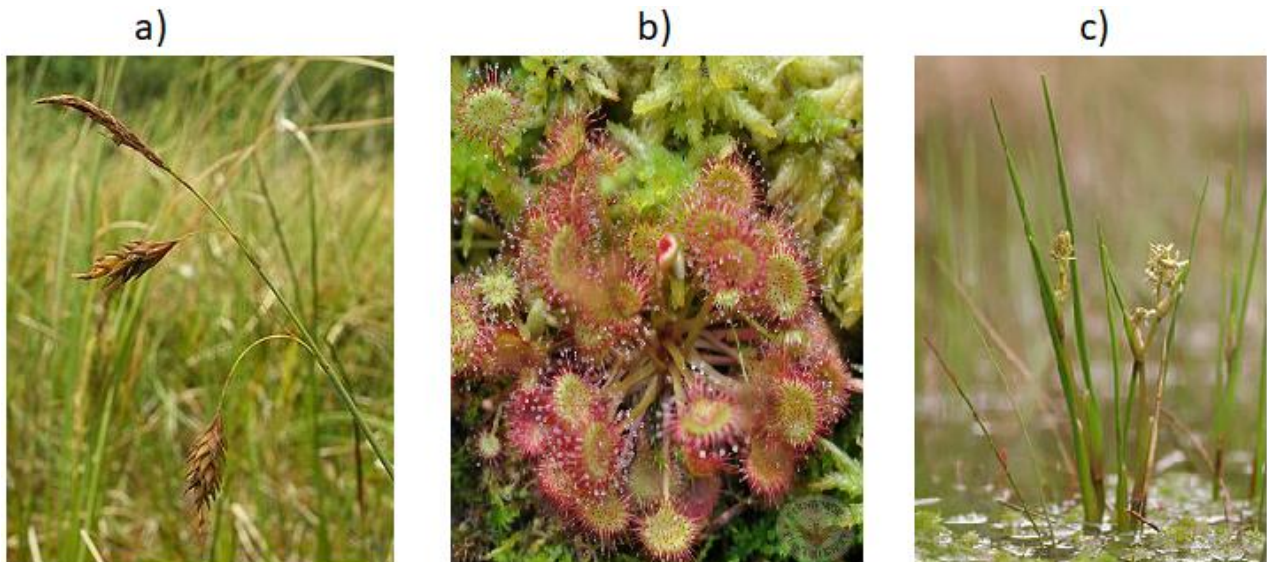


Figure 12. Espèces protégées sur la réserve de Luitel : a) *Carex limosa*, b) *Drosera rotundifolia*, c) *Scheuchzeria palustris*

1.1.6. Socio-économie

L'origine de la Réserve Naturelle remonte à 1961, date à laquelle André Malraux, alors ministre de la culture, permet le classement du Lac. Le Lac Luitel est la première réserve naturelle créée en France.

PARTIE I : Présentation des sites d'étude et compléments bibliographiques

Puis en 1991, la réserve est agrandie et intègre la tourbière du Col du Luitel. Son classement en réserve fait que certaines activités qui pourraient nuire à sa conservation, telles que le pâturage, n'y sont plus possibles. La pêche dans le Lac est également interdite (depuis 1991) et la réserve naturelle est classée en réserve de chasse.

Les activités socio-économiques actuelles sont donc plutôt liées aux activités d'accueil du public et de pédagogie qui sont une des vocation de la réserve. Le caillebotis installé sur la tourbière permet de découvrir les habitats et les espèces de la tourbière. Ainsi, d'après les données recueillies par l'éco-compteur installé en 2006, 1500 personnes ont visité la tourbière pendant les mois d'été 2007. La réserve naturelle est de plus, depuis 2003, rattachée au Réseau des Espaces Naturels Sensibles (ENS) du Département. Ainsi, les écoles peuvent recevoir des subventions dans le cadre de l'opération « en chemin vers les ENS ». Sur la période 2012-2018, la tourbière a reçu en moyenne 140 visites scolaires par an. En 2009, 61 sorties organisées par différentes structures ont été réalisées dans ce cadre à la Réserve Naturelle du Luitel. Enfin les sorties organisées par l'ONF font en général partie d'un projet pédagogique intitulé « la tourbière des 4 saisons ». Les sorties organisées dans ce cadre permettent aux enfants de travailler sur la notion d'espace protégé et de réglementation, sur les cycles biologiques et le cycle et l'état physique de l'eau (Desplanque, 2011).

1.1.7. Risques

Les zones humides de têtes de bassin versant telles que la tourbière du Col du Luitel sont des milieux sensibles, justifiant le statut de réserve naturelle de cette dernière. Le site de Luitel a été, et est encore, l'objet de plusieurs menaces pouvant altérer son fonctionnement.

- **Activités anthropiques**

La tourbière du Col du Luitel a été pendant de nombreuses décennies soumises aux activités pastorales. Celles-ci induisent le piétinement, et donc un risque de tassement de la tourbe. Les apports azotés dus aux déjections animales sont également de nature à polluer et modifier le fonctionnement de la tourbière. Aussi, certaines fonctions et services qui lui sont liés (ex. le soutien d'étiage) peuvent être altérés, étant donné que la compression du sol amoindrit les capacités de stockage des sols.

La pollution représente également une menace. À ce titre, des études géochimiques ont mis en évidence l'impact des industries grenobloises en activité au XX^{ème} siècle sur le site de Luitel (Guédron et al., 2016). Les sédiments lacustres ont en effet enregistré des contaminations industrielles au plomb ou au mercure (Guiter et al., 2015). Ces pollutions sont aujourd'hui un legs du passé, et les strates de tourbe permettent de lire l'histoire des humains et des paysages. Nedjai et al. (2003) ont montré que le lac Luitel a été perturbé par les sels de déneigement, ce pendant plus de 30 ans. L'écosystème du Lac est normalement oligotrophe, or cette pollution l'a progressivement enrichi en chlorure de sodium. Une dérivation a ainsi été installée en 2001 (Desplanque, 2011) et de gros travaux de restauration réalisés en 2013-2014.

Les épicéas, plantés sur la tourbière dans les années 1940 et suivantes, ont également constitué une menace pour la population de pins à crochets qu'ils concurrençaient. Ils ont donc fait l'objet d'une coupe en 2004 (Desplanque, 2011).

La présence de fossés de drainage constitue également une menace pour les tourbières. Les fossés de drainage affectent le bon fonctionnement hydrologique de la tourbière en induisant un rabattement rapide des niveaux de nappe suite à un épisode pluvieux, rompant ainsi la structure diplotelmique de la tourbière (Landry et Rochefort, 2011). À titre d'exemple, la Figure 13 compare le comportement d'une nappe non drainée avec une nappe drainée à l'aide de deux piézomètres installés sur la tourbière du Col du Luitel. Le premier se situe au centre de la cuvette Nord (P3), le second est à proximité du fossé de drainage Sud (P17) et donc influencé par celui-ci. Les fossés de drainage tendent à vider les tourbières de leur eau, et ainsi à les assécher. Cet assèchement a pour conséquence de réduire progressivement la taille des pores, et de manière irréversible. Cela entraîne surtout une oxygénation, puis une minéralisation de la tourbe qui perd ses capacités de rétention en eau. Les fonctions des tourbières sont alors altérées, leurs capacités de stockage sont amoindries. Or, ces capacités conditionnent les capacités de soutien d'étiage. En outre, la molinie bleue et la canche flexueuse, caractéristiques des zones

asséchées, qui peuplent le secteur des fossés de drainage constituent des formes dégradées de la végétation des tourbières hautes actives.

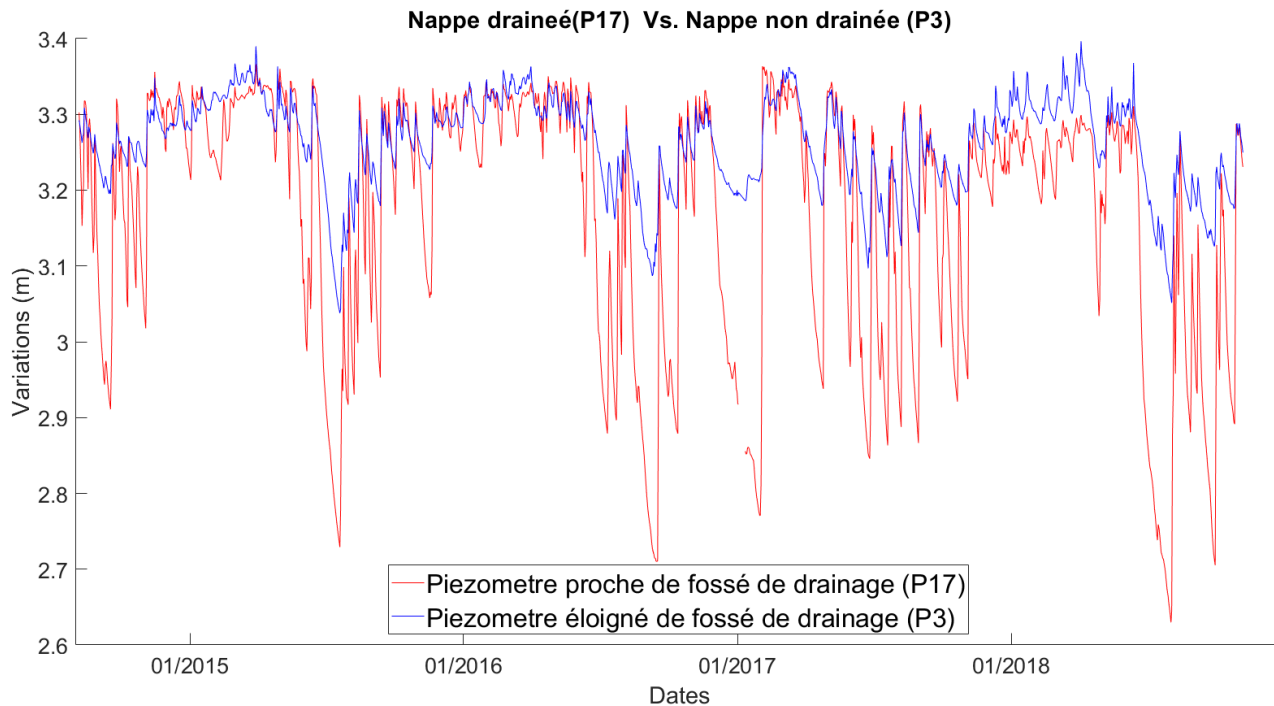


Figure 13. Comparaison du comportement de piézomètre proche de fossé de drainage (P17) avec piézomètre éloigné de fossé de drainage (P3)

- **Changement climatique**

Un assèchement plus conséquent de la tourbière peut survenir dans les années à venir avec le réchauffement climatique. Ravatin (2017) met en avant deux tendances observées sur 10 ans : 0,9 °C en plus sur la température annuelle de l'air, et 112 mm de pluies en moins sur le cumul annuel. Cependant, il est important de noter que la faible profondeur des données météorologiques ne permet pas de confirmer ou d'inférer ces tendances via des tests statistiques.

1.1.8. Suivi de la tourbière

1.1.8.1. Données météorologiques

La Figure 14 présente l'instrumentation permettant le suivi de la tourbière du Col du Luitel. Celle-ci est équipée d'une station hydrométéorologique gérée par l'Institut des Géosciences de Grenoble (IGE) depuis juillet 2006. Les capteurs composant la station enregistrent toutes les 15 minutes les mesures décrites dans le Tableau 3. La station comprend également une centrale d'acquisition qui calcule automatiquement l'évapotranspiration potentielle (ETP) à l'aide de la formule de Penman (Cohard, 2007) :

$$ETP = \frac{\Delta \cdot R_n + L \cdot \gamma \cdot E_a}{\Delta + \gamma}$$

Avec ETP : évapotranspiration potentielle (mm.h⁻¹), Δ : pente de la courbe de la tension de vapeur saturante (kPa.°C⁻¹), R_n : rayonnement net (W.m⁻²), E_a : pouvoir évaporant de l'air (kg.s⁻¹), L : chaleur latente de vaporisation d'eau (J.kg⁻¹), γ : Constante psychrométrique ($\gamma = 66 \text{ Pa.K}^{-1}$). Enfin ce dispositif de mesure est complété par un pluviomètre chauffant (Précis-Mécanique 2000 cm², www.precis-mecanique.com) installé en novembre 2009 au Sud du site, chez un particulier (45,0808°N, 5,8489°E).

PARTIE I : Présentation des sites d'étude et compléments bibliographiques

En compléments des données citées ci-dessus, nous disposons des données i) de pluies journalière de la station météorologique de Chamrousse (label 38567002), située à 1700 m d'altitude, 3,2 km au Nord-Est du Luitel, ii) d'évapotranspiration issu du modèle Safran-ISBA élaboré par le Centre National de Recherches Météorologiques (Noilhan and Planton, 1989 ; Durand et al., 1993). Ce modèle simule, entre autres, des valeurs d'évapotranspiration interpolées sur une grille de de 8 x 8 km.

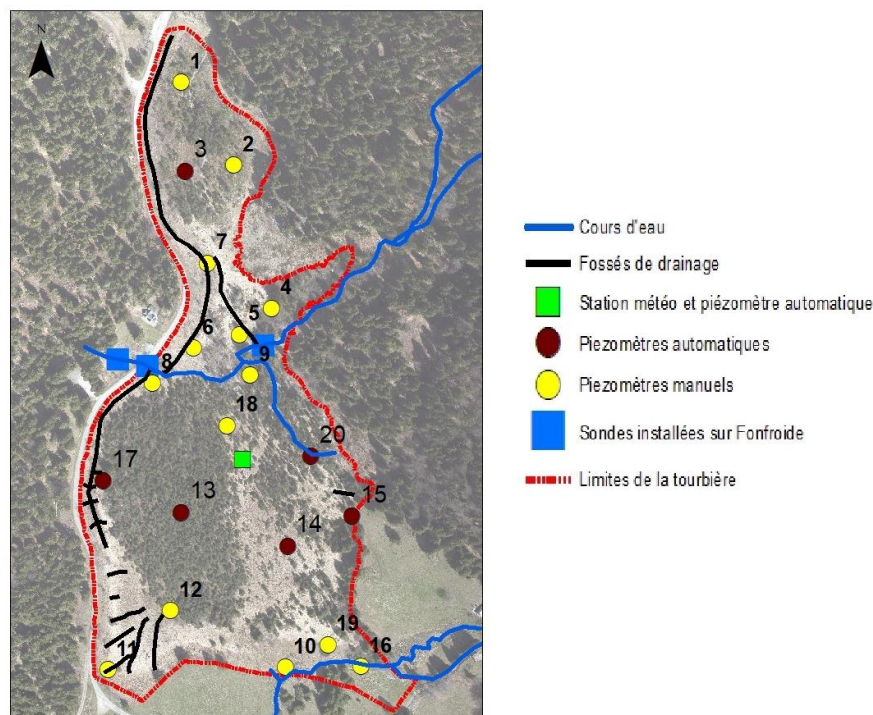


Figure 14. Instrumentation de la tourbière du Col du Luitel

Paramètre mesuré	Marque	Type	N° série capt. actuel	Depuis	Hauteur
Pression atmosphérique	Campbell Sci.	CS100	4728844	Juin 2008	Coffret
Température & HR de l'air	Campbell Sci.	CS215	E7495	Juil. 2006	1.58 m
Vitesse & direction du vent	Gill Inst. Ltd	Windsonic4	11340037	Juin 2008	2.20 m
Pluie	Précis-mécanique	3029	19788	Juil. 2006	2.15 m
Température sol (x3)	Campbell Sci.	T108		Juil. 2006	-10 cm -70 cm -130 cm
Rayt. solaire net	Kipp & Zonen	NR-Lite	990341	Juil. 2008	1.74 m
Rayt. solaire global	Campbell Sci.	CS300		Oct. 2006	1.75 m
Hauteur de neige	Campbell Sci.	SR50	C 3697	Juil. 2006	1.48 m
Niveau nappe	Druck	PDCR1830		Juil. 2006	-140 cm
Teneur en eau sol	Campbell Sci.	CS616		Juil. 2006	-10 cm à -40 cm
Tension de la batterie	Campbell Sci.	Interne		Juil. 2006	Coffret
Température de la centrale	Campbell Sci.	Interne		Juil. 2006	Coffret

Tableau 3. Paramètres mesurés par la station et capteurs correspondant (Pascoletti, 2018)

1.1.8.2. Données piézométriques

Un réseau piézométrique a également été installé sur la tourbière en 2004. Il est composé de 20 piézomètres de longueurs variables (de 0,8 à 4 m de long) et d'un diamètre de 4 cm. Notons, que le substratum rocheux est atteint pour les piézomètres dont la longueur de tube est inférieure à 4 m. Chaque piézomètre est constitué de deux tubes de PVC crépinés sur 30 cm tous les 1 m (Tableau 4 et Figure 15).

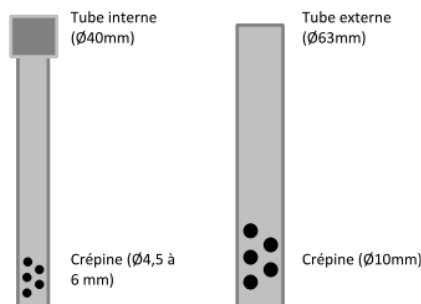


Figure 15. Représentation schématique d'un piézomètre (Pascoletti, 2018)

Parmi ces piézomètres, 6 sont équipées de sondes *mini-diver* (www.vanessen.com) qui permettent un relevé des niveaux de nappe et température au pas de temps horaire. Les piézomètres 13, 14 et 20 sont équipés de ces sondes depuis juillet 2013 et les piézomètres 3, 15 et 17 depuis juin 2014. Notons que les données acquises au niveau du piézomètre 20 ne sont pas exploitables, car la sonde associée est tombée en panne en septembre 2016 et relevait des données incohérentes bien avant. Des sondes *Solinst Levellogger* (www.solinst.com) ont été installées en supplément depuis octobre 2017 dans les piézomètres 13, 14, 15, 17 et 20 à titre préventif en cas de nouveau dysfonctionnement. Un piézomètre additionnel est également automatisé, celui qui a été installé avec la station hydrométéorologique (noté PM). Quant aux piézomètres non équipés, leur niveau est relevé manuellement par les gardes de la réserve pendant l'été depuis 2004.

Piézomètre	Longueur totale (cm)	Partie hors sol (cm)	Partie enfouie (cm)	Niveau de crépinage (cm)
1	400	9	391	10/30-120/140-210/230-320/340
2	400	11	389	10/30-110/130-210/230-330/350
3	400	49	351	10/30-120/140-210/230-320/340
4	400	12	388	10/30-120/140-210/230-320/340
5	400	24	376	10/30-110/130-210/230-330/350
6	86	30	56	10/30
7	125	5	120	10/30-95/115
8	69	20	49	10/30
9	400	13	387	10/30-120/140-220/240-320/340
10	100	40	60	10/30
11	100	27	73	10/30
12	347	14	333	10/30-120/140-210/230-320/340
13	250	10	240	10/30-110/130-215/235
14	340	25	315	10/30-120/140-210/230-280/300
15	170	24	146	10/30-110/130
16	100	16	84	10/30
17	162	20	142	10/30-110/130
18	400	18	382	10/30-120/140-210/230-320/340
19	145	28	117	10/30-90/110
20	140	21	119	10/30-90/110

Tableau 4. Caractéristiques des piézomètres (adapté de Hustache, 2004)

1.1.8.3. Données sur les cours d'eau

Quatre sondes permettent de suivre les cours d'eau sur la réserve de Luitel (cf. carte de l'instrumentation, Figure 14 et Tableau 5). Les niveaux d'eau sont mesurés : 1) dans le ruisseau du lac (RDL) à l'amont du lac tourbière ; 2) dans le ruisseau de Fontfroide à l'mont de la tourbière du col (FFAm) ; 3) dans le ruisseau de Fontfroide à l'aval de la tourbière du col (FFAv et FF1). Les hauteurs d'eaux mesurées sont converties en débits grâce à des courbes de tarages ou des équations dédiées.

Dénomination	Sonde	Période	Remarque
RDL	OTT-CTD	09-2014- Présent	Hors tourbière
FF1	OTT-CTD	11-2009-Présent	Courbe de tarage
FFAm	Solinst Levellogger	04-2018- Présent	Seuil en V
FFAv	Solinst Levellogger	04-2018- Présent	Seuil en V

Tableau 5. Caractéristiques des sondes installées sur les cours d'eaux de la réserve de Luitel

Toutes les sondes relèvent à un pas de temps de 15 minutes les mêmes données : conductivité, température et hauteur d'eau. Les sondes utilisées sont des sondes *OTT-CTD* (<https://www.ott.com/fr-fr/produits/le-niveau-deau-72/ott-ctd-194/>) et des sondes *Solinst Levellogger*⁸. Une sonde est installée hors de la zone d'étude sur le ruisseau du lac (sonde RDL en amont du lac, 45,0913°N 5,8494°E). Les 3 autres sondes sont installées sur le ruisseau de Fontfroide : i) FF1 (la plus ancienne), ii) FFAm (la sonde la plus amont), iii) FFAv la sonde la plus en aval. Les hauteurs d'eau sont converties en débit à l'aide des courbes de tarage pour la sonde FF1 (Figure 16) et via des formules issues d'abaques pour les sondes FFAv et FFAm (celles-ci étant des seuils en V). Les distances, calculées en suivant le ruisseau de Fontfroide, FF1-FFAv, et FF1-FFAm sont respectivement : 28,25 m et 133,80 m. La distance FF1-RDL est de 489 m.

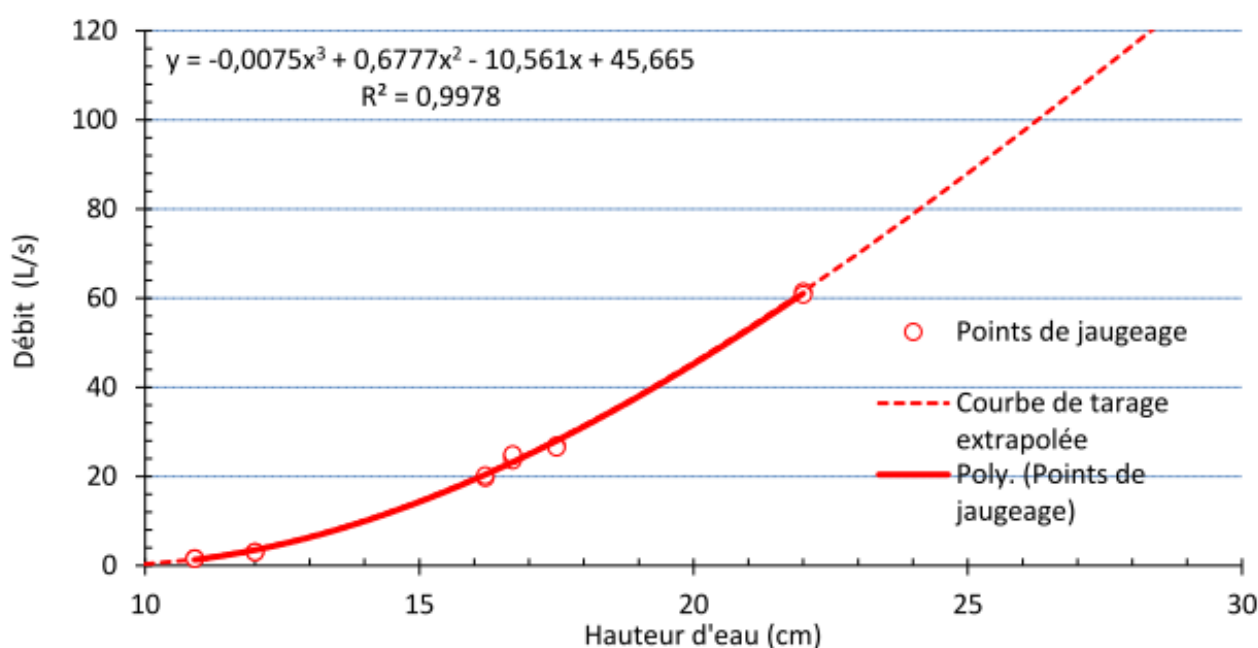


Figure 16. Courbe de tarage du ruisseau de Fontfroide (Laurent, 2007)

1.1.8.4. Disponibilité des données

La Figure 17 synthétise les données disponibles sur le site du Luitel sur la période novembre 2009-décembre 2018.

⁸ <https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/precision.php>

		2009				2010				2011				2012				2013				2014				2015				2016				2017				2018			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Ruisseau (C, T, D)	Sonde RDL																																								
	Sonde FF1																																								
	Sonde FFAm																																								
	Sonde FF Av																																								
Piezo (T, D)	Piezomètre 3																																								
	Piezomètre 13																																								
	Piezomètre 14																																								
	Piezomètre 15																																								
	Piezomètre 17																																								
	Piezomètre 20																																								
	Piezo Station																																								
Meteo	Station meteorologique																																								
	Evapotranspiration ISBA																																								
	Pluviomètre chauffant																																								

Figure 17. Tableau trimestriel récapitulatif des données brutes disponibles et de leur disponibilité (rouge = pas de données, vert = disponible, jaune = données incomplètes)

1.2. Tourbière de Frasne

1.2.1. Situation géographique et typologie

La réserve naturelle régionale des tourbières de Frasne-Bouverans se situe entre Frasne et Bonnevaux dans le département du Doubs. Située à une altitude de 830 à 850 mètres, elle occupe un territoire en multiples dépressions de 292 ha en amont du bassin du Drugeon sur les communes de Frasne et Bouverans. La zone d'étude proprement dite est localisée au sud, sur le complexe tourbeux du Forbonnet, l'une des trois zones d'intérêt qui composent la réserve naturelle régionale des tourbières de Frasne-Bouverans.

La combe tourbeuse (50 000 m²) constitue un milieu mi-ouvert qui s'étend le long d'une faible pente orientée du sud-ouest au nord-est sur 400 m de longueur et une centaine de mètres de largeur. Les altitudes y sont comprises entre 835,5m et 833,5m. Elle est bordée au nord-ouest et au sud-est par deux grandes tourbières boisées plus hautes en altitude.

Au sud se trouve une perte karstique appelée Creux-au-Lard. Cette doline a une profondeur d'une dizaine de mètres (Bichet, Grosvernier, 2014). Au nord, une barrière morainique sépare cette combe tourbeuse d'un bas-marais alcalin bordant la route du Suchal (Grosvernier, 2005) (Figure 18).

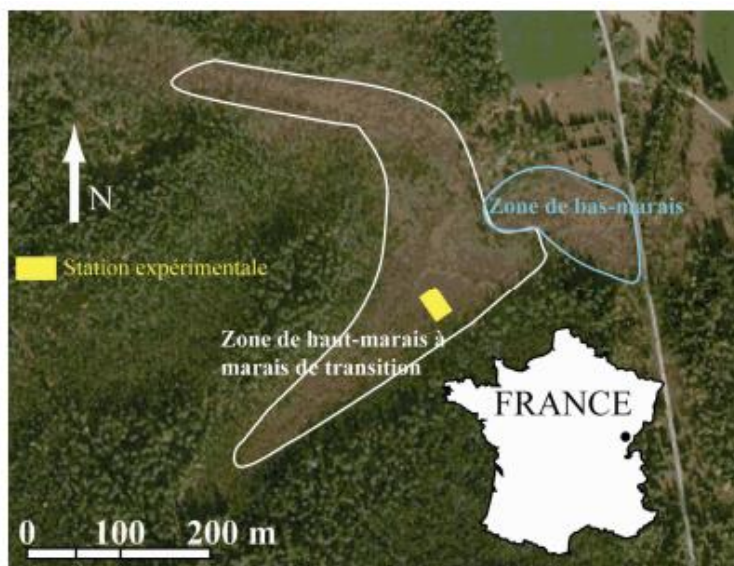


Figure 18. Localisation de la tourbière de Frasne et de la zone instrumentée

1.2.2. Géologie

1.2.2.1. Généralités

Le bassin du Drugeon se localise dans le synclinal de Bonnevaux-Frasne (Duraffourg et Palacio, 1981). Les formations de ce synclinal remontent principalement à l'âge du Crétacé inférieur. Les dépressions de ce synclinal ont été comblées par des formations glaciaires (Duraffourg et Palacio, 1981). Ainsi, le remplissage quaternaire glaciaire masque le substratum crétacé qui n'affleure que rarement (Duraffourg et Palacio, 1981). Les moraines sont constituées d'éléments calcaires autochtones et sont datées du Würm, -25000 à -17000 ans (Grandvoinet et al., 1988).

Ces dépôts fluvio-glaciaires, constitués de clastes détritiques de granulométrie très variable et déposés en mosaïque ont conduit au paysage varié d'aujourd'hui marqué par de nombreuses cuvettes d'altitude variable, indépendantes entre elles et bien souvent imperméables. Ces dépressions mal drainées sont particulièrement favorables à l'installation de plans d'eau, souvent stagnante, propice à la paludification (Bichet et Campy, 2009 ; Bruckert et Gaiffe, 1980). Certaines dépressions telles que le Creux au Lard sont totalement perméables et constituent des pertes karstiques d'importance. Deux hypothèses ont été émises pour expliquer l'imperméabilisation des dépressions préglaciaires : i) le dépôt de couches morainiques à pâtes calcaires plus ou moins argileuses et de couches argileuses (Broquet et al., 1978), ii) le dépôt de sédiments fins décarbonatés provenant de l'altération de la pâte calcaire des moraines

(Bruckert et Gaiffe, 1985). Les tourbières se sont ensuite formées dans les dépressions préglaciaires imperméabilisées au début de la période Atlantique, également qualifiée d'optimum climatique, il y a 7500 ans (Grandvoinet et al., 1988). Ainsi, l'accumulation de tourbe dans ces dépressions peut atteindre actuellement plusieurs mètres d'épaisseur (Duraffourg et Palacio, 1981).

1.2.2.2. Géomorphologie

Plusieurs études donnent des indices quant à la topographie du socle minéral de la combe tourbeuse. Dans sa partie amont, il apparaît une cuvette géomorphologique dont la pente en direction de la tourbière active est plus forte que ne l'est celle de surface (Grosvernier, 2014). Le bas-marais et la tourbière active seraient séparés physiquement par un seuil morainique mis en évidence lors de sondages-tarières (Grosvernier, 2005).

La tourbière vivante est caractérisée en surface par une topographie relativement homogène (Annexe 3) et décrit une pente orientée sud-ouest nord-est. La Figure 19 présente la topographie du socle minéral de la combe tourbeuse de la tourbière active. La cartographie est issue d'une interpolation par Natural Neighbors réalisée à partir de 313 points de sondages, dont 77 effectués dans le bas-marais lors d'une autre étude (Collin, 2016 ; Grosvernier, 2005). Le relief observé est celui d'une pente de 0,35% de la digue construite en 2015 jusqu'à la station SNO tourbières. Elle est orientée sud-ouest nord-est et dirigée vers le bas-marais alcalin. Le relief du substratum, majoritairement en pente, apparaît hétérogène avec un ensemble de buttes et de cuvettes. Une dépression importante de 60-70 mètres de largeur est accolée à la barrière morainique, en bas de pente. Elle semble se prolonger vers le nord-ouest, mais l'absence de sondages ne permet pas de le vérifier (Collin, 2016).

Les sondages réalisés à la transition entre le bas-marais alcalin et la tourbière active mettent en évidence une discontinuité dans la barrière morainique entre ces deux hydrosystèmes. Les altitudes du socle minéral observées dans cette zone, que ce soit dans la tourbière active, dans le bas-marais ou au niveau de la barrière morainique, se situent entre 830,5 et 831,5 m (Figure 19). Le remplissage tourbeux est hétérogène sur l'ensemble de la combe tourbeuse avec des hauteurs de tourbe allant de quelques décimètres à plus de 4m (Figure 20). Les profondeurs les plus importantes (en rouge) sont observées au centre (entre le SNO tourbières et la digue) et en aval (contre la barrière morainique) de la combe tourbeuse (Collin, 2016).

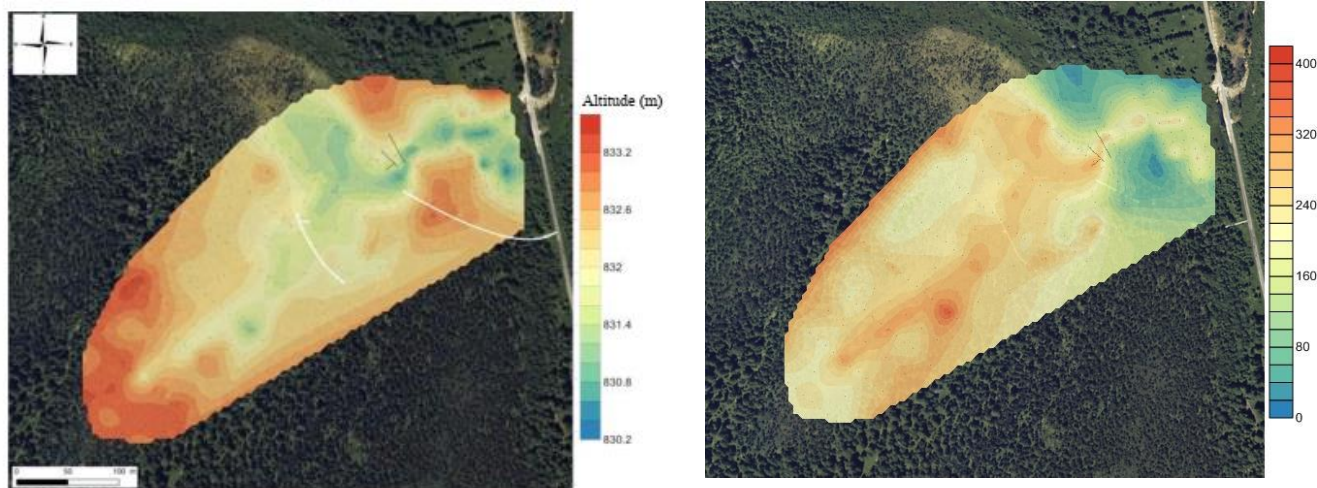


Figure 19. (À gauche) Cartographie de la topographie du socle minéral de la tourbière active de Frasne (interpolation par Natural Neighbors, logiciel Surfer 10). Les traits blancs symbolisent les passerelles : au centre celle du SNO tourbières et à l'est celle des visiteurs. (Collin, 2016)

Figure 20. (À droite) Cartographie des épaisseurs de tourbe de la tourbière active de Frasne (Interpolation par Natural Neighbors, logiciel Surfer 10). (Collin, 2016)

1.2.2.3. Pédologie

La description des sols de la tourbière active a été réalisée en 2004 (Briot, 2004). Les profils sont profonds (supérieurs à 2 mètres) et constitués de tourbe blonde dans la combe tourbeuse. Le taux de fibre est élevé, la perméabilité importante et le pH faible. Les tourbières boisées adjacentes sont quant à elles constituées de tourbe brune avec des profondeurs pouvant atteindre 5 mètres (Figure 21).

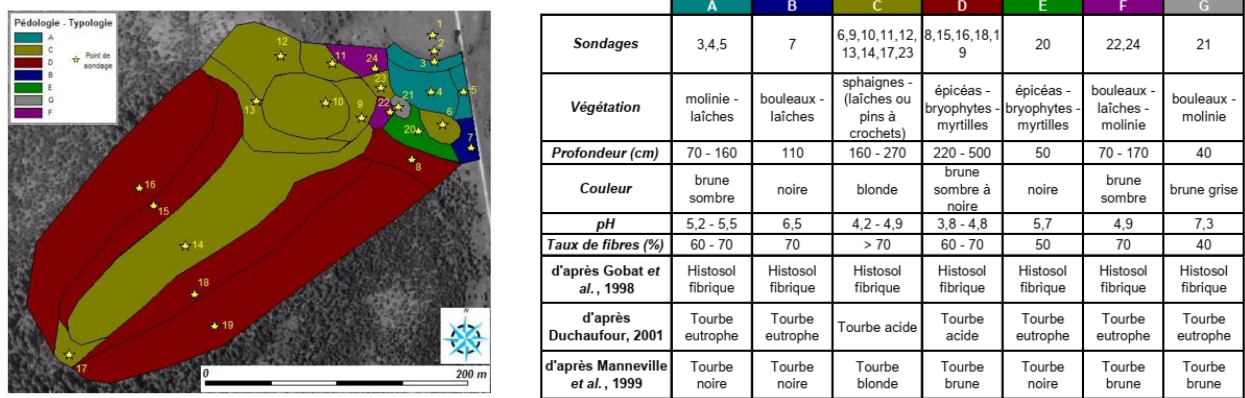


Figure 21. Description pédologique du site d'étude (adapté de Briot, 2004)

1.2.3. Climatologie

Le climat de la tourbière de Frasne est montagnard continental (Manneville et al. 1999) avec des températures moyennes annuelles de l'ordre de 7-8°C (station de Cerniébaud, Jura) et des précipitations moyennes comprises entre 1 300 et 1 500 mm/an (station de Pontarlier ; Briot 2004). Les mesures des températures et des précipitations enregistrées par la station météorologique installée sur la tourbière confirment celles des stations de Cerniébaud et Pontarlier : les moyennes annuelles des températures et des précipitations pour la période novembre 2008 – décembre 2009, sont respectivement de 6,8 °C et de 1 383 mm (Figure 22).

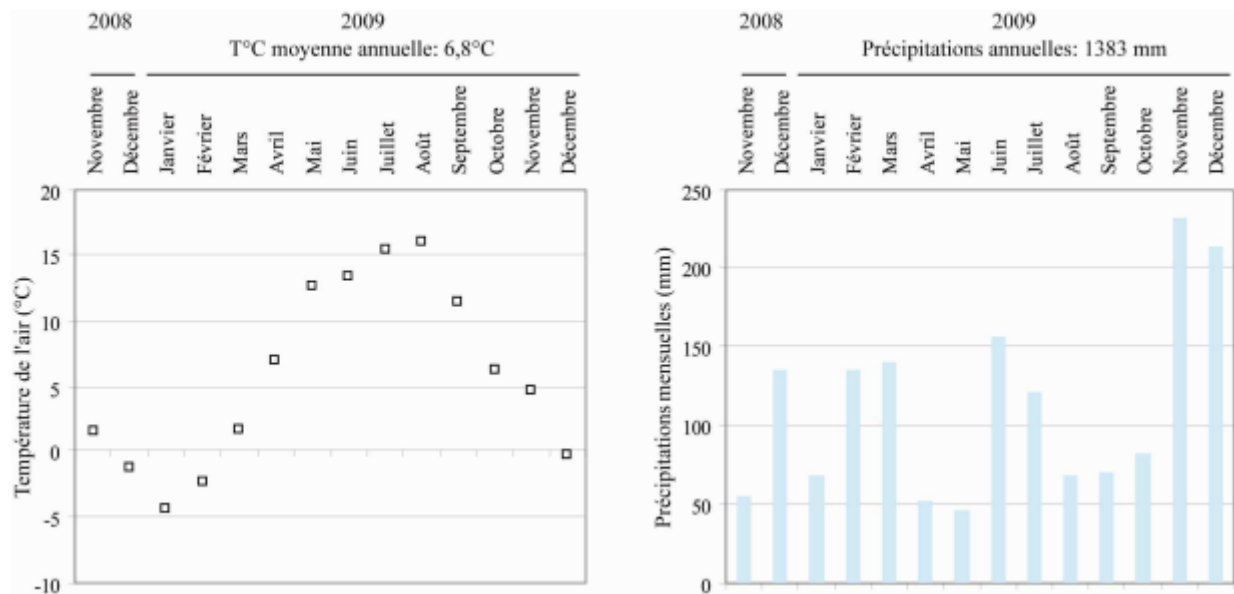


Figure 22. Diagramme ombrothermique, mesures des températures et des précipitations (hors neige) pour la période novembre 2008 – décembre 2009 (Delarue, 2010)

1.2.4. Hydrologie

Le contexte géologique, au travers des différences de perméabilité d'origine morainique et du caractère karstique du substratum a permis l'installation d'un réseau hydrologique souterrain et de surface. L'importance du réseau souterrain a d'ailleurs été mise en évidence par Briot (2004). Les eaux du Creux

au Lard ne ressortent pas localement, mais en deux points au profit du bassin versant de l'Ain : la source de l'Ain et la source de la papeterie. Le Creux au Lard est émissif 2% du temps sur l'année et il est possible qu'il l'ait été constamment par le passé (Grosvernier, 2014).

Le ruisseau des Oyettes parcourt le site d'étude d'ouest en est et contourne par le nord la tourbière vivante (Figure 23). Avant de passer sous la route du Suchal, il est rejoint par les eaux provenant du bas-marais, lui-même alimenté en grande partie par les eaux de la combe tourbeuse. La tourbière vivante serait une combinaison entre une tourbière de pente (soligène) et de percolation dans sa partie centrale et apicale alimentée par un flux d'eau lent ; et une tourbière limnogène dans sa partie basale, en bordure du seuil morainique créée par l'atterrissement d'un plan d'eau (Grosvernier, 2014).

D'après une carte de 1797, il semblerait également qu'il existait un ruisseau dans la combe tourbeuse il y a 100 à 200 ans. D'après la ligne de partage des eaux, celui-ci s'écoulait vers le nord-est « fuyant » le Creux-au-Lard contrairement à la dynamique actuelle d'écoulement des eaux de surface (Collin, 2016).



Figure 23. Cartographie du réseau hydrologique de surface (Collin, 2016)

1.2.5. Habitats

La réserve naturelle constitue un important complexe tourbeux où se côtoient des prairies humides, des cariçaies et roselières, de la végétation aquatique, des bas-marais, des marais de transition, des hauts-marais ou tourbières bombées et des boisements. Cette mosaïque d'habitats offre une grande richesse floristique ; en témoigne la présence du *Liparis de Loesel* et de l'hypne brillante.

De par les nombreux habitats et espèces rares, sensibles et d'intérêt européen, la tourbière de Frasne est un des sites naturels des plus remarquables qui possède de nombreux habitats d'intérêt communautaire (pinède à crochets, haut-marais actif, tourbière de transition) et de nombreuses espèces floristiques protégées à l'échelle nationale et européenne (ex. *Carex limosa*, *Drosera spp.*, *Scheuchzeria palustris*, *Andromeda polifolia*). Dans l'ensemble, les habitats de la combe du Creux au lard sont dans un état de conservation assez favorable (Magnon et Terraz 2002), bien que subissant une fermeture progressive par le pin à crochet et l'épicéa. Ainsi, les espèces de sphaignes (*Sphagnum fallax*, *S. magellanicum* et *S. warnstorffii*) constitue 85-95% du couvert végétal (Bailly 2005). Quant aux herbacées telles que *Eriophorum vaginatum*, *Scheuchzeria palustris*, *Andromeda polifolia*, *Vaccinium oxycoccos* et *Carex limosa*, celles-ci constituent de 30 à 60% du couvert végétal (Bailly 2005).

1.2.6. Socio-économie

Site majeur ouvert au public depuis 1989, les tourbières de Frasne ont été réaménagées dans le respect de l'environnement en 2009, un sentier dont une partie sur ponton permettant d'évoluer dans ce véritable joyau de la nature, protégé par une réglementation stricte. Des panneaux d'interprétations installés le long du cheminement aident à comprendre les origines et l'évolution de ce milieu naturel. Ce site exceptionnel reconnu régionalement, accueille selon les années de 15000 à 20000 visiteurs, dont

une partie lors de visites guidées. Pour permettre une surveillance accrue, des tournées des agents de la communauté de communes, des gestionnaires de la réserve et de l'ONF sont réalisées régulièrement, en particulier, lors de la période estivale.

1.2.7. Risques

- **Naturellement**

Le principal risque naturel tient en la dynamique naturelle de boisement, notamment la recolonisation des milieux ouverts.

- **Activités anthropiques et perturbations hydrologiques**

La carte de 1797 atteste de l'importance des prés, prairies et pâturages au Forbonnet à cette époque. La mise en place de drains dans les années 1850 et le boisement de la zone a considérablement modifié l'aspect de la tourbière. Ainsi la direction des écoulements a changé en plusieurs endroits suite à l'aménagement du réseau de drainage et à l'affaissement du terrain résultant de la minéralisation des tourbes drainées. Ainsi, le Creux-au-Lard a privé la tourbière vivante des eaux d'une partie de son bassin versant favorisant la fermeture du milieu par le Pin à crochet (Bedolla et al., 2013 ; Grosvernier, 2014, 2011).

Des travaux ont été réalisés en 2015 et 2016 pour restaurer les conditions hydrologiques avant drainage de la combe tourbeuse. Ces travaux ont consisté notamment au comblement des drains mis en place pour l'amélioration de la sylviculture dans les années 1850, mais surtout au détournement et au rehaussement des flux drainés ou abaissés dans la tourbière. La première phase de travaux s'est terminée le 12 octobre 2015 avec la mise en place d'une digue en amont de la combe tourbeuse (phase I). Elle permet aujourd'hui la surélévation du niveau de la nappe et la circulation des eaux en direction du bas-marais. La deuxième phase des travaux survenue pendant la réalisation de cette étude s'est terminée le 28 juin 2016. La combe tourbeuse devrait retrouver à moyen ou long terme son comportement hydrologique avant drainage (Collin, 2016).

D'une manière générale, l'important réseau de drainage a contribué à assécher la tourbière et a peu favoriser la colonisation en épicéas. L'homme agit aussi directement sur le milieu par le prélèvement d'espèces protégées. La fréquentation par le public induit un piétinement, des cueillettes, et des feux, expliquant les mesures prises pour limiter la circulation pédestre sur le site, uniquement sur les sentiers dédiés.

- **Changement climatique**

Même s'il est difficile d'évaluer les conséquences du changement climatique, tant les incertitudes sur les trajectoires sont grandes, à n'en point douter, une augmentation des températures et une recrudescence de sécheresses seraient de nature à profondément modifier le comportement de la zone humide. Le Service National d'Observation du CNRS installé sur la tourbière de Frasne mesure tous les paramètres liés à cette problématique du réchauffement climatique en lien avec les tourbières.

1.2.8. Suivi de la tourbière

- **Météorologie**

Les caractéristiques météorologiques : température et précipitations sont mesurées au niveau de la station de recherche du SNO sur le site de la tourbière. L'évapotranspiration potentielle, c'est à dire, la somme de la perte par évaporation de l'eau du sol et par transpiration des végétaux est calculée selon la formule de Thornthwaite pour chaque mois. Malheureusement, les données de précipitations hivernales ne peuvent pas être utilisées pour le moment, la station n'étant pas équipée pour faire fondre la neige et mesurer l'équivalent en précipitations. À défaut, les données de la station MétéoFrance de Pontarlier, située à 20 km de Frasne pourrait être utilisées pour compléter le jeu de données.

• Piézométrie

Le site d'étude est équipé de nombreux piézomètres (Figure 24). Les piézomètres installés le plus anciennement (2004) pour caractériser l'hydrologie du bas-marais sont pour la plupart toujours en place (piézomètres bm1 à bm20). Certains se trouvent en aval de la combe tourbeuse (bm18, bm19 et bm20) mais la majorité est présente dans le bas-marais (bm1, bm2, bm3, bm4, bm5, bm6, bm7 et bm8) ou sur le seuil entre le bas-marais et la tourbière vivante (bm10, bm11, bm12, bm13 et bm14).

Un dispositif de 14 piézomètres a été installé le 22 juillet 2014. Dix d'entre eux (tv1, tv2, tv3, tv4, tv5, tv6, tv11, tv12, tv13, tv14) sont équipés de sondes permettant l'enregistrement du niveau de la nappe et de la température toutes les 60 minutes (Sondes Hobo). Les autres sont relevés manuellement deux fois par mois hors période de neige et de glace (avril à novembre). Les piézomètres tv1, tv2 et tv3 ainsi que tv4, tv5 et tv6 fonctionnent par 3 en flûte de pan et sont respectivement crépinés à 225-235cm, 136-166cm, 20-30cm, 230-240cm, 97-137cm et 20-40cm de profondeur (sous le niveau du sol). Ce dispositif est en cours de modification. Les flûtes de pan n'ont pas permis d'identifier plusieurs nappes. Pour simplifier le dispositif, un seul des trois piézomètres sera conservé.

Les piézomètres A, B, C, D et E ont été installés le 24 mai 2016. A et B ainsi que C et D fonctionnent par deux en flûte de pan et sont respectivement crépinés à 250-270cm, 100-120cm, 175-195cm et 80-100cm. E est crépiné à 20-40cm. Le niveau d'eau y est relevé deux fois par mois hors période de gel (avril à novembre) (Collin, 2016).

Enfin, la station de recherche du SNO Tourbière dispose de deux piézomètres (SOwet et SOdry) équipés en sondes permettant l'enregistrement du niveau de nappe et de la température toutes les 30 minutes. Tous les piézomètres hormis tv3, tv6, bm18, bm19, SOwet et SOdry sont fixés au socle minéral de la tourbière (Collin, 2016).

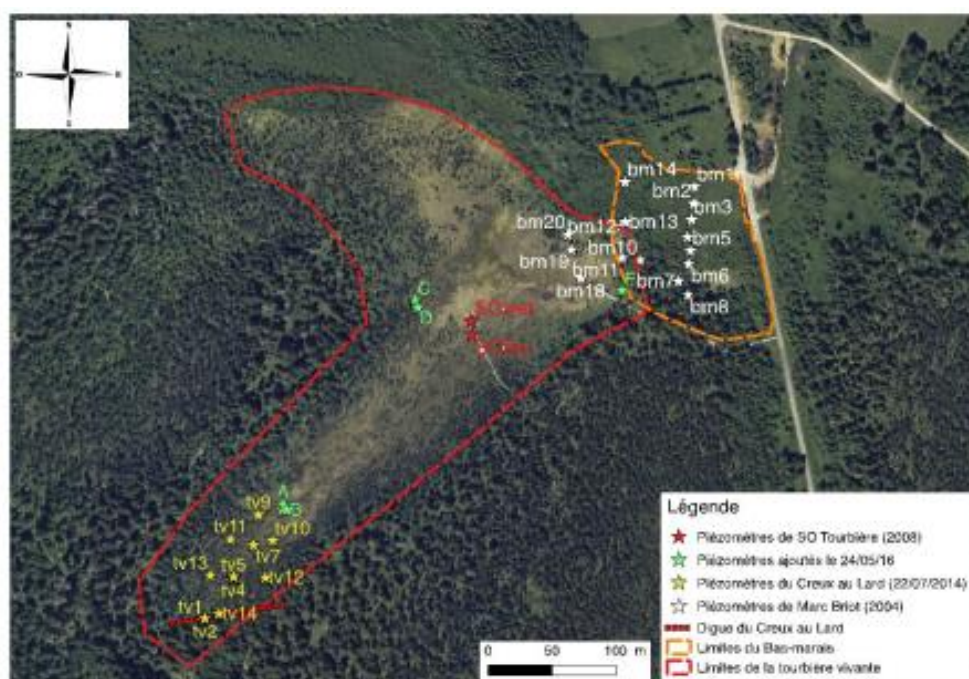


Figure 24. Emplacement des piézomètres (Collin, 2016)

• Cours d'eau

Les débits sont mesurés avec un courantomètre (Valeport, Model 801 flat) en trois points à l'exutoire de la tourbière active : « aval buse », « ruisseau sur moraine », « exutoire du bas-marais » (Figure 25). En aval de la buse, une sonde CTD-OTT multi-paramètres enregistre en continu la hauteur d'eau, la conductivité électrique et la température depuis 2013. Les hauteurs d'eau sont ensuite converties en débits en utilisant des courbes de tarage. Cet exutoire est le seul cours d'eau pérenne sortant du complexe tourbeux de Frasne. Il existe toutefois d'autres exutoires au régime intermittent.



Figure 25. Localisation des sondes installées sur des cours d'eau (Collin, 2016)

• Synthèse des données hydrologiques

		2014												2015												2016												2017												2018											
Stations	Variables	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D												
TV	Tgw (C)																																																												
	h (m)																																																												
SNO	Tair (C)																																																												
	RH (%)																																																												
	TR (W/m^2)																																																												
	h (m)																																																												
	ATM (bar)																																																												
	P (mm/30 min)																																																												
	WS (m/s)																																																												
	WDR (degree)																																																												
CTD	C (mS/cm)																																																												
	Tstream (C)																																																												
FM	h (m)																																																												
	Q (l/s)																																																												

Figure 26. Tableau récapitulatif des données brutes disponibles et de leur disponibilité (rouge = pas de données, vert = disponible, orange = données manquantes)

2. Compléments bibliographiques sur un paramètre clef du bilan hydrologique (ETP) et la modélisation par réseaux de neurones

Cette partie présente des éléments bibliographiques non abordés en phase 1. Deux points sont traités : 1) l'évapotranspiration (ETP) ; 2) la modélisation par réseaux de neurones.

L'ETP est en effet un des paramètres clefs du bilan hydrologique. Il est notable que ce paramètre est difficilement mesurable et qu'il est généralement estimé ou calculé. Les incertitudes liées à cette estimation ou ce calcul rendent souvent les bilans hydrologiques difficiles à équilibrer.

La modélisation par réseaux de neurones constitue un outil a priori intéressant pour l'étude de systèmes hétérogènes comme les complexes tourbeux. Ce type de modélisation s'affranchit des paramètres physiques du système en travaillant uniquement sur des entrées (ex : pluie, niveaux d'eaux, ETP...) et des sorties (ex : débits en cours d'eau). Ce type d'approche est donc intéressant pour mieux comprendre le fonctionnement d'un système complexe et conduire une réflexion sur la qualité des données utilisées. À terme, ce type de modèle peut être utilisé pour faire de la prospective (ex : changements climatiques).

2.1. Point sur l'ETP

Il ressort d'une analyse de la bibliographie que la mesure de l'évapotranspiration est difficile et généralement indirecte. L'évapotranspiration potentielle est bien souvent calculée à partir d'autres variables mesurées, via des formules empiriques dont le domaine de validité n'est pas toujours clairement défini. Djaman et al. (2015), entre autres, montrent que ces différentes méthodes de calcul peuvent parfois fortement diverger.

Dans le cas d'une tourbière, les apports au système doivent au moins compenser les pertes par évapotranspiration, absorption ou écoulement (Figure 27). Pour que la tourbière se maintienne, le bilan doit être soit équilibré, soit excédentaire.

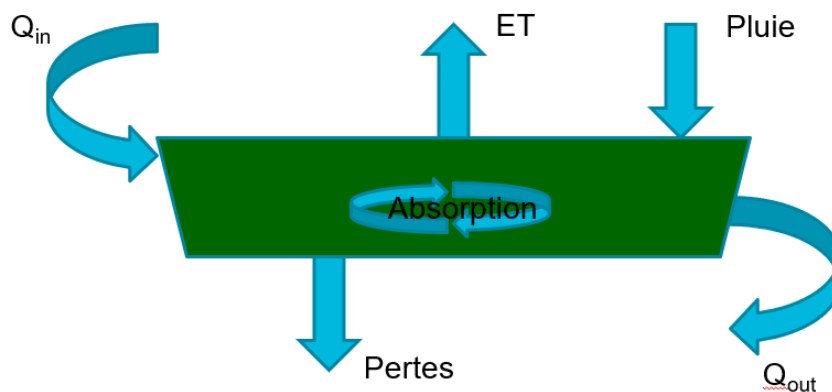


Figure 27 : Représentation schématique du bilan théorique d'une tourbière

Dans la littérature, on relève souvent la mise en évidence de cycles saisonniers et journaliers, ce qui n'a rien de spécifique aux tourbières. Cela étant, la présence d'un cycle journalier particulièrement marqué (Raddatz et al., 2009) semble plus typique, témoignant probablement d'une plus grande sensibilité de ces milieux à l'ensoleillement.

On calcule une évapotranspiration potentielle et le passage de celle-ci à l'évapotranspiration réelle n'est pas forcément trivial. En effet, l'évapotranspiration potentielle suppose qu'il existe de l'eau en quantité

PARTIE I : Présentation des sites d'étude et compléments bibliographiques

suffisante pour être évapotranspirée. Ce n'est pas toujours le cas, notamment lors de longues périodes sèches qui sont précisément la cible de ce projet.

A priori, une tourbière est un milieu en eau évapotranspirable en permanence mais si certains auteurs, comme Bragg (2002), notent que l'évapotranspiration réelle est souvent proche de l'évapotranspiration potentielle, on note aussi dans la littérature des notions, souvent supposées, de couche limite qui amortirait les variations et empêcherait une exploitation totale du contenu en eau par l'évapotranspiration. La tourbière serait alors, dans une certaine mesure, apte à « se défendre » contre une évapotranspiration trop forte et/ou trop durable. Cette composante de son bilan est en effet toujours forte et le maintien de ces hydrosystèmes à travers le temps semble attester d'une certaine résilience.

Pour s'éviter d'avoir à modéliser le niveau de remplissage des sols (tourbeux ou non) de façon précise, la modélisation statistique est globalement avantageuse et devrait permettre de distinguer les périodes présentant un potentiel d'évapotranspiration réel des autres.

2.2. Modélisation par Réseaux de neurones

2.2.1. Généralités

Les réseaux de neurones sont une famille de modèles non linéaires paramétrés mis à profit, en hydrologie, pour l'approximation de fonction. L'analogie entre neurones biologiques et neurones formels (apprentissage, coefficient synaptique, neurone) s'arrête à des questions terminologiques. Il est en réalité question d'apprentissage statistique ; ainsi, si par souci de simplicité, on parle de neurone, il s'agit en fait de désigner le terme de « **neurone formel** » qui s'applique aux statistiques.

L'utilisation de réseaux de neurones pour la simulation - voire la prévision - en hydrologie tire profit d'une relation non explicite entre entrées et sorties. Dans cette approche de modélisation, on ne fait aucune hypothèse *a priori* sur le fonctionnement du système modélisé, on cherche simplement à relier des entrées - supposées explicatives de la sortie - avec cette sortie. Typiquement, on essaiera de relier un débit amont avec un débit aval (propagation), une pluie, une température ou encore une évapotranspiration avec un débit ou une hauteur d'eau, ces modèles étant presque indifféremment capables de travailler avec des hauteurs ou avec des débits.

2.2.1.1. Le neurone

Un **neurone** est un opérateur mathématique qui applique une transformation, généralement non linéaire, de ses entrées vers ses sorties. Concrètement, un neurone réalise une somme pondérée de ses entrées, qu'on appelle le **potentiel**. Les coefficients de pondération sont appelés **coefficients synaptiques**, mais du fait de l'assemblage des neurones en réseaux pour constituer des modèles, on parlera plus volontiers de **paramètres**. Le potentiel du neurone est ensuite transformé par une fonction, généralement non linéaire, qu'on appelle **fonction d'activation**, pour délivrer une sortie (Figure 28).

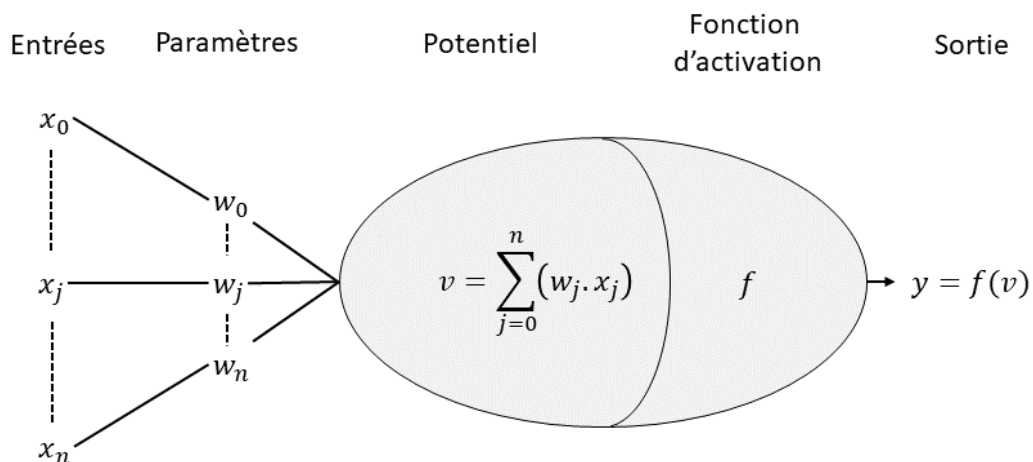


Figure 28 : représentation schématique d'un neurone formel. x est le vecteur des variables d'entrée, w la matrice des paramètres (coefficients synaptiques), $f()$ est la fonction d'activation et y la sortie

Les fonctions d'activation sont diverses. Il peut s'agir de fonctions échelon, de fonctions linéaires ou de fonctions non linéaires, comme la sigmoïde, très utilisée en hydrologie et qui présente l'avantage d'être continue, dérivable, à valeurs bornées et non locale puisqu'elle ne tend pas vers 0 quand la valeur absolue du potentiel tend vers l'infini.

2.2.1.2. Réseaux de neurones

Les neurones peuvent être assemblés en **réseaux**, qui sont une composition de fonctions neurones selon une **architecture** élaborée et en fonction de la fonction que l'on cherche à approcher.

En hydrologie, on utilise des réseaux à plusieurs **couches**, c'est-à-dire qu'ils ont a minima une couche de **neurones cachés** (dont les sorties ne sont pas la sortie du modèle) et une couche de **neurones de sortie** (dont les sorties sont la sortie du modèle).

On distingue plusieurs types de réseaux présentant des caractéristiques différentes, en particulier vis-à-vis de leur prise en compte du temps.

2.2.1.2.1. Réseaux statiques

Dans un **réseau statique**, le temps ne joue pas de rôle fonctionnel. Le modèle réalise une ou plusieurs fonctions de ses variables en principe exogènes. Si ces variables ne varient pas, les sorties du modèle ne peuvent pas varier. La propagation s'effectue des entrées vers les sorties, sans bouclage quel qu'il soit. En principe, un réseau statique n'utilise aucune information sur l'état du système modélisé mais aux variables exogènes, peut s'ajouter la sortie mesurée aux pas de temps précédents, si cette information est disponible. Dans ce cas, on parlera plus volontiers de **réseaux statiques dirigés**. Un exemple de réseau statique non dirigé est présenté dans la Figure 29 : il s'agit du perceptron multicouche.

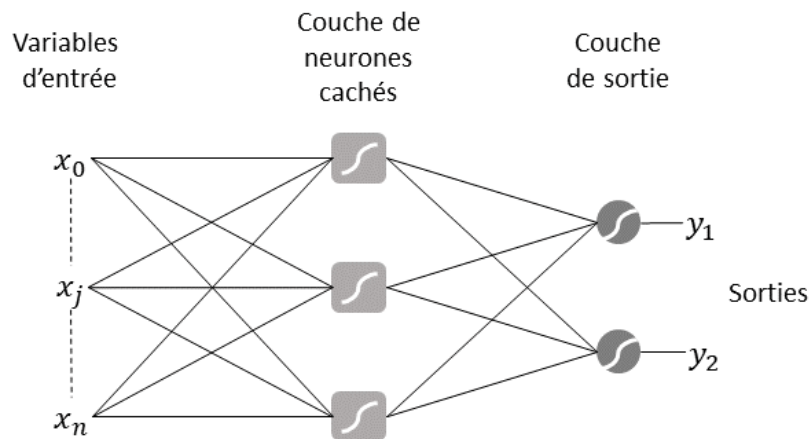


Figure 29 : représentation schématique du perceptron multicouche, ici à une couche de neurones cachés

2.2.1.2.2. Réseaux dynamiques ou récurrents

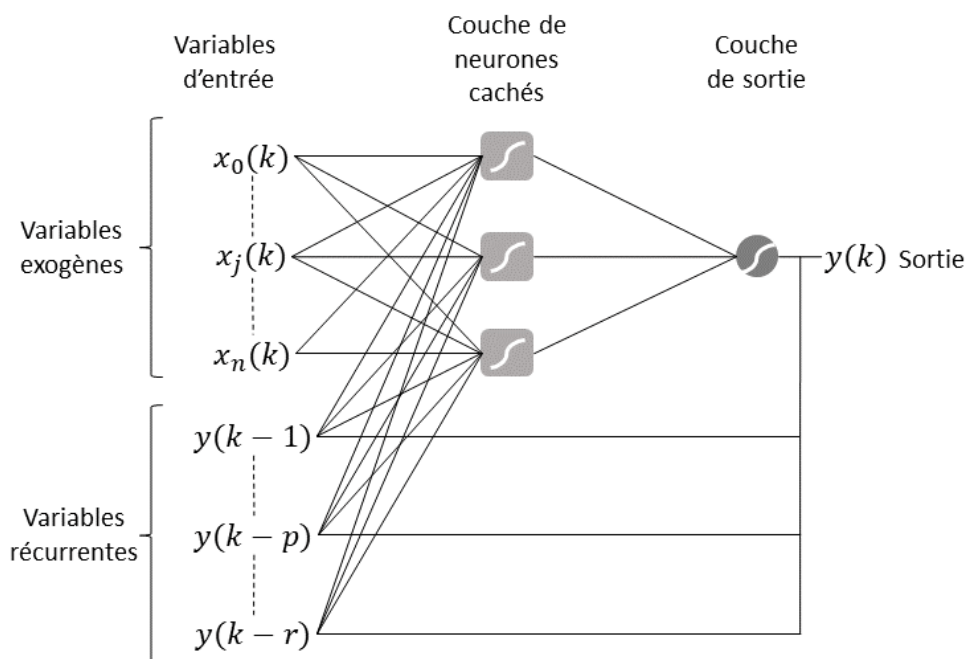


Figure 30 : représentation schématique d'un réseau de neurones récurrent d'ordre r

Un réseau de neurones est dit **dynamique** ou **récurrent** s'il réalise une ou plusieurs fonctions de ses variables exogènes (comme le réseau statique) mais aussi d'une ou plusieurs de ses variables de sorties passées. Il existe donc deux types de variables d'entrées : les variables exogènes et celles issues du réseau lui-même, qu'on appellera **variables récurrentes**. Contrairement au réseau statique, si aucune des variables exogènes ne varie, les sorties sont susceptibles de varier, à condition que les variables récurrentes varient. On parle aussi parfois de réseau bouclé, étant donné que l'on peut le représenter de manière cyclique. Ces modèles ont un **ordre** qui est égal au nombre de variables récurrentes passées utilisées.

2.2.1.2.3. Choix du type de réseau : bruit de sortie ou bruit d'état

Il existe une méthode permettant de sélectionner le type de modèle le plus pertinent en fonction des caractéristiques des données et du système considéré (Nerrand et al., 1993). Les perturbations comme le bruit ou les incertitudes, très fréquentes dans les données environnementales, peuvent affecter principalement la sortie du système (hypothèse de bruit de sortie) ou principalement l'état du système (hypothèse de bruit d'état). Dans le premier cas, on préférera utiliser un modèle récurrent ou un modèle statique non dirigé, comme dans le cas où la mesure du débit ou de la hauteur d'eau est peu fiable ou absente. Dans le second cas, on préférera le modèle statique dirigé, partant du principe que les variables exogènes ne sont pas suffisamment descriptives de l'état du système. Cette distinction s'opère principalement lorsque l'on pratique la prévision. Pour identifier un processus, on doit, justement, limiter le bruit d'état (traitement de données, optimisation du modèle, identification des sources d'incertitudes et sélection de variables) et donc on préférera utiliser des réseaux non dirigés, récurrents ou statiques.

2.2.2. Propriétés fondamentales des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont généralement mis à profit pour des tâches de modélisation, prédictive ou non, ou de classification. Compte-tenu du caractère du présent projet de recherche, nous ne traiterons pas ici cette dernière application. Seules les principales propriétés fondamentales des réseaux de neurones seront présentées ici.

2.2.2.1. L'approximation universelle

La propriété d'approximation universelle des réseaux de neurones, montrée par Cybenko (1989) et Funahashi (1989) peut être décrite comme l'ont fait Hornik et al. (1989) : « *Toute fonction bornée suffisamment régulière peut être approchée uniformément, avec une précision arbitraire, dans un domaine fini de l'espace de ses variables, par un réseau de neurones comportant une couche de neurones cachés en nombre fini, possédant tous la même fonction d'activation bornée, et un neurone de sortie linéaire.* ».

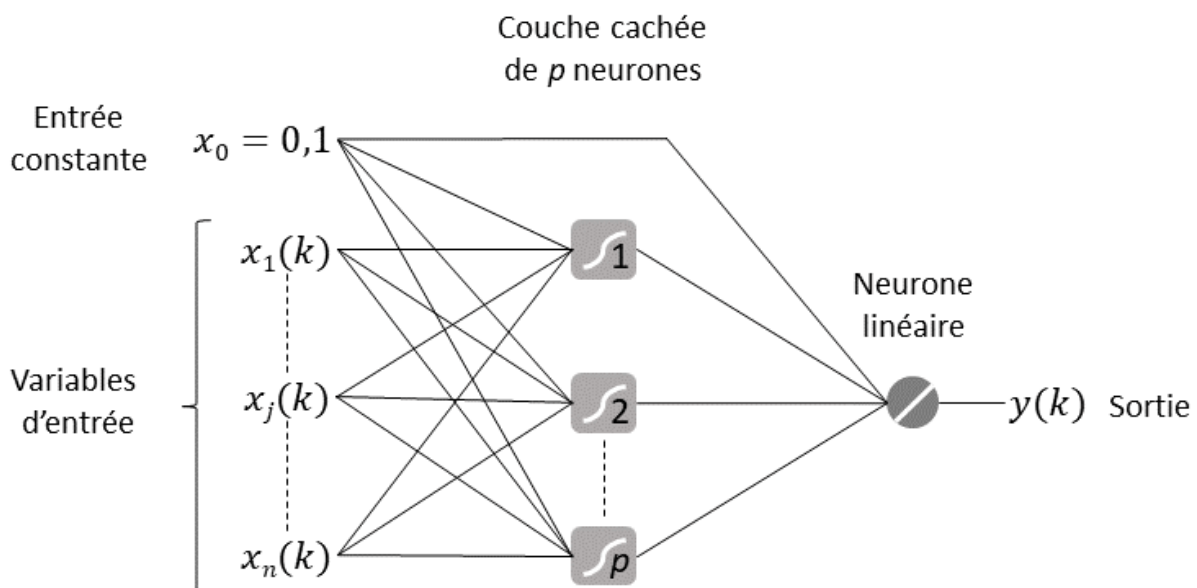


Figure 31 : représentation schématique d'un approximateur universel.

Cette propriété a été démontrée pour un type de réseau appelée « **approximateur universel** ». L'approximateur universel est un réseau comportant une couche cachée dont les neurones ont des fonctions d'activation de type sigmoïde et un neurone de sortie, généralement linéaire. Une entrée constante de faible valeur permet de garantir que la sortie puisse être non nulle même si toutes les entrées sont nulles (Figure 31). Le degré de précision de l'identification de la fonction dépend du nombre de neurones sur la couche cachée, même si une complexité trop élevée peut poser un certain nombre de problèmes que nous évoquerons dans les sections suivantes.

2.2.2.2. La parcimonie

Les réseaux de neurones présentent une seconde propriété fondamentale qui constitue un avantage par rapport aux approximateurs linéaires : la parcimonie. Ainsi, si la fonction réalisée par le modèle dépend de paramètres ajustables non linéairement, elle est plus parcimonieuse que si elle dépend linéairement de ses paramètres. Dans le premier cas, le nombre de paramètres augmente linéairement avec le nombre de variables. Dans le second, il augmente de façon exponentielle.

2.2.3. Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage consiste à calculer le vecteur des paramètres de sorte que l'on minimise l'écart entre les sorties observées et les sorties simulées. Cet écart correspond au **biais** et est mesuré par une **fonction de coût**.

2.2.3.1. Minimisation de la fonction de coût

En règle générale, en hydrologie, on utilise une fonction de coût qui représente l'écart quadratique entre valeurs observées et valeurs simulées. Pour minimiser cette fonction, on ne peut pas procéder de manière algébrique puisque la sortie du réseau de neurones dépend non linéairement de ses entrées. En revanche, on peut utiliser des méthodes itératives, notamment celles utilisant le gradient de la fonction de coût.

Une fois le gradient de la fonction de coût calculé, un algorithme itératif d'ajustement des paramètres est mis en œuvre. Ce dernier peut être du premier ou du second ordre. Dans le cas qui nous intéresse, on utilisera des méthodes du second ordre (prise en compte des dérivées secondes de la fonction de coût) qui sont réputées bien plus efficaces, bien que plus consommatrices en unités de calcul. L'une d'entre elles est souvent utilisée en hydrologie et le sera dans les présents travaux : il s'agit de la méthode de Levenberg-Marquardt, relativement avantageuse en temps de calcul, tant que le nombre de paramètres n'est pas très élevé.

2.2.3.2. Le surajustement

On cherche, par la mise en œuvre d'un réseau de neurones, la meilleure approximation de la fonction de régression (par exemple, le débit en fonction du temps) avec pour contrainte la quantité et la qualité des données d'entrée et de sortie disponibles. Il en résulte qu'un modèle trop peu complexe ne pourra pas s'ajuster correctement à la fonction de régression, induisant un biais élevé. En revanche, un modèle trop complexe sera en mesure de réduire fortement le biais, mais il va reproduire la somme du signal porté par la fonction de régression et du bruit présent dans les données, induisant une variance élevée. Il s'agit là du **dilemme biais-variance** (Geman et. al., 1992), dont il faut tout particulièrement tenir compte lorsque l'on traite de données environnementales, généralement très bruitées. Cet élément est particulièrement important, puisqu'un modèle qui a appris le bruit présent dans les données présente généralement des capacités de généralisation à d'autres périodes ou d'autres sites très faibles.

En pratique, on doit concevoir des modèles de complexité croissante et parvenir à estimer l'erreur de généralisation sur chacun d'entre eux. On sélectionnera alors le modèle qui a la meilleure capacité de généralisation ; il s'agira de celui qui présente la complexité optimale.

2.2.3.2.1. Estimation de l'erreur de généralisation : la validation croisée

La différence entre l'erreur en apprentissage et l'erreur de généralisation tend à croître avec la complexité. Ainsi, en évaluant la performance d'un modèle sur l'ensemble d'apprentissage, on s'expose

à ne pas tenir compte du surajustement. Pour pallier ce problème, la **validation croisée** (Stone, 1974) autorise une estimation pertinente de l'erreur de généralisation en soumettant le modèle à de multiples validations sur différentes portions de la base de données.

Le principe en est décrit dans la Figure 32. Il consiste à diviser l'ensemble d'apprentissage en un certain nombre n de sous-ensembles cohérents sur le plan du processus modélisé. On effectue alors un apprentissage sur $n-1$ sous-ensembles n fois, en excluant à chaque fois un sous-ensemble différent. Le sous-ensemble restant sert à évaluer la performance à chaque permutation. La moyenne et/ou la médiane des n performances représente le **score de validation croisée**. C'est cette performance qu'il faut maximiser pour garantir une complexité optimale mais surtout une robustesse maximale. En effet, on choisit ainsi le modèle qui, quelles que soient les données qui lui sont présentées, présente, en moyenne, la meilleure performance. Cette procédure est donc particulièrement utile, bien qu'elle soit très consommatrice en temps de calcul.

Si l'on avait sélectionné le modèle seulement sur un sous-ensemble, on se serait exposé à ce que le modèle soit particulièrement performant sur cet ensemble et non sur les autres, et donc à sélectionner un modèle peu robuste. Inversement, on aurait pu rejeter un modèle relativement performant sur une mauvaise base.

2.2.3.2.2. L'arrêt précoce

Nous l'avons vu, la complexité d'un modèle doit être limitée autant que faire se peut au strict nécessaire. Au-delà de la complexité du modèle *sensu stricto*, on doit aussi limiter le nombre de présentations. Pendant la phase d'apprentissage, on présente les données au modèle pour qu'il s'ajuste au mieux aux données. Si on lui présente ces données un trop grand nombre de fois, il va finir par « apprendre par cœur » et dégrader sa capacité de généralisation. On conserve donc, à part de l'ensemble d'apprentissage, un ensemble de données appelé **ensemble d'arrêt** sur lequel on évalue la performance. La présentation pour laquelle on atteint une performance optimale est retenue pour arrêter l'apprentissage. Cela équivaut à introduire un terme de pénalisation des paramètres (Sjoberg et al. 1995).

E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	
V	A	A	A	A	S	T	S_1
A	V	A	A	A	S	T	S_2
A	A	V	A	A	S	T	S_3
A	A	A	V	A	S	T	S_4
A	A	A	A	V	S	T	S_5

$\left. \begin{matrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \end{matrix} \right\} S_v$

Figure 32 : représentation schématique de la validation croisée ; soit un ensemble de données divisé en 7 sous-ensembles. 5 sont consacrés à la validation croisée (1 événement en validation V à chaque expérience et 4 événements en apprentissage A) donnant 5 scores dont on fait la moyenne et/ou la médiane pour obtenir le score de validation croisée S_v ; 1 est consacré à l'arrêt précoce (S) et un dernier est consacré à tester le modèle (T) sur un ensemble de données inconnu.

2.2.3.2.3. La sélection de variables

Comme pour tout modèle statistique, la sélection des variables est une étape particulièrement critique. Pour expliquer un processus mesuré (sortie du système), il faut trouver quelles sont les variables qui en sont explicatives. Il faut aussi trouver, dans le cadre, de séries temporelles de données, la durée idéale de la chronique utile au modèle.

PARTIE I : Présentation des sites d'étude et compléments bibliographiques

Pour ce faire, des méthodes statistiques très simples existent. Elles permettent de sélectionner les variables d'entrée qui sont réellement explicatives, en examinant, par exemple, leur corrélation croisée avec la sortie. Au préalable, ces variables sont sélectionnées par l'expertise du modélisateur.

On comprend vite que la multiplication des variables d'entrée va augmenter la complexité du modèle. Il faut ainsi ne sélectionner que celles qui sont réellement utiles au modèle. Ce processus d'étude et de sélection des données sera décrit dans la section II 3.1.4.

2.2.4. Applications à l'hydrologie

Grâce à leurs propriétés d'approximation universelle et de parcimonie, les réseaux de neurones ont trouvé de nombreuses applications en hydrologie. Ils permettent aussi de s'affranchir d'une compréhension explicite du système modélisé, ce qui constitue un avantage considérable pour les systèmes les plus complexes (karsts, crues éclair, glaciers, tourbières).

Pour la prévision des débits, leur caractère spontanément prédictif (ils ne requièrent pas de prévision de leurs entrées pour fournir une prévision de leurs sorties) a rapidement été apprécié (Sahoo et al., 2006, Corzo et al., 2007, Toukourou et al., 2009, Araghinejad et al., 2011, Kong A Siou et al., 2012, Artigue et al., 2012).

Plus récemment, l'identification de processus internes au système modélisé a été rendue possible par la génération de prévisions de bonne qualité, l'augmentation des capacités de calcul et surtout, par l'étude détaillée des poids attribués aux entrées par l'apprentissage. La boîte noire devient alors grise, voire transparente, et l'on valide ce qui était une hypothèse envisagée de longue date par les auteurs spécialisés dans ce domaine : les bonnes performances obtenues par ces modèles tiennent au développement, par le modèle, d'une connaissance, plus ou moins explicite, du fonctionnement physique du système modélisé. L'extraction de cette connaissance devient alors un enjeu dans les systèmes dont le fonctionnement est, initialement, peu connu (Kong A Siou, 2012).

PARTIE II

Volet Hydrologie

L'objectif de ce volet vise à établir un bilan hydrologique sur les sites d'étude afin de quantifier le soutien d'été. Cette partie contient les éléments suivants :

1. Partage de données et suivis existants	p44
1.1. Tourbière de Luitel	p44
1.2. Tourbière de Frasné	p44
1.3. Autres projets en lien	p45
2. Instrumentation et mesures pour le suivi hydrologique	p46
2.1. Tourbière de Luitel	p46
2.2. Tourbière de Frasné	p49
3. Analyse statistique des données hydrologiques	p51
3.1. Tourbière de Luitel	p51
3.2. Tourbière de Frasné	p74
4. Modélisation du rôle de soutien d'été	p75
4.1. Modèles réservoirs – modélisation du soutien d'été au Luitel	p75
4.2. Réseaux de neurones	p85

1. Partage de données et suivis existants

1.1. Tourbière de Luitel

Les activités scientifiques liées au projet ZHTB ont fait l'objet d'une demande d'autorisation préfectorale pour la réalisation de travaux ou d'études dans la réserve naturelle nationale du lac de Luitel. Cette autorisation cadre de manière précise : 1) les activités de terrain (déplacement, nombre de personnes, mesures prélèvements...) ; 2) le traitement et l'analyse des prélèvements ; 3) l'analyse des données et la synthèse des résultats.

La bibliographie et les données de la RN Luitel sont donc utilisées dans le cadre du projet ZHTB. Il s'agit principalement de données météorologiques, hydrologiques (niveau de nappe, débit en ruisseau), géophysiques et écologiques. Une partie des données (météorologiques et hydrologiques) est acquise par l'Université de Grenoble – IGE. L'ensemble de ces données sont présentées de manière rapide dans la partie concernant la présentation du site de Luitel (Partie II 1.1 Tourbière de Luitel p13). De plus, les données hydrologiques et météorologiques de Luitel ont été largement exploitées dans le volet Hydrologique (Partie II) du projet ZHTB notamment pour les travaux de modélisation (Partie II 4. Modélisation du rôle de soutien d'étiage, p75) et d'analyses statistiques (Partie II 3. Analyse statistique des données hydrologiques, p51). La Partie III (Volets géophysique, pédologique géochimie) utilise non seulement les données hydrologiques mais aussi d'autres types de données disponibles (ex : carte de végétation, carottes de tourbes, datation, traçage...).

1.2. Tourbière de Frasne

Les activités scientifiques liées au projet ZHTB ont été intégrées dans le plan de gestion de la tourbière de Frasne. La bibliographie et les données de la tourbière de Frasne sont donc utilisées dans le cadre du projet ZHTB. Il s'agit principalement de données météorologiques, hydrologiques (niveau de nappe, débit en ruisseau), géophysiques, géochimiques et écologiques. L'ensemble de ces données sont présentées de manière rapide dans la partie concernant la présentation du site de Frasne (Partie II 1.2 Tourbière de Frasne, p28). À l'heure actuelle, le travail étant moins avancé sur Frasne que sur Luitel, ces données n'ont pas encore entièrement été traitées et analysées. Elles le seront dans la phase 3 en lien avec les 4 volets du projet ZHTB (hydrologique, géophysique, pédologique géochimie).

Une partie de l'instrumentation a été mise en place lors de l'ANR Peatwarm (UMR Chronoenvironnement, Université de Franche-Comté). Une base de données est en cours de construction dans le cadre du SNO Tourbières (Service National d'Observation Tourbières (SNO Tourbières) - impact des changements globaux sur la fonction puits de carbone des tourbières tempérées.

Les activités scientifiques (stage de master, projet « Critical Peat » et thèse associée Alexandre Lhosmot) de l'Université de Besançon (G. Bertrand) sont coordonnées avec celles du projet ZHTB : analyse statistique des données hydrologiques, analyses géochimiques...

Une partie importante de l'instrumentation et du suivi est réalisé en régie par le Smix Haut-Doubs Haute-Loue dans le cadre de la RNR Frasne-Bouverans (plan de gestion de la RNR) et du Life Tourbières du Jura (suivi piézométrique, analyses physico-chimiques, pédologie, botanique...). Le Syndicat, avec l'aide de bureaux d'étude (LIN'eco particulièrement) et d'universitaires (V. Bichet et C. Bertrand) et la collaboration du SNO et de l'université de Besançon, a une très bonne connaissance du site et a avancé des hypothèses sur les modalités de formation de ce complexe et notamment de la tourbière active.

1.3. Autres projets en lien

Le projet ZHTB est en lien avec le Projet SoHUMID (2018-2019) porté par le BRGM (C. Hauterive) et l'AFB (C. Magand). L'objectif de ce projet vise à construire une méthode d'évaluation de la contribution des eaux souterraines au fonctionnement des zones humides. Ce projet porte sur 12 sites de zones humides (plus 8 en réserve) répartis sur tous les grands bassins versants de France métropolitaine. Le site de Frasne fait partie des sites sélectionnés.

Ce projet est organisé en trois volets : hydrologie, écologie, pédologie. À partir de données existantes, il vise à mettre en place des indicateurs simples permettant de caractériser les zones humides, ou secteurs de zone humides, sous l'influence des eaux souterraines.

2. Instrumentation et mesures pour le suivi hydrologique

2.1. Tourbière de Luitel

Le dispositif de suivi hydrologique existant sur la tourbière de Luitel inclus : 1) une station météorologique ; 2) 1 seuil jaugé aval avec une sonde enregistreuse (pression, température) ; 3) 7 sondes enregistreuses (pression, température) dans les piézomètres (Figure 33).

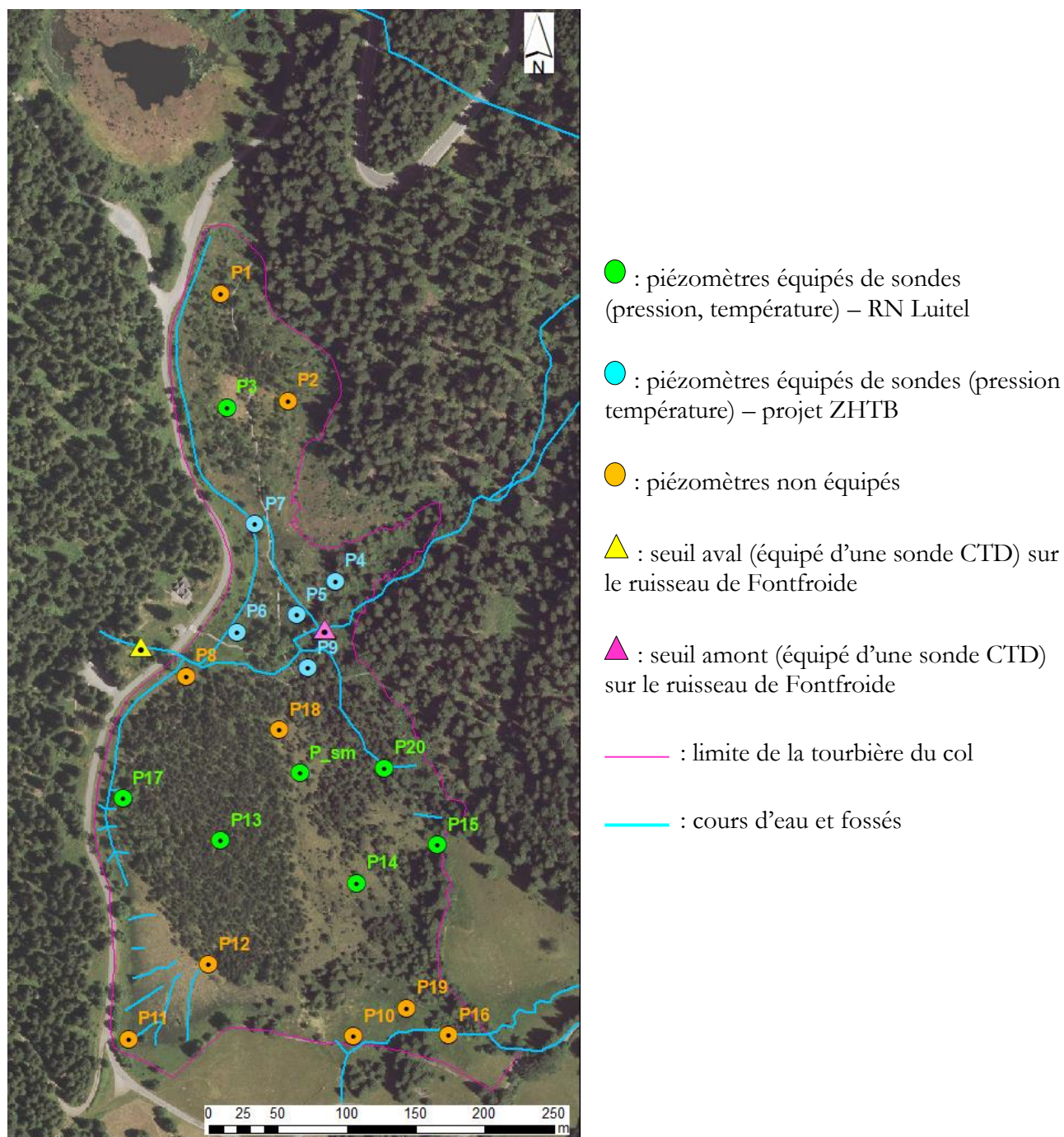


Figure 33 : Instrumentation hydrologique au Luitel

Ce dispositif a été complété par :

- 1 seuil jaugé amont équipé d'une sonde CTD (avril 2018) ;
- 1 seuil jaugé aval équipé d'une sonde CTD en aval du seuil existant (avril 2018) ;
- 5 sondes (pression, température) en piézomètres (novembre 2018).

Les seuils implantés ont été dimensionnés pour mesurer de faibles hauteurs d'eau et donc de faibles débits.

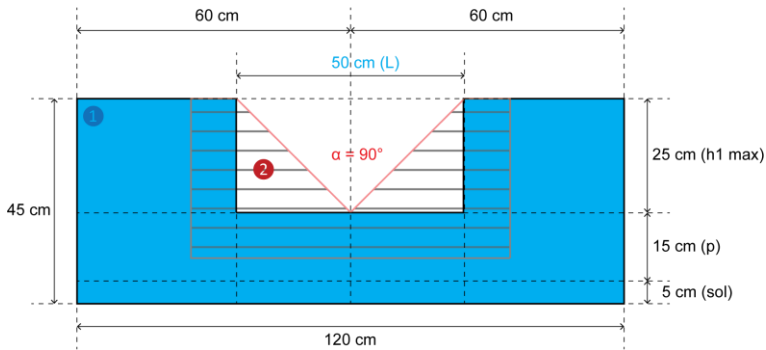


Figure 34 : Vue en plan des seuils jaugés installés au Luitel

- ① Base fixe (trait noir fond bleu) - Déversoir rectangulaire avec contraction latérale de largeur d'écoulement de 50cm [les débits calculés sont compris entre 3 et 90l/s] ;
- ② Partie amovible (trait rouge fond hachuré gris) - Déversoir à échancrure triangulaire - Déversoir partiellement contracté (angle de 90°) [les débits calculés sont compris entre 1,3 et 30l/s]

En première approximation, la transformation hauteur/débit est calculée à l'aide la formule de Thomson :

$$Q = 1,4 h^{5/2}$$

Avec :

Q : débit en m³/s
h : hauteur d'eau en m

La Figure 35 présente les débits calculés (Q) à partir des hauteurs d'eau enregistrées par les sondes pour les seuils amont et aval du ruisseau de Fontfroide pour la période d'avril à novembre 2018 au pas de temps journalier (moyenne des données horaires). Elle présente aussi les valeurs de température de l'eau (°C) et de conductivité électrique pour les 2 seuils.

Les données présentées sur la Figure 35 montrent d'ores et déjà quelques éléments intéressants :

- ① : On observe une atténuation du pic de crue à l'aval par rapport à l'amont ;
- ② : On observe un étiage prolongé, mais avec des débits très faibles, le débit amont est supérieur au débit aval ;
- ③ : On observe un dénoyage de la sonde aval avec persistance d'un très faible sous-écoulement sous le seuil.

Ces premiers éléments, notamment les points 1 et 2, restent à expliquer. Les données en cours d'acquisition permettront constater si oui ou non les tendances observées se poursuivent dans le temps.

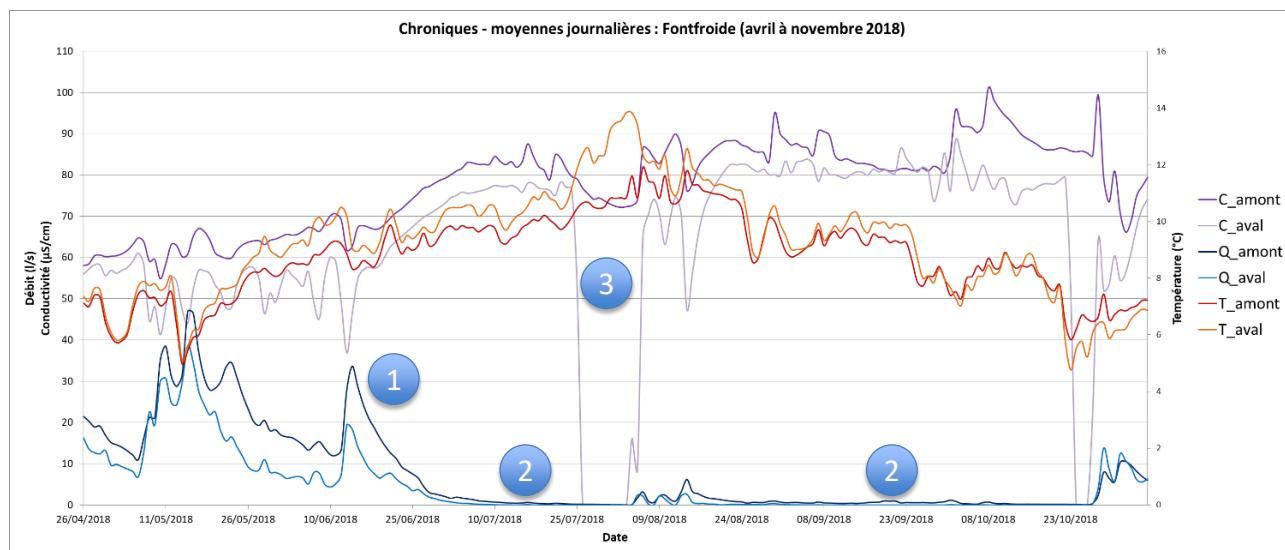


Figure 35 : Données acquises avec les sondes au niveau des seuils amont et aval du ruisseau de Fontfroide

Ces premiers résultats vont dans le sens du rôle présumé d'atténuation des crues et de soutien d'étiage des zones humides, même si ce rôle semble faible voire très faible à l'échelle d'un petit site d'une dizaine d'hectares.

Ces données ont été analysées dans la Partie II 3. Analyse statistique des données hydrologiques, p51.

2.2. Tourbière de Frasne

Le dispositif de suivi hydrologique existant sur la tourbière de Frasne inclus : 1) une station météorologique ; 2) 1 section jaugée à l'exutoire de la tourbière avec une sonde CTD ; 3) 14 sondes enregistreuses (pression, température) dans les piézomètres. Ce dispositif est en cours de modification, les informations recueillies dans les flutes de pan n'ont pas permis d'identifier plusieurs nappes. Dans un souci de simplification du dispositif, deux des trois sondes de chaque flute de pan seront retirées.

Ce dispositif a été complété par l'installation de 4 sondes CTD (Figure 36) :

- 2 dans chacun des 2 ruisseaux à l'amont de la confluence formant l'exutoire (juin 2018) ;
- 1 dans la doline du Creux au lard (juin 2018) ;
- 1 à l'exutoire en doublon de la sonde existante au niveau la section jaugée (mai 2019).

La sonde existante au niveau de la section jaugée mesure les hauteurs d'eau à l'exutoire de la tourbière. Une courbe de tarage permet de transformer ces hauteurs en débits. Cette sonde mesurant aussi la conductivité électrique, il était prévu d'estimer les débits des 2 tributaires de l'exutoire à l'aide d'une équation de mélange. Toutefois, les valeurs de conductivité en basses-eaux de cette sonde étant fortement décorrélées de celles des 2 tributaires, cela n'a pas été possible. Pour tenter de régler le problème, nous avons donc installé une nouvelle sonde en doublon de même modèle que celle des 2 tributaires.

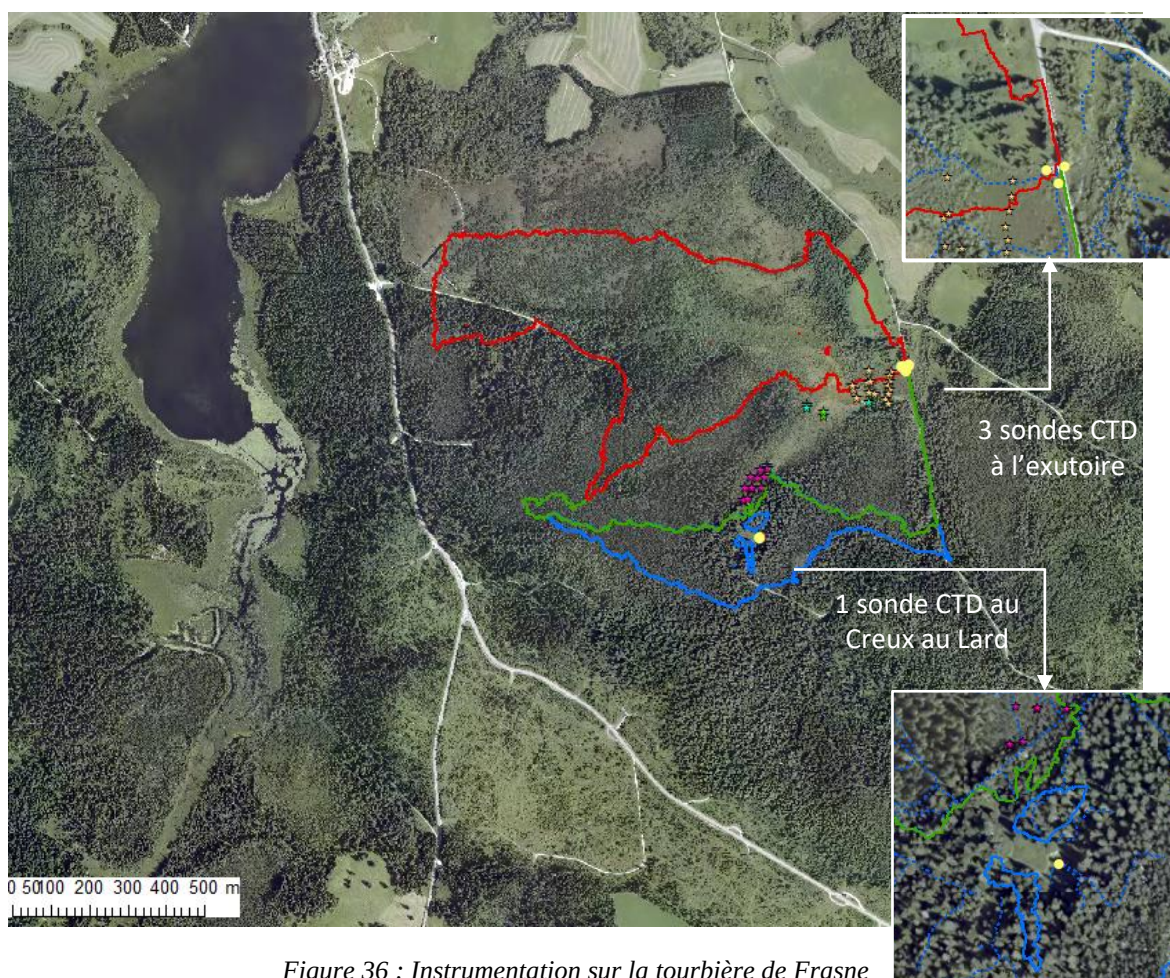


Figure 36 : Instrumentation sur la tourbière de Frasne

Les bassins versants estimés sont représentés par des polygones de couleur rouge, vert et bleu. Les piézomètres sont indiqués par des étoiles de couleur. Les sondes CTD implantées par des cercles jaunes.

PARTIE II – Volet hydrologie

La sonde CTD installée au Creux au Lard a permis d'enregistrer un épisode de remplissage/vidange de la doline lors d'un fort épisode pluvieux en juillet 2018.

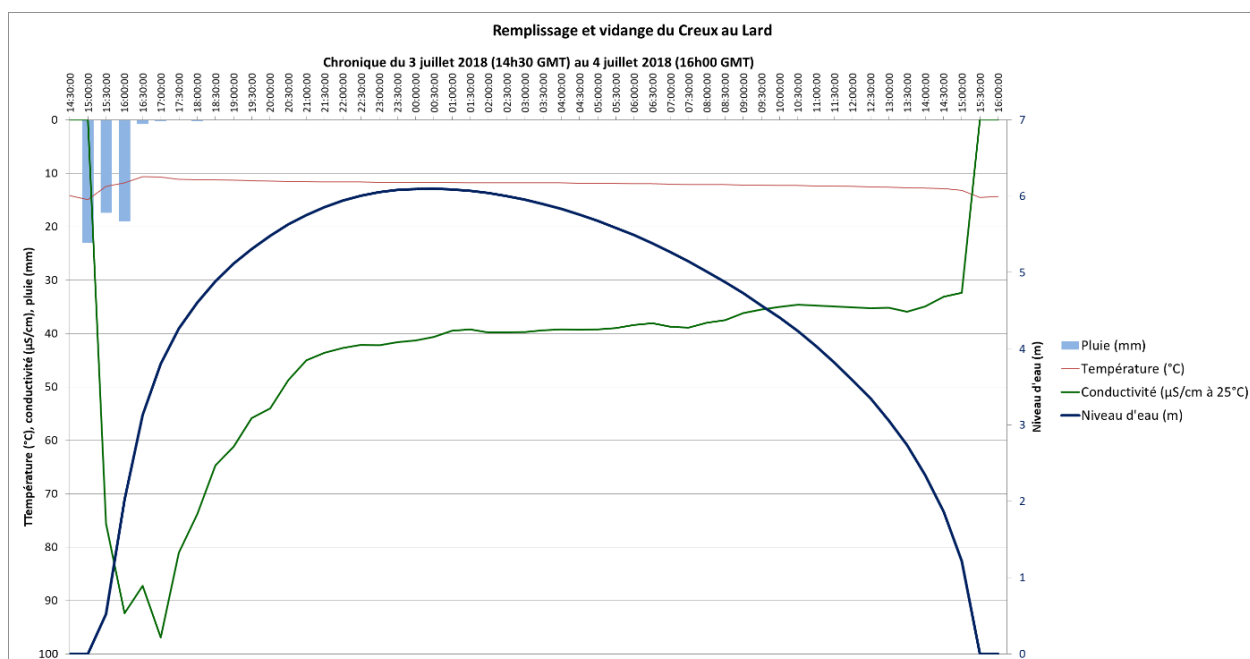


Figure 37 : Remplissage/vidange de la doline du Creux au lard



Novembre 2017 (G. Magnon)



Mars 2017 (F. Paran)

À l'heure actuelle, le travail étant moins avancé sur Frasnne que sur Luitel, ces données n'ont pas encore entièrement été traitées et analysées. Elles le seront dans la phase 3 du projet.

3. Analyse statistique des données hydrologiques

3.1. Tourbière de Luitel

3.1.1. Principe

Il s'agit ici de décrire une série chronologique, d'en identifier les composantes et de chercher ensuite à mettre celles-ci en relation avec les mécanismes de fonctionnement d'un système hydrologique.

L'organigramme de la Figure 38 décrit les principales étapes appliquées en vue de l'analyse statistique des données : i) organisation des données (filtrage, complétion), ii) analyses simples iii) analyses croisées. L'organisation des données consiste en la construction d'une base de données robuste où les données sont regroupées à un même pas de temps (ici horaire et journalier), filtrées, et complétées (dans la mesure du possible). Les analyses statistiques peuvent être effectuées dans le domaine temporel (corrélations et statistiques descriptives) ou le domaine fréquentiel (spectre, et fonction de transfert).

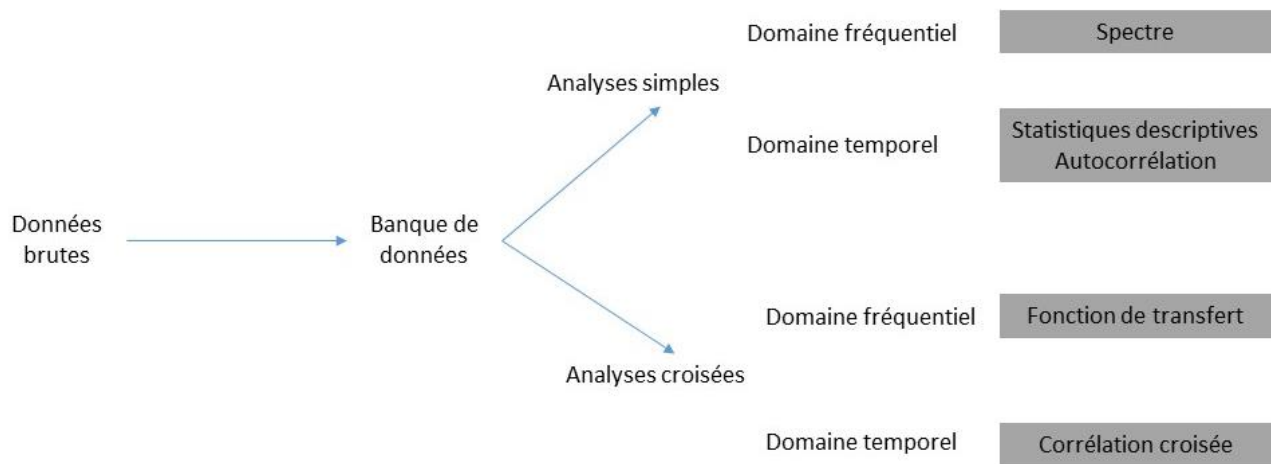


Figure 38. Organigramme des analyses statistiques

3.1.2. Objectifs

L'objectif général de l'analyse statistique est d'étudier l'ensemble des données avec les différentes méthodes statistiques à disposition afin de :

- Caractériser le comportement hydrologique général du site ;
- Révéler, si possible, des comportements spécifiques au site et non visibles en première approche ;
- Préparer les modélisations statistiques par réseaux de neurones (sélection des cibles de modélisation, sélection de variables)

Ces analyses ont été réalisées sur les données disponibles présentées dans la Figure 17.

3.1.3. Matériel et méthode(s)

3.1.3.1. Indicateurs statistiques hydrologique : le coefficient d'écoulement

Pour un système hydrologique, le coefficient d'écoulement à un instant t déterminé sur une période T est le rapport entre la quantité d'eau écoulee et la quantité d'eau précipitée. Ce coefficient dépend de la teneur en eau dans le sol, des caractéristiques topographiques du bassin versant (pente, longueur, microtopographie) ou encore de la végétation.

Le coefficient d'écoulement est défini :

$$C_{E,T}(t) = \frac{V_{\text{écoulé}}(t,T)}{P(t,T) \times T_{BV}}$$

Où $P(t,T)$ représente la pluie cumulée au temps t pour la période T (m), T_{BV} la taille du bassin (m^2), et $V_{\text{écoulé}}(t,T)$ le volume écoulé au temps t pour la période T (m^3).

Le volume écoulé se calcule à partir des mesures de débit. Un coefficient supérieur à 1 témoigne d'un excès d'écoulement par rapport aux précipitations (vidange d'un barrage, turbinage, soutien d'étiage naturel ou non, fonte de neige, fonte de glacier, etc.). Un coefficient inférieur à 1 témoigne d'un fonctionnement classique dans lequel une partie des précipitations est stockée et/ou évapotranspirée.

3.1.3.2. Étude des débits classés

Les courbes de débits classés (Figure 39) se construisent en classant les débits et en calculant les percentiles associés à ce classement. Pour un pourcentage donné (x), on associe le débit de dépassement associée (tel que $x\%$ des débits observés soient supérieurs à ce débit). Graphiquement, les pourcentages sont notés sur l'axe des abscisses et les débits de dépassement sur l'axe des ordonnées. Les deux axes sont parfois en échelle logarithmique pour pouvoir visualiser des valeurs très différentes. Le graphe associé permet de mettre en évidence les débits anormalement faibles ou élevés, et peut être « découpé » en droite utilisées en vues d'interprétation. Une rupture de pente observée correspond à une modification du fonctionnement. Ainsi, cette représentation permet d'identifier certains événements tels que des trop-pleins, des fuites. Le graphe permet également de caractériser un débit d'étiage. Ainsi, Q_{90} , correspondant à la valeur pour laquelle 90% des débits observés sont supérieurs, permettra de définir le débit d'étiage.

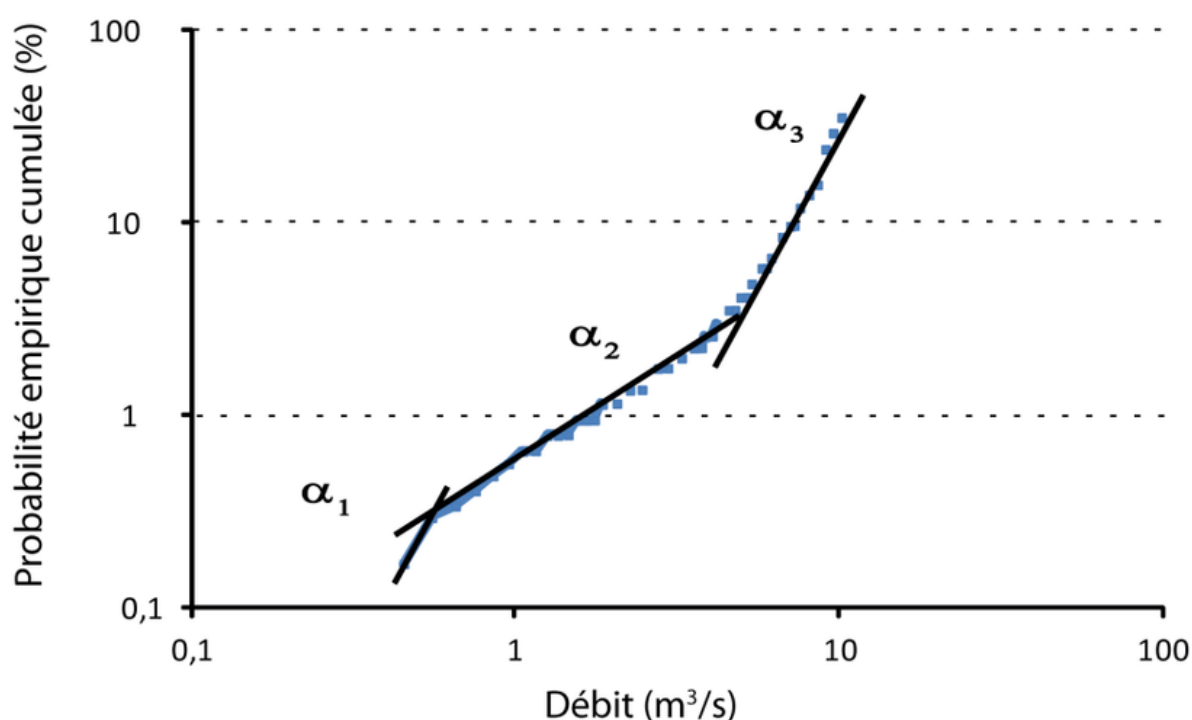


Figure 39. Exemple de courbe des débits classés (Kong a Siou, 2011)

3.1.3.3. Analyse temporelle

3.1.3.3.1. Corrélogramme simple

L'autocorrélogramme (ou corrélogramme simple) met en évidence la dépendance des événements d'une même série entre eux pour des intervalles de temps de plus en plus grands. Il traduit par conséquent la

mémoire d'un système. En effet, plus un événement, pris un instant donné, aura une influence h à long terme, plus lente sera la décroissance du corrélogramme.

Cette corrélation r_x est définie comme :

$$r_x(k) = \frac{Cov_{xx}(k)}{\sigma_x \sigma_x}$$

$$Cov_{xx}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n-k} (x_i - \bar{x}) \cdot (x_{i+k} - \bar{x})$$

Où k est le décalage temporel, x la chronique, σ_x son écart-type, $Cov_{xx}(k)$ correspond à un calcul de covariance entre x et la série x décalée dans le temps de k .

Appliqué à des débits, l'autocorrélogramme permet de définir l'effet mémoire d'un système (Mangin, 1975) qui traduit l'inertie du système. Ce dernier est le temps nécessaire pour atteindre le seuil d'autocorrélation en dessous duquel celle-ci est négligeable. Ce seuil d'autocorrélation est défini sous certaines hypothèses statistiques qui ne sont pas toujours vérifiables. Ainsi, plusieurs études préconisent d'utiliser une valeur de 0,2 (Mangin, 1984, Larocque et al., 1998). C'est donc cette valeur qui sera utilisée dans ce rapport. Un effet mémoire long peut traduire la présence de réserves d'eau importantes. Mangin (1984) a proposé l'application de l'autocorrélation à des systèmes karstiques dans les Pyrénées.

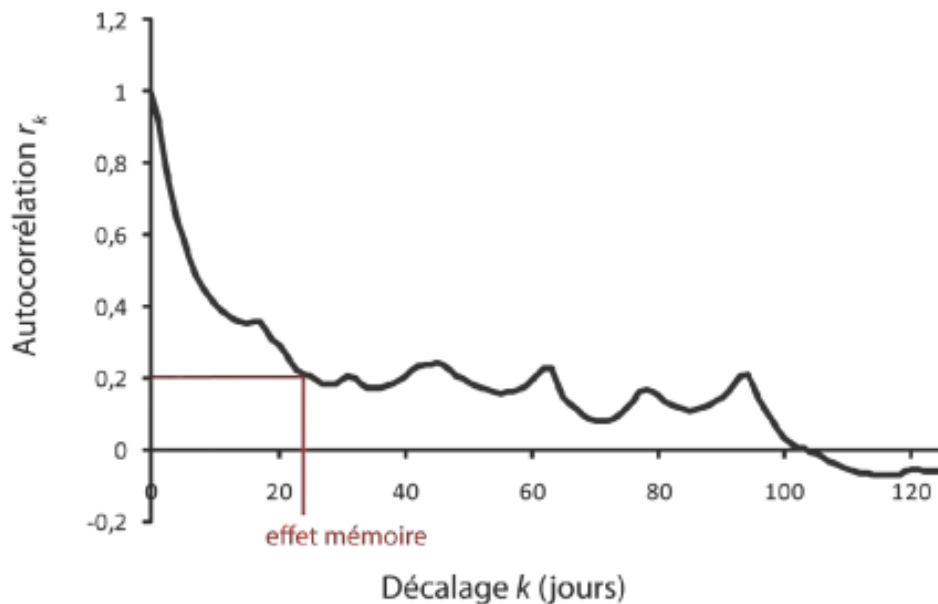


Figure 40. Autocorrélogramme d'un signal de débit (Kong a Siou, 2011)

3.1.3.3.2. Corrélogramme croisé

La corrélation croisée (Figure 41) s'applique à deux séries chronologiques dont on veut voir la dépendance temporelle. La fonction de corrélation croisée entre deux séries x et y se calcule suivant la formule suivante :

$$R_{xy}(k) = \frac{Cov_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y}$$

Où k est le décalage temporel, x la chronique, σ_x écart-type de x , σ_y écart-type de y , $Cov_{xy}(k)$ correspond à un calcul de covariance entre x et la série y décalée dans le temps de k .

En déterminant la valeur de k qui maximise la corrélation entre les deux séries, cette méthode permet d'estimer le temps de réponse d'un système hydrologique. En considérant que les variables sont

décorrélées pour un seuil théoriquement et statistiquement défini, on peut définir une autre valeur k pour laquelle les deux séries sont décorrélées. Ce concept est le pendant de l'effet mémoire appliqué à deux séries distinctes. Nous le nommons également effet mémoire. Dans le cas d'une étude pluie-débit, cela permet de déterminer la taille de l'historique de pluviométrie influençant le débit courant.

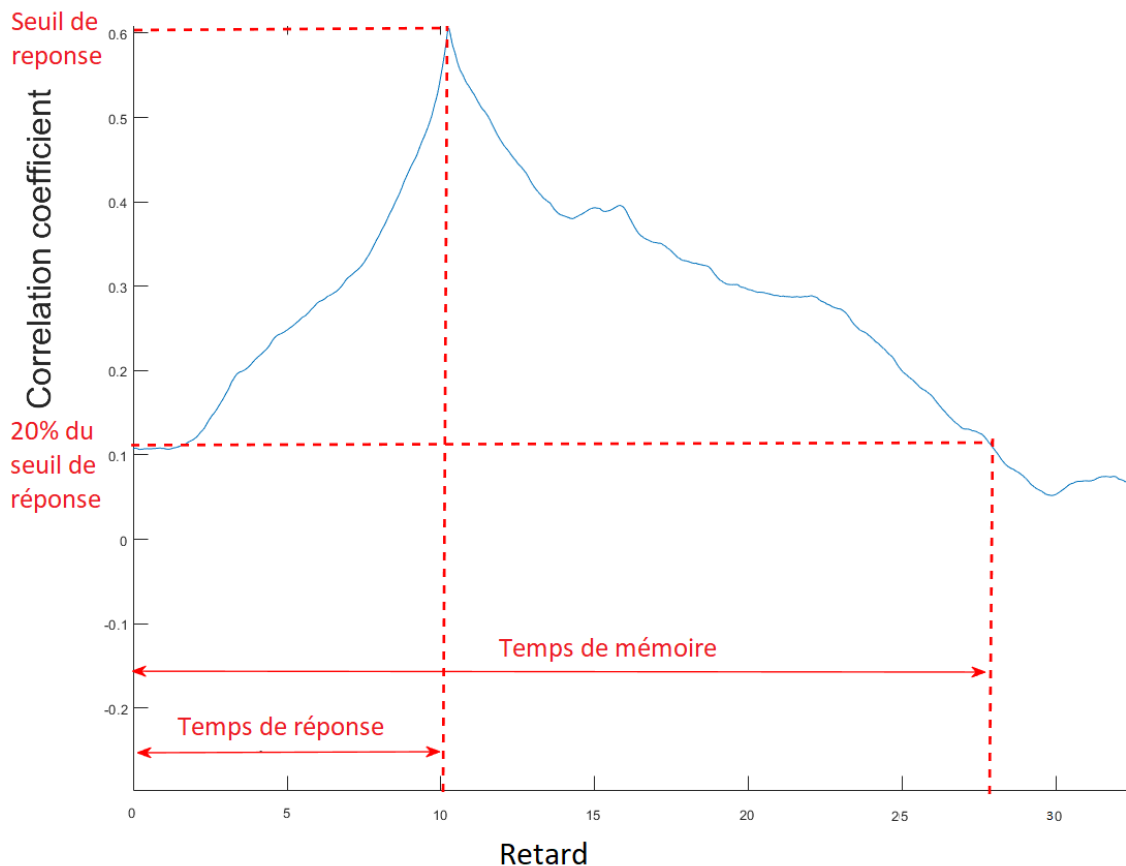


Figure 41. Exemple de corrélogramme croisé pluie-débit (d'après Kong a Siou et al., 2011)

3.1.3.4. Analyse fréquentielle

Les analyses spectrales sont complémentaires aux analyses de corrélation. Elles permettent de révéler des caractéristiques présentes dans une série chronologique masquées par le bruit du signal. L'approche spectrale est duale de l'approche corrélatrice. La fréquence correspond à l'occurrence de phénomènes, de processus, à différentes échelles de temps de période. Les fréquences observées sont reliées au temps par la relation $f=1/T$. Elle exprime dans le domaine fréquentiel ce dont le corrélogramme rend compte dans le domaine temporel. Repérer des phénomènes par rapport aux fréquences facilite souvent l'interprétation. L'objectif de l'analyse spectrale est d'identifier des phénomènes périodiques (analyse simple) et de mettre en évidence les transformations appliquées par le signal d'entrée (analyse croisée).

3.1.3.4.1. Spectre simple

Le spectre permet d'étudier les périodicités. Plus un phénomène est présent dans le signal, avec une puissance forte, plus la valeur du spectre sera élevée pour la fréquence correspondante. À l'inverse une faible valeur du spectre traduit un phénomène très peu intense. Parmi les fréquences particulières, il est important de distinguer i) le temps de régulation correspondant à la moitié de la valeur du spectre de puissance à la fréquence ii) la fréquence de coupure F_{cm} comme étant la fréquence à partir de laquelle le spectre devient négligeable (inférieur à 1). Sur la base de ces deux indices, Mangin (1984) a proposé une classification des karsts.

La visualisation du spectre en échelle logarithmique (Log-Log) permet d'étudier le type de bruit correspondant à un signal donné. L'étude du type de bruit a pour but d'appréhender l'éventuelle structuration du signal. La pente observée permet de caractériser le type de bruit (Hausdorff et al.,

1996). Ainsi, un signal avec un bruit de caractère aléatoire aura une pente nulle (bruit blanc). Une pente négative signifie que le système est intégrateur.

Le calcul du spectre peut être obtenu via le théorème de Wiener-Kinchine, qui utilise la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation de ce signal :

$$S(f) = 2 * (1 + 2 * \sum_{k=1}^{k=m} D_k r_k \cos(2\pi f k))$$

Où m est la troncature, f la fréquence considérée, r_k le coefficient d'autocorrélation et D_k une fonction de pondération ; pour limiter les erreurs introduites par le fait que le calcul de $S(f)$ est effectué sur une durée finie.

La fonction de pondération de Turkey, adaptée aux signaux hydrologiques pour la faible perte d'information associée à son utilisation, est utilisée dans ce rapport :

$$D_k = (1 + \cos \frac{\pi k}{m})/2$$

Dans cette étude statistique, nous nous limitons à calculer le spectre pour une troncature faible (150 jours) et une troncature élevée (~1400 jours). La troncature la plus faible sert à visualiser une courbe « lissée » qui ne laisse apparaître que les périodicités majeures sans représenter les fréquences les plus basses et la variabilité interannuelle, tandis que la troncature la plus grande est utilisée pour visualiser les basses fréquences.

3.1.3.4.2. Fonction de transfert

Soit f la transformation associée à un système transformant une entrée x en y . La fonction de transfert correspond à la transformation opérée par ce système dans le domaine fréquentiel. C'est la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle. Comme pour l'analyse simple, la relation de Wiener-Kinchine permet de passer du domaine temporel au domaine fréquentiel (spectral). La fonction de transfert permet d'appréhender le type de filtrage opéré par le système. Elle décrit donc les opérations de filtrage effectuées par le système. À chaque abscisse, l'ordonnée indique la puissance de l'onde sinusoïdale de fréquence. Cela permet donc de distinguer les fréquences que le filtre amplifie et celles qu'il atténue. La limite entre les fréquences amplifiées et atténuées correspond à la fréquence de coupure F_c qui se traduit par l'apparition d'une ou plusieurs pentes. Il est aussi possible de déterminer l'ordre du filtre (lié à l'intensité de la décroissance des hautes fréquences) et d'autres fréquences de coupure par d'éventuelles ruptures de pentes. Dans le cas d'une relation pluie-débit, le passage du domaine temporel au domaine fréquentiel, c'est-à-dire de la réponse impulsionnelle à la fonction de transfert, offre une vision complémentaire de cette relation.

3.1.3.5. Méthode de prétraitement des signaux

3.1.3.5.1. Introduction

Les données fournies par les différents capteurs sont entachées d'erreurs et de bruit, ce qui est classique pour des données environnementales. Celles-ci peuvent être attribuées à la précision des capteurs (généralement fournie par le constructeur) ou à un dérèglement ou une défaillance des dispositifs. Ainsi les données brutes générées apparaissent bruitées (Figure 42a), avec des dysfonctionnements locaux (Figure 42b) et avec des lacunes (périodes où le capteur n'a pas fonctionné) (Figure 42c). Pour remédier à ces écueils, il faut donc filtrer les données de façon à les nettoyer (réduire les irrégularités et singularités), et les compléter.

3.1.3.5.2. Méthodes de filtrage et complétion de données

De nombreuses méthodes de filtrage des données permettent de réduire le bruit des données. Nous citons dans ce rapport seulement celles qui ont été utilisées au cours de cette étude. Le filtrage par écrêtement des valeurs extrêmes consiste à éliminer les valeurs extrêmes. Celles-ci sont caractérisées comme étant inférieures au 5^{ème} percentile et supérieures au 95^{ème} percentile d'une série. Suivant la même idée, un filtre sur les valeurs extrêmes des incréments (différence entre deux valeurs consécutives) permet d'éliminer les valeurs présentant un accroissement trop fort ou trop faible. Enfin,

PARTIE II – Volet hydrologie

les filtres à moyenne mobile arithmétique calculent une valeur moyenne en considérant la moyenne d'un nombre K fixe autour de la valeur à filtrer.

De nombreuses lacunes apparaissent dans les données. Dans le cas où les périodes de trous étaient courtes (<5 jours), nous avons choisi d'interpoler les données linéairement. Dans le cas où nous disposons de données sur des sites proches, une comparaison entre les deux jeux de données a permis d'établir une relation (régression) et nous avons complété les données manquantes en utilisant cette relation et les données additionnelles.

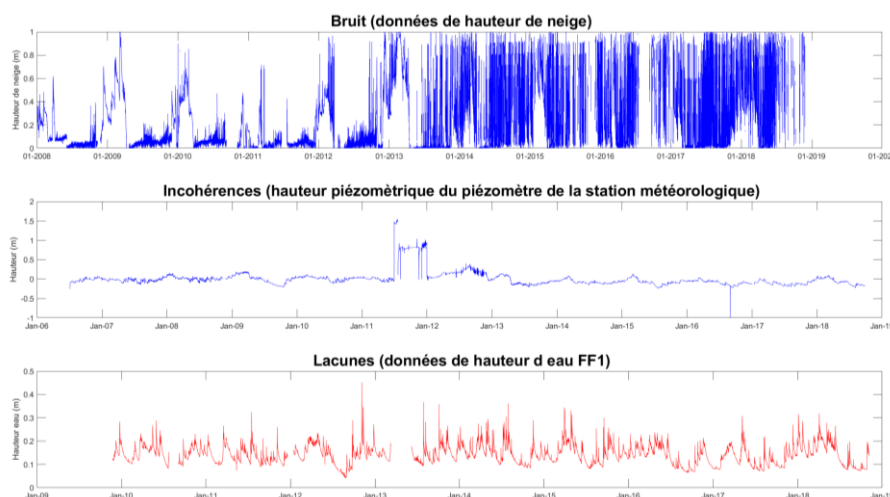


Figure 42. Exemple de données relevées présentant a) un fort degré de bruit (données hauteur de neige), b) des incohérences (hauteurs piézométriques - station météorologique), c) des lacunes (données hauteur d'eau FF1)

3.1.4. Présentation des premiers résultats

3.1.4.1. Description des traitements faits sur les données brutes

En vue de prendre en compte les apports d'eau amenés par la neige, les données brutes de pluie de Luitel sont altérées pour créer des pluies hybrides selon le critère suivant : les jours pluvieux où la température minimale est inférieure à 2°C et la température moyenne à 1°C, les données du pluviomètre sont remplacées par les données du pluviomètre chauffant où à défaut les données du pluviomètre de la station Météo France de Chamrousse. La Figure 43 détaille les jours où cette substitution a eu lieu. Finalement, les données originales constituent 80% de ce jeu de données hybrides.

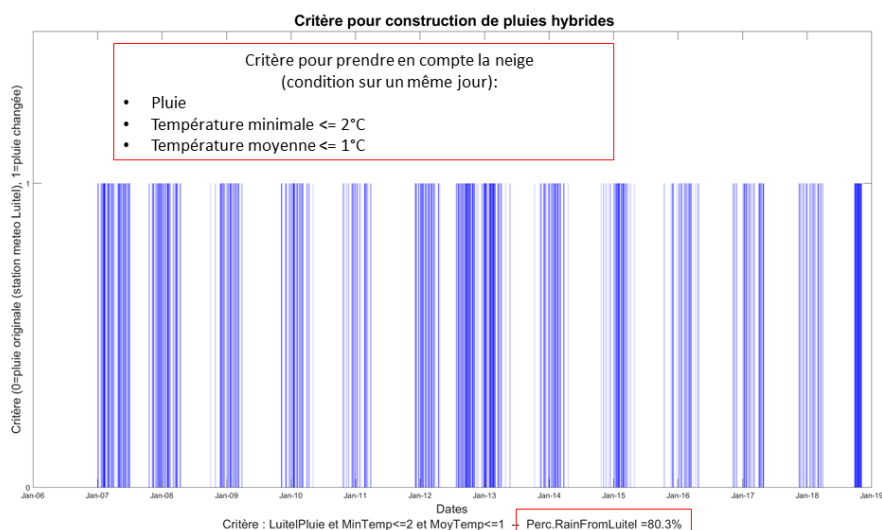


Figure 43 : apparition de la réalisation du critère de construction de pluies hybrides.

Les Figure 44, Figure 45 et Figure 46 décrivent les chaînes respectives de traitement appliquées aux données d'évapotranspiration, de débits et de hauteurs piézométriques de la station météorologique. Concernant la génération d'une série de débits liés à la sonde FF1, les hauteurs sont traitées. Une fois ce processus, les données de hauteurs d'eau sont converties en débits en utilisant la courbe de tarage associée à la section du ruisseau où les données sont captées.

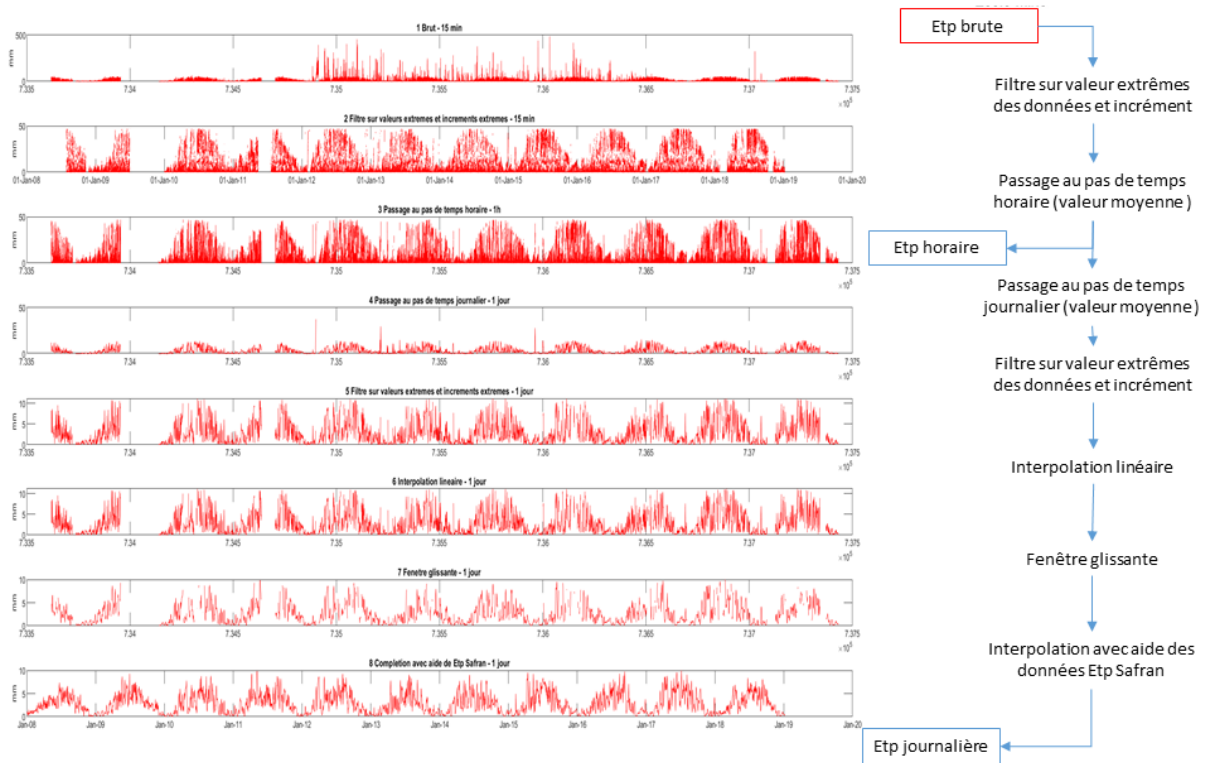


Figure 44. Traitement de l'évapotranspiration

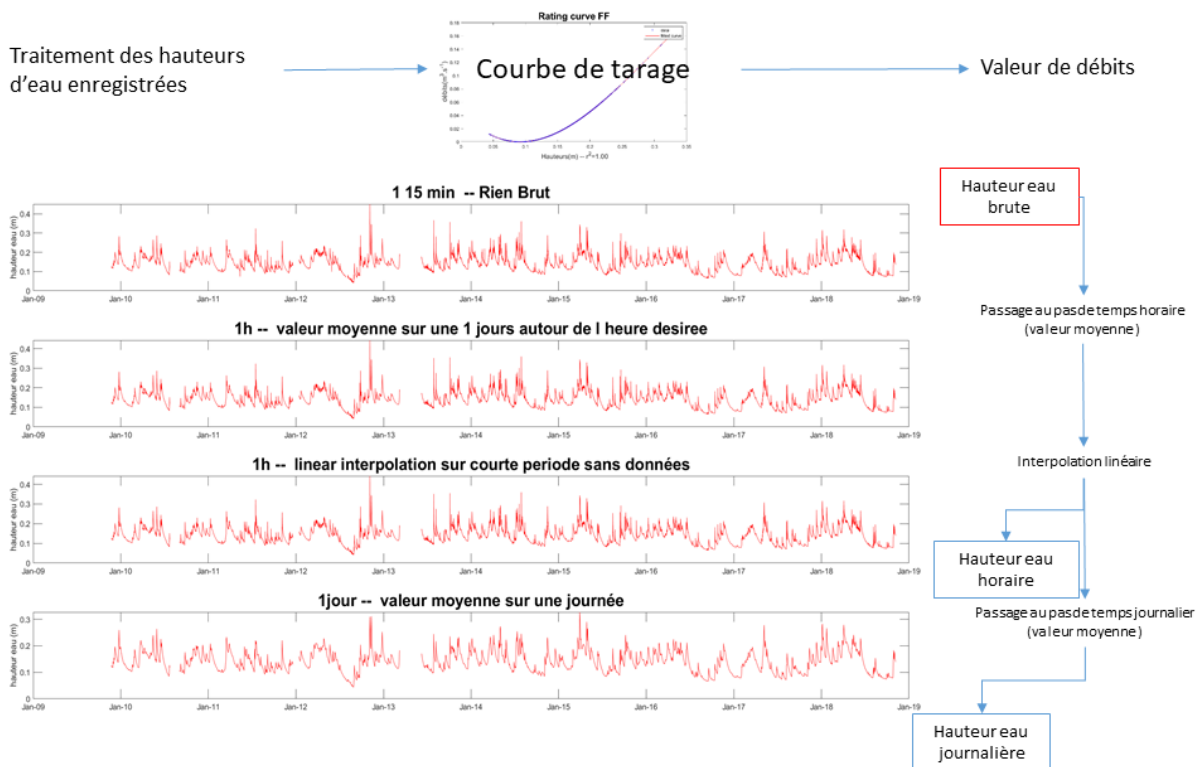


Figure 45. Traitement des données de débits

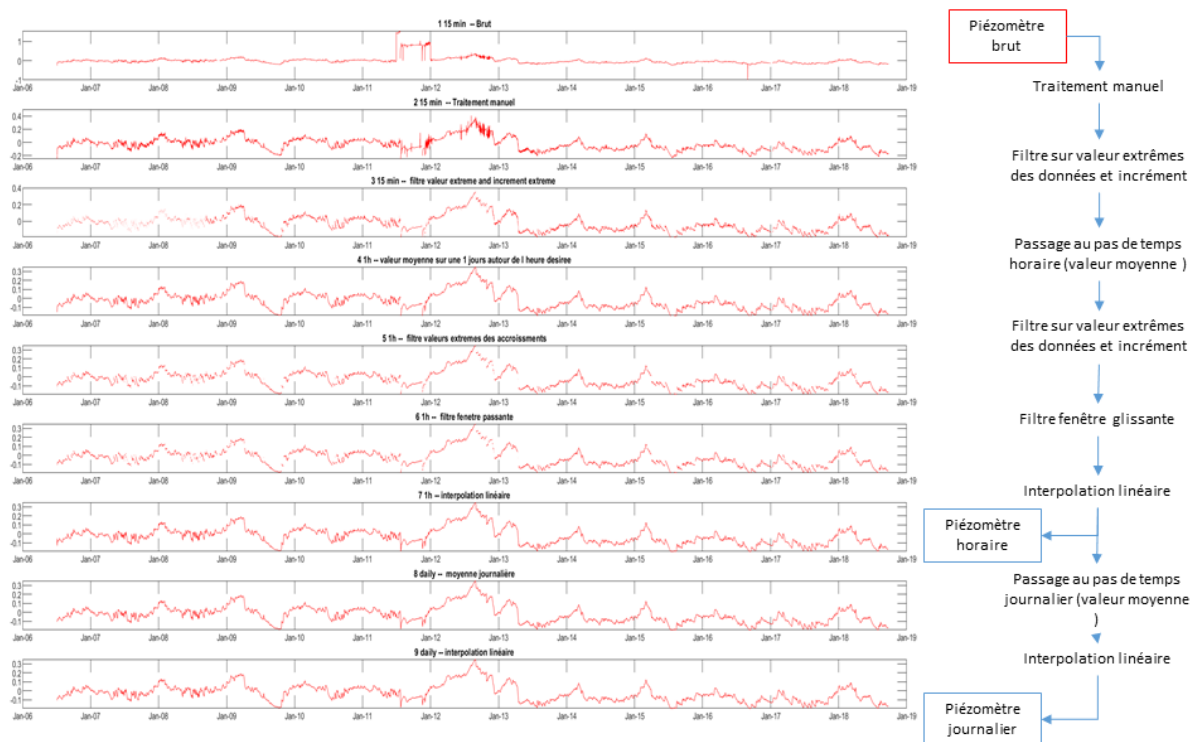


Figure 46. Traitement des hauteurs du piézomètre de la station météorologique

3.1.4.2. Description statistiques descriptives

3.1.4.2.1. Pluie

La Figure 47, présentant les cumuls des données de pluies hybrides annuels, mensuels et journaliers, permet de visualiser les variations interannuelles et intra-annuelles. Ainsi, sur la période 2006-2018, le cumul des pluies annuel est en moyenne de 1261 ± 196 mm, pour des cumuls variant de 835 mm (2009) à 1535 mm (2013). La moyenne des cumuls de pluies sur la même période montre que le mois de mai reste plus pluvieux (>160 mm). La saison avec moins de pluie s'étend de septembre à décembre. Les mois de février et décembre restent les mois les plus secs (77 mm). Cependant, bien que la neige ait été prise en compte dans l'analyse de ces pluies hybrides, cette information est à remettre en perspective en considérant un possible mauvais traitement de l'information neige. Dans une échelle sub-journalière, les pluies apparaissent majoritairement entre 10h et 16h. Ceci peut s'expliquer par l'abondance de précipitations printanières et estivales convectives (évolution diurne).

Si l'on s'intéresse à la distribution des pluies sur cette période (Tableau 6), on observe que celle-ci est légèrement asymétrique (skewness=4) et très « pointue » (kurtosis=22) avec des valeurs centrales (moyenne et médiane) proches ou égales à 0. La valeur positive du skewness montre que la distribution est étirée par la présence de quelques valeurs de pluie très élevées.

3.1.4.2.2. Évapotranspiration

La Figure 48, présentant les moyennes annuelles, mensuelles et journalières de l'évapotranspiration prévues par le modèle Safran-ISBA et observée à la station météorologique, permet de visualiser les variations interannuelles et intra-annuelles de cette variable. Ainsi, sur la période 2008-2018, l'évapotranspiration moyenne annuelle est de 1065 ± 99 mm, pour des valeurs variant de 911 mm (2013) à 1231 mm (2017). La moyenne mensuelle des données de l'évapotranspiration sur la même période montre que l'évapotranspiration reste la plus basse pour les mois d'hiver (novembre-février). Le passage à une échelle sub-journalière révèle un pic d'évapotranspiration diurne.

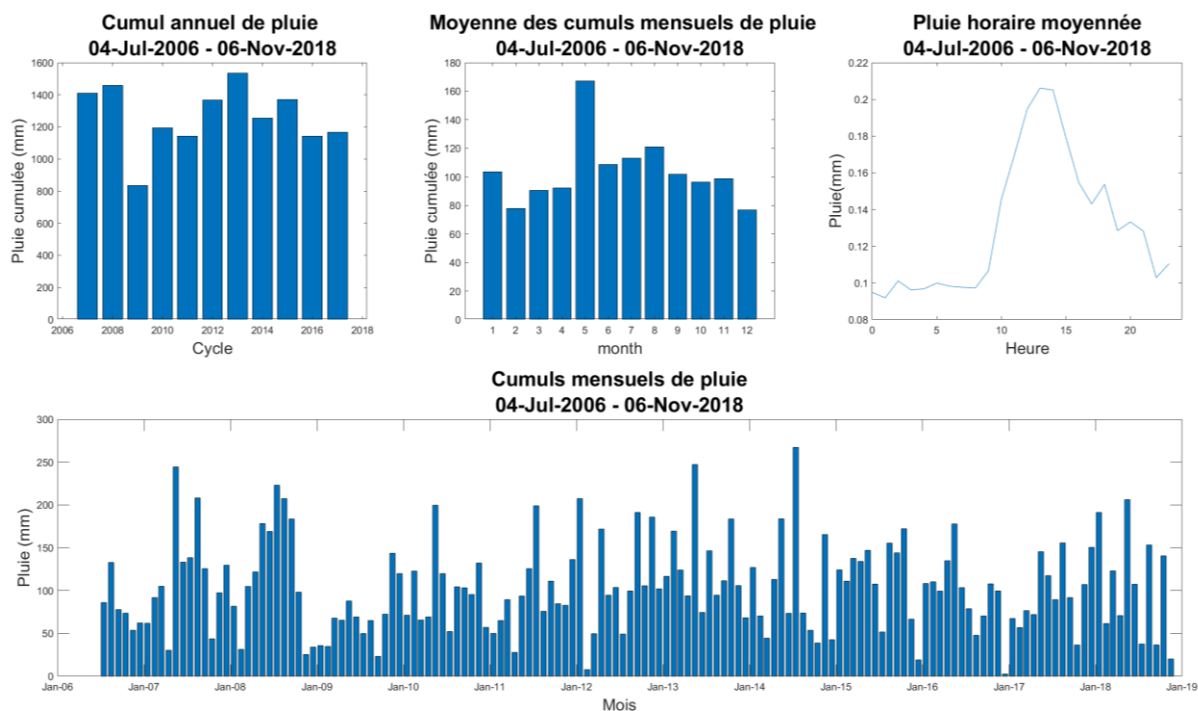


Figure 47. Description statistique des pluies journalières

Moyenne (mm)	Médiane (mm)	Maximum (mm)	Cumul (mm)	Kurtosis	Skewness
3.44	0.20	85.80	1260.89	21.16	3.68

Tableau 6. Principaux indicateurs statistiques de la série chronologique de pluie journalière (en mm) pour la période juillet 2006 à novembre 2018. Le cumul correspond à la moyenne des valeurs annuelles.

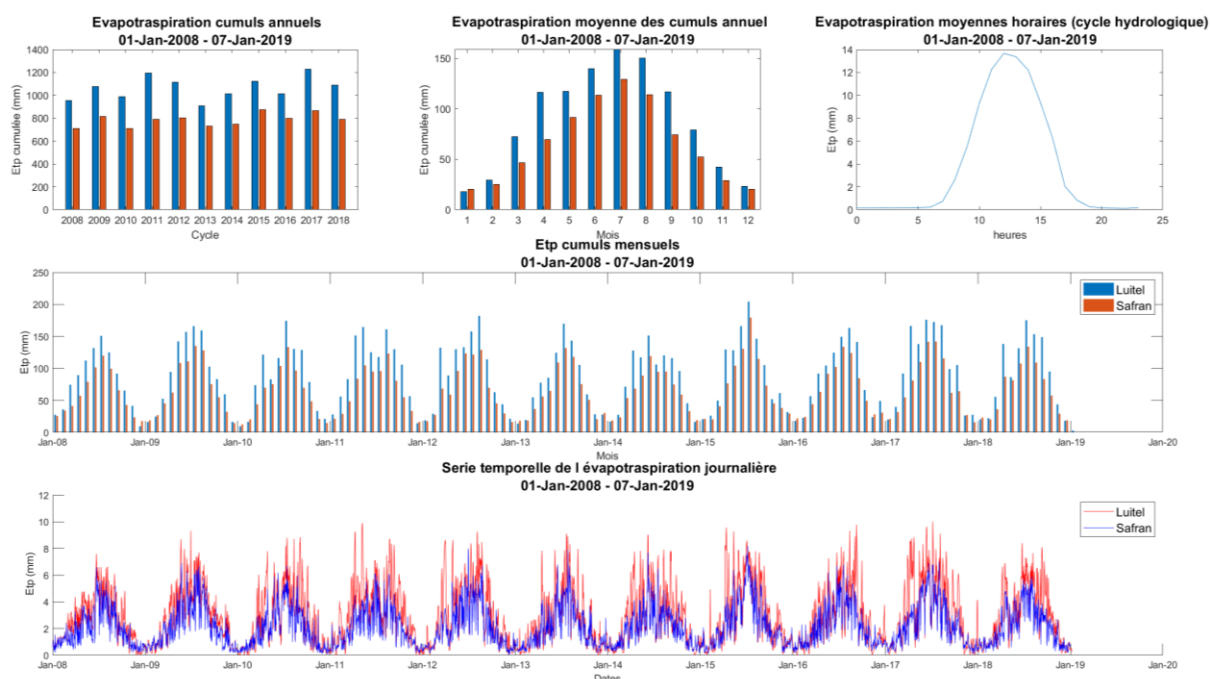


Figure 48. Description statistique des données d'évaporation journalières

3.1.4.2.3. Débits

La Figure 49, présentant les moyennes des débits annuels, mensuels et journaliers des débits observés sur ces deux sondes, permet de visualiser les variations interannuelles et intra-annuelles du débit pour les sondes FF1 et RDL. Ainsi, sur la période 2014-2018, le débit moyen est de $16,13 \pm 7,79 \text{ l.s}^{-1}$, pour des valeurs allant jusqu'à $162,51 \text{ l.s}^{-1}$ (mars 2015) pour la sonde FF1. Concernant la sonde RDL, le débit moyen annuel est de $6,34 \pm 10,94 \text{ l.s}^{-1}$, pour des valeurs variant jusqu'à $61,47 \text{ l.s}^{-1}$ (mars 2015). Il est à noter que le bassin versant du FF1 étant plus grand, les débits associés sont plus importants. Sur une année hydrologique les deux ruisseaux atteignent leur pic de débit entre mars et juin, les débits les plus bas sont observés pendant la période juillet à mi-novembre. Pendant les mois de décembre-janvier-février, de faibles débits peuvent être également observés ponctuellement.

La moyenne mensuelle des débits sur la même période montre pour les deux ruisseaux que les débits restent les plus élevés durant les mois d'avril et mai, alors que les débits sont faibles durant la période de juillet à octobre. Le passage à une échelle sub-journalière ne révèle aucun cycle journalier.

L'étude de la distribution des débits sur cette période (Tableau 7) montre que les deux ruisseaux ont des distributions de débit similaires. Celles-ci sont pratiquement symétriques (skewness=2) et peu « pointues » (kurtosis= ~ 9).

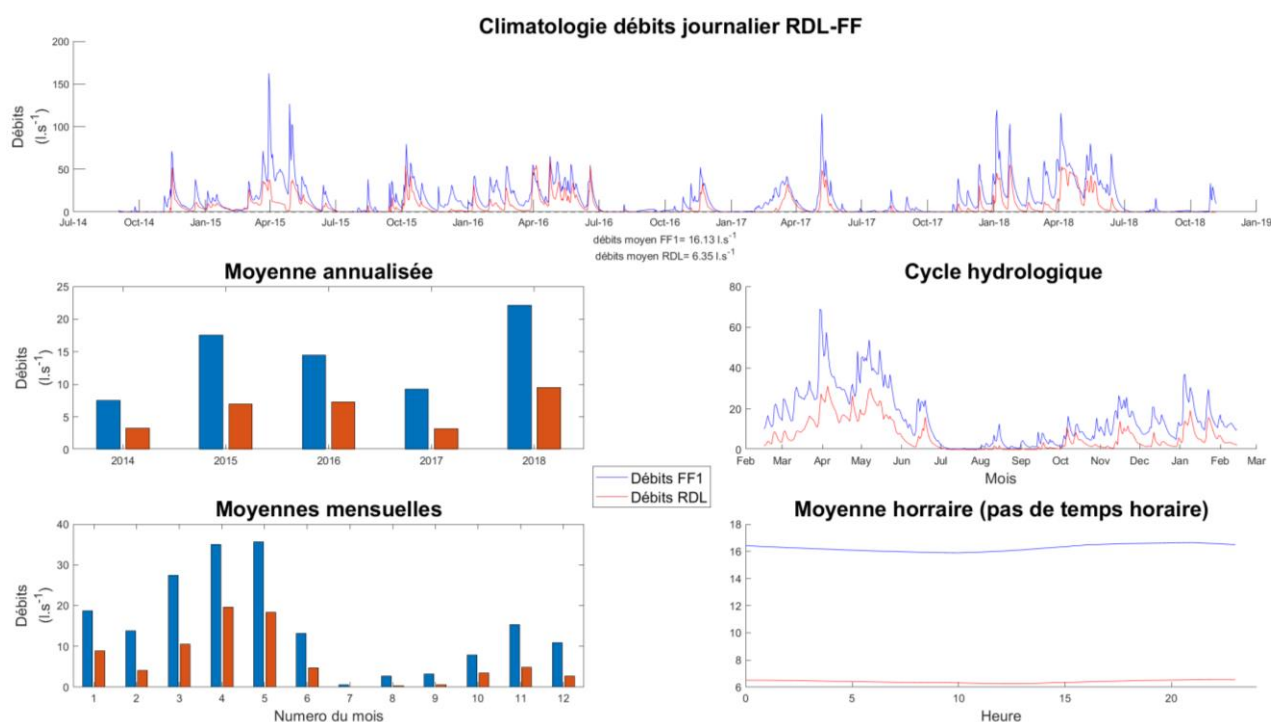


Figure 49. Description statistique des débits journaliers de FF1 (en bleu) et RDL (en rouge) (septembre 2014-novembre 2018)

	Moyenne (l.s^{-1})	Médiane (l.s^{-1})	Maximum (l.s^{-1})	Kurtosis	Skewness
FF1	14.98	7.35	162.51	10.21	2.20
RDL	6.35	1.21	61.47	8.14	2.32

Tableau 7. Principaux indicateurs statistiques de la série chronologique de débit journalier (en l.s^{-1}) pour la période 2014 à 2018. La moyenne, la médiane, le minimum et le maximum correspondent aux moyennes des valeurs annuelles.

3.1.4.2.4. Piézomètres

Sur tous les piézomètres assurant le suivi de la nappe, 7 piézomètres permettent un suivi en continu : P3, P13, P14, P15, P17, P20 (sonde *CTD-Diver* puis *Solinst Levellogger*) et le piézomètre situé au pied de la station météo. La Figure 50 synthétise les tendances de la nappe à partir des relevés piézométriques effectués de 2004 à 2017. L'influence des fossés de drainage est notable pour les piézomètres 11, 15 et 17. En revanche, cela n'est pas le cas pour le 7, mais l'amplitude est à relativiser du fait de la proximité du substrat. Un tel suivi permet de dresser des cartes piézométriques de la tourbière (Figure 51).

Piézomètre	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Amplitude (cm)
1	-40	-7.4	32.6
2	-32.5	8.3	40.8
3	-37.2	-5	32.2
4	-63.5	0	63.5
5	-60.5	0	60.5
6	-60	-19.6	40.4
7	-78	-37.5	40.5
8	-66.8	-20.4	46.4
9	-52.7	0	52.7
10	-100.5	-30	70.5
11	-96	-14	82
12	-62.2	-20.4	41.8
13	-76	-20.2	55.8
14	-63.2	-25	38.2
15	-123	-23	100
16	-73	-10	63
17	-100	-17.1	82.9
18	-45	3	48
19	-85.2	-32	53.2
20	-63	-25.4	37.6

Figure 50. Comportement de la nappe en fonction des piézomètres (vert : battements de nappe faibles, orange : battements de nappe moyens, rouge : battements de nappe forts) (Pascoletti, 2018)

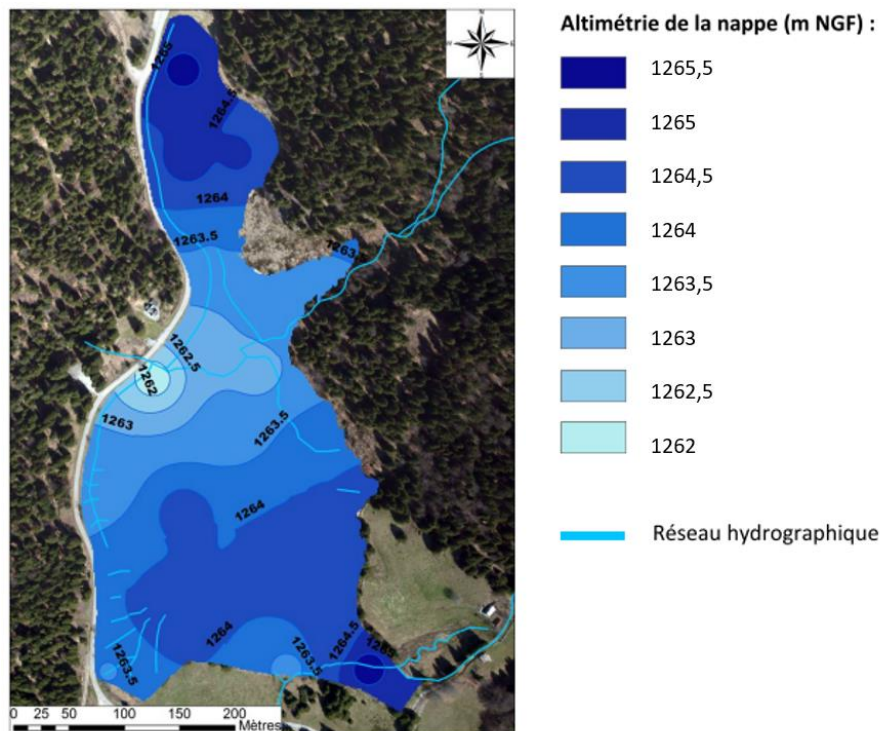


Figure 51. Carte des niveaux piézométriques construite à partir des niveaux relevés le 25.06.2018 (Pascoletti, 2018)

PARTIE II – Volet hydrologie

La matrice de corrélation révèle le lien entre la hauteur d'eau des piézomètres. Il est à noter qu'aucune valeur de corrélation ne peut être établie entre P20_Diver et P20_Solinst puisque ces deux sondes sont installées au même endroit mais sans intersection temporelle. D'une manière générale, les piézomètres P3, P13, P14, P15 et P20_Solinst sont bien corrélés entre eux (corrélation $>0,92$). Cependant, le piézomètre de la station météorologique présente des indices de corrélations moins élevés (entre 0,69 et 0,83).

	P3	P13	P14	P15	P17	P20_Diver	P20_Solinst	PMeteo
P3	1	0.937	0.955	0.926	0.92	0.207	0.932	0.839
P13	0.937	1	0.943	0.96	0.948	0.387	0.918	0.699
P14	0.955	0.943	1	0.938	0.92	0.343	0.948	0.753
P15	0.926	0.96	0.938	1	0.918	0.325	0.948	0.758
P17	0.92	0.948	0.92	0.918	1	0.338	0.913	0.69
P20_Diver	0.207	0.387	0.343	0.325	0.338	1	NaN	0.117
P20_Solinst	0.932	0.918	0.948	0.948	0.913	NaN	1	0.82
PMet	0.839	0.699	0.753	0.758	0.69	0.117	0.82	1

Tableau 8. Matrice de corrélation entre les hauteurs des piézomètres

Par sa longue profondeur temporelle et sa position centrale sur la tourbière, nous présentons les statistiques associées au piézomètre de la station météorologique (Figure 52). Sur un cycle hydrologique, le minimum est atteint durant les mois de juillet-août, et le maximum en mars. Malgré les traitements proposés pour obtenir une série chronologique exploitable, ce piézomètre présente des anomalies. Celles-ci apparaissent clairement lors de la visualisation de la moyenne annuelle ou de la série chronologique journalière.

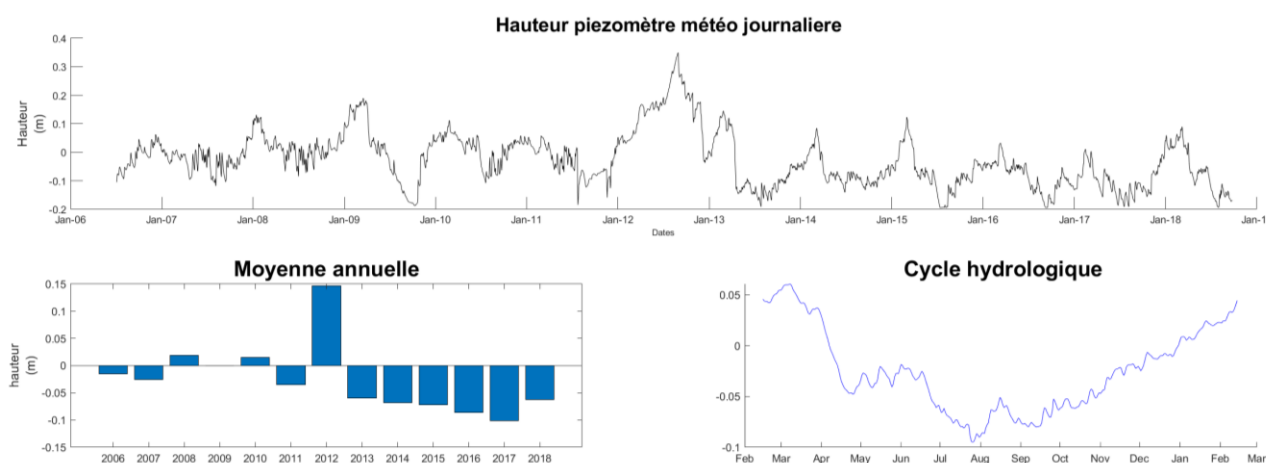


Figure 52. Description statistique des battements de nappe journaliers relevés par le piézomètre de la station météorologique

3.1.4.3. Analyse simple

3.1.4.3.1. Pluie

Le calcul du corrélogramme simple du signal de pluie permet d'étudier la corrélation temporelle du signal de pluie. Or, on observe sur la Figure 53 une chute brutale du coefficient de corrélation dès le premier jour de décalage. Au-delà, les valeurs oscillent autour de 0. Le corrélogramme suggère donc que, sur la période étudiée, il n'existe pas de corrélation entre les épisodes pluvieux, ni à court terme, ni à long terme.

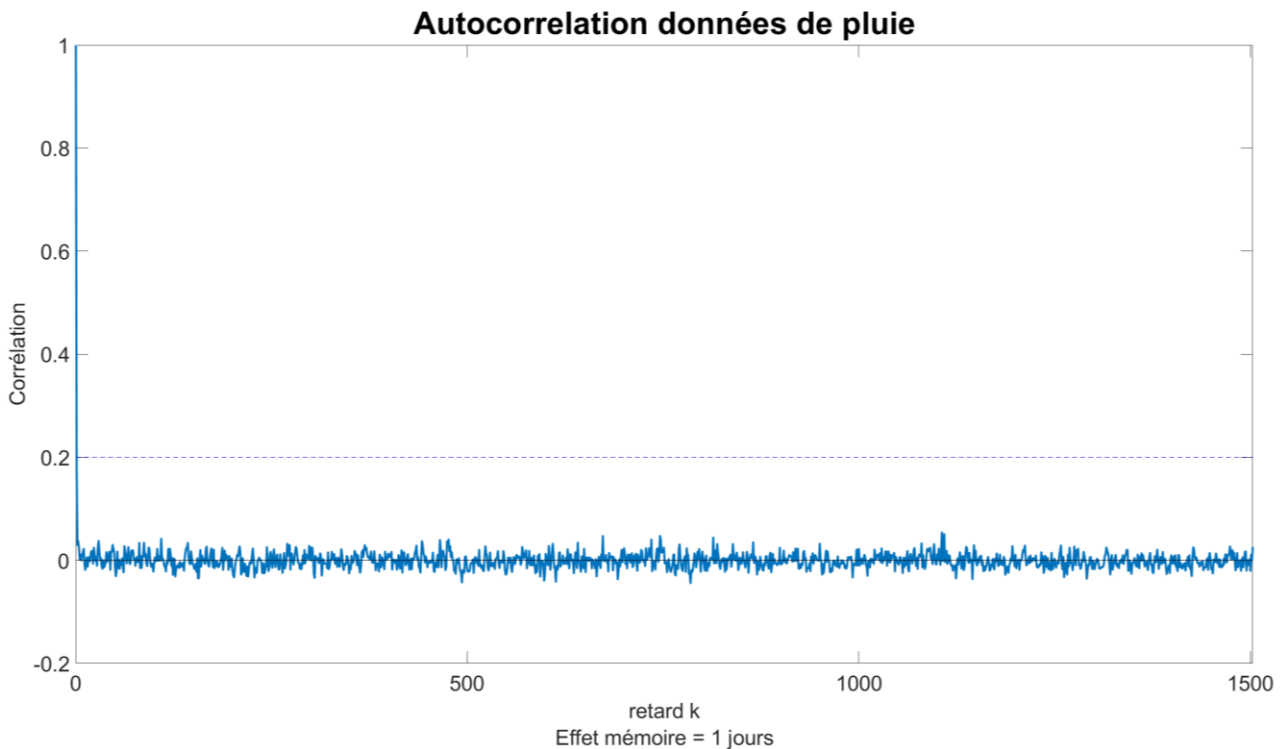


Figure 53. Autocorrélogramme du signal de pluie

L'étude du spectre simple du signal de pluie, en échelle logarithmique (Figure 54), permet d'étudier le type de bruit correspondant. On constate que la pente est quasi nulle ce qui correspond à un bruit blanc, c'est-à-dire la réalisation d'un processus aléatoire. On peut toutefois noter un pic de faible amplitude à la fréquence $0,00267 \text{ j}^{-1}$ qui correspond globalement à une périodicité annuelle (375 jours), très peu marquée et non observée sur le corrélogramme.

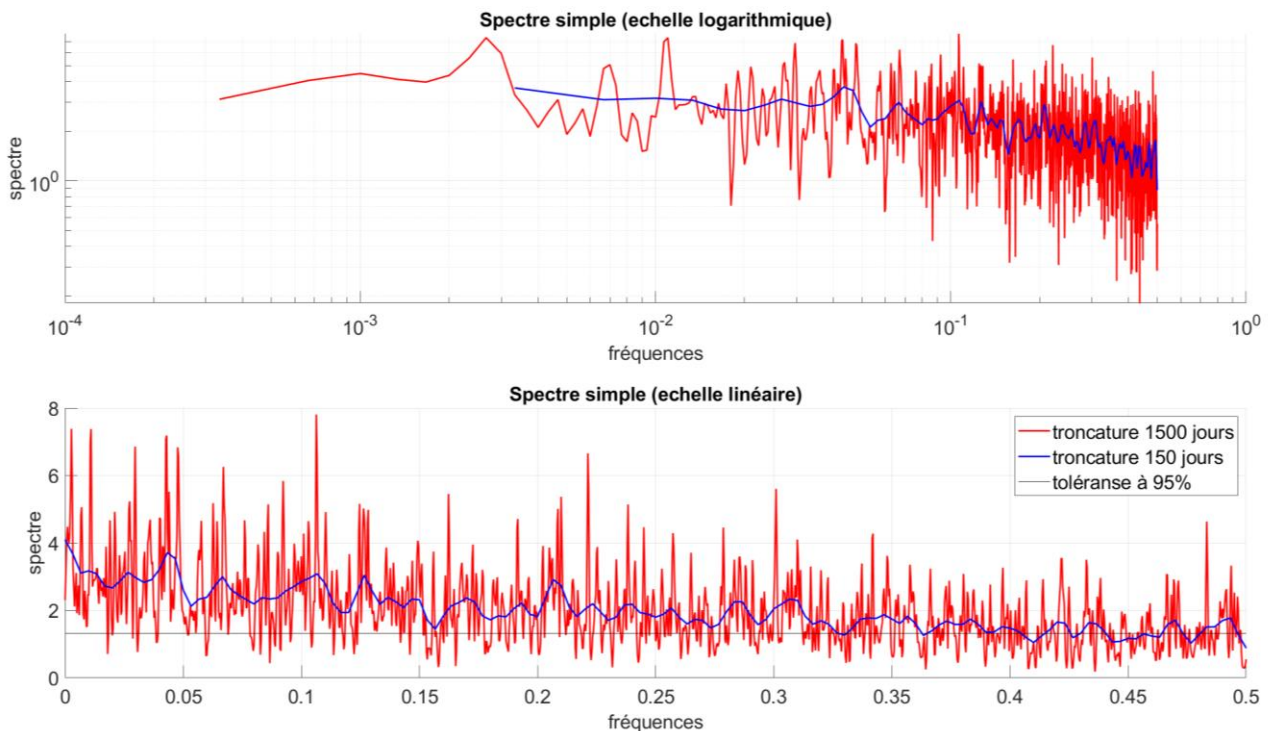


Figure 54. Spectre des précipitations journalières a) échelle logarithmique b) échelle linéaire.

3.1.4.3.2. Débits

L'effet mémoire, obtenu pour le débit FF1, sur la période étudiée (Figure 55), est de 28 jours, ce qui signifie qu'il existe une dépendance entre le débit observé à un instant t et les 28 jours précédents. Ainsi, le système de la tourbière de Luitel présente des caractéristiques d'un système inertiel. L'autocorrélogramme met également en évidence des plateaux qui sont représentatifs de périodicité annuelle (365 jours et 730 jours).

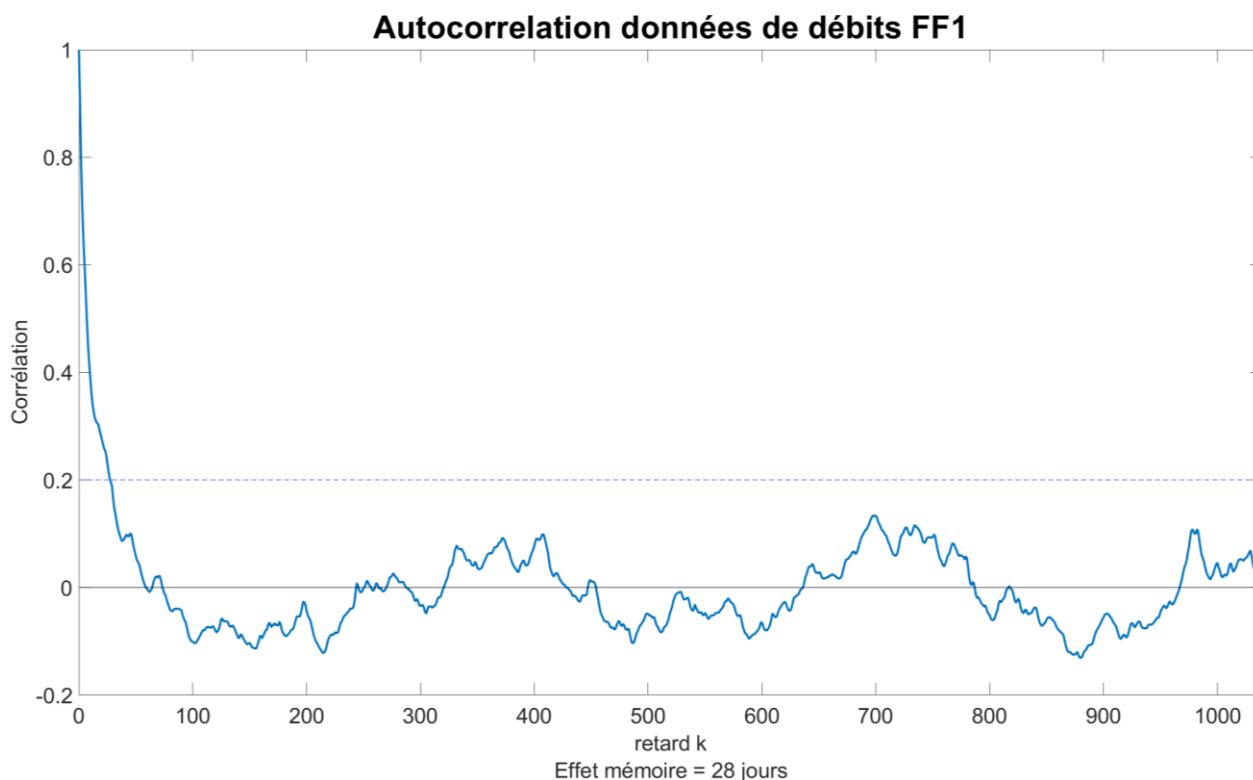


Figure 55. Autocorrélogramme du signal de débits issus de la sonde FF1

Le spectre du débit, tracé en coordonnées logarithmiques pour deux troncatures différentes (Figure 56), présente une pente générale importante et négative, sauf pour les plus basses fréquences. Pour les moyennes et hautes fréquences, la pente du spectre est globalement proche de $-1,40$ malgré quelques légères ruptures. Par conséquent, le système « Ruisseau de Fontfroide » est intégrateur et le signal de débit correspond à une intégration des moyennes et hautes fréquences du signal de pluie. Les oscillations qui différencient le spectre pour les deux troncatures (150 et 1039 jours) sont a priori liées à la variabilité annuelle qui n'est pas prise en compte lorsque l'on calcule l'autocorrélation avec une troncature de 150 jours. La représentation graphique du spectre en échelle linéaire (Figure 56) laisse apparaître différents pics essentiellement observables sur le spectre associé à la plus grande des deux troncatures. Ces différents pics sont assimilables à des phénomènes périodiques relatifs au fonctionnement du système. On note des pics aux fréquences $0,0022887 \text{ j}^{-1}$, $0,02454 \text{ j}^{-1}$, et $0,04187 \text{ j}^{-1}$ correspondant respectivement à des périodicités de 346, 41 et 24 jours. L'étude du spectre permet aussi d'extraire deux paramètres i) le temps de régulation (100 jours), ii) la fréquence de coupure ($F_{\text{cm}} = 0,11667 \text{ j}^{-1}$).

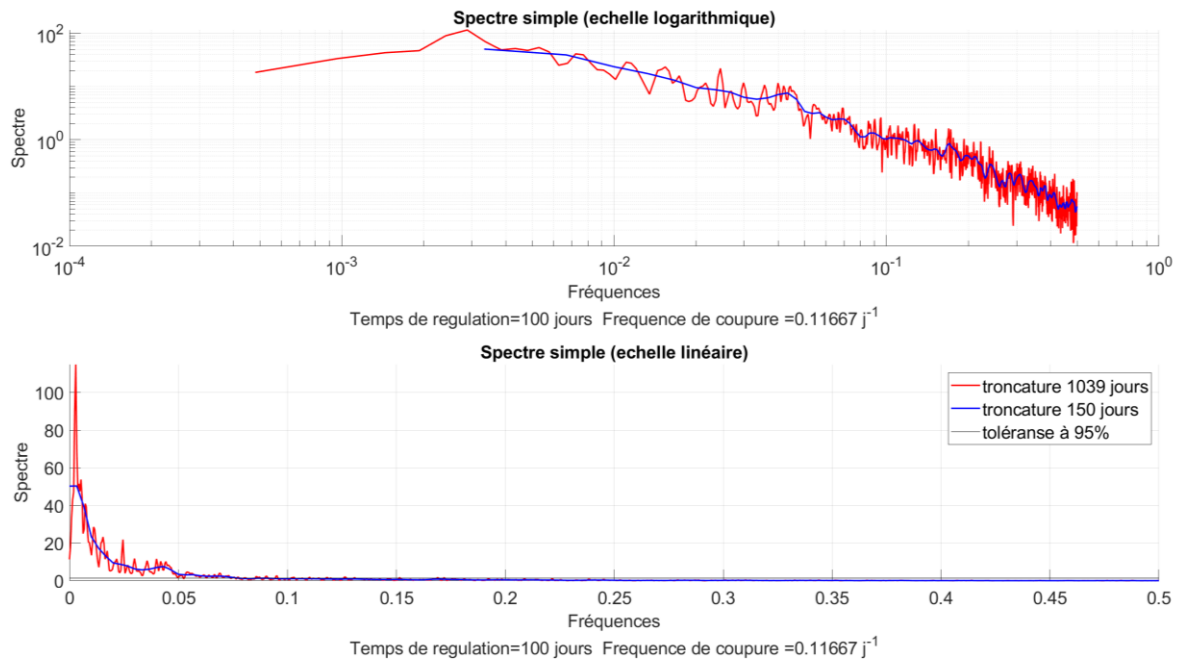


Figure 56. a) spectre des débits journaliers (échelle logarithmique) b) spectre des débits journaliers (échelle linéaire)

3.1.4.3.3. Piézomètres

L'autocorrélogramme appliqué au niveau piézométrique relevé au piézomètre de la station météorologique met en évidence la cyclicité annuelle de cette variable. Un effet mémoire de 143 jours montre que le système relatif aux variations piézométriques est inertiel et s'étale dans le temps. L'autocorrélogramme met également en évidence des pics de corrélation significatifs des périodicités annuelles (365 jours et 730 jours) qui, comme dans l'étude du signal de débits, traduisent une cyclicité annuelle.

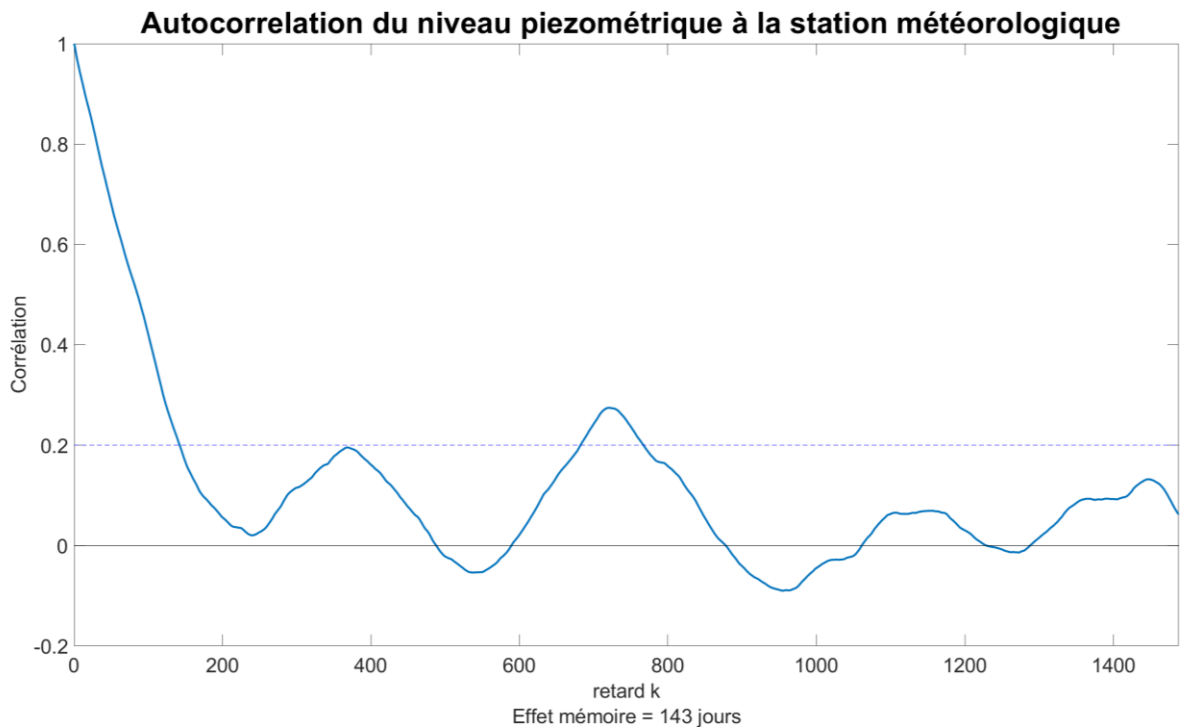
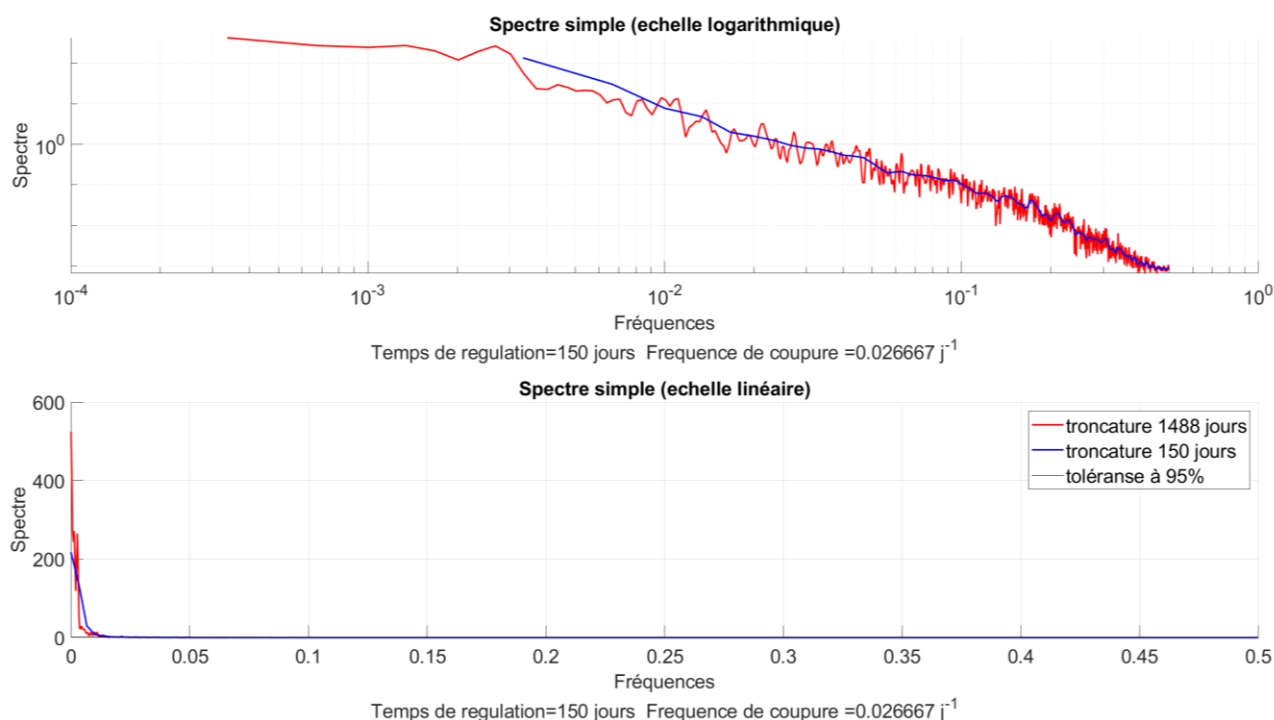


Figure 57. Autocorrélogramme du niveau piézométrique au piézomètre de la station météorologique

Le spectre du niveau d'eau du piézomètre de la station météorologique, tracé en coordonnées logarithmiques pour deux troncatures différentes (Figure 58), présente une pente générale importante (-2,40) et négative. Par conséquent, le système « nappe de la tourbière de Luitel » est intégrateur. La représentation graphique du spectre (Figure 58, échelle linéaire) laisse apparaître différents pics. Ces différents pics sont assimilables à des phénomènes périodiques relatifs au fonctionnement du système. On note des pics correspondant à une périodicité annuelle (372 jours), biannuelle (744 jours), et saisonnière (90 jours). L'étude du spectre permet aussi d'extraire deux paramètres i) le temps de régulation (150 jours), ii) la fréquence de coupure ($F_{CM} = 0,026667 \text{ j}^{-1}$).



3.1.4.3.4. Évapotranspiration

L'autocorrélogramme appliqué à l'évapotranspiration met en évidence la cyclicité annuelle de cette variable. Un effet mémoire de 67 jours rappelle que c'est un phénomène qui s'étale dans le temps.

Le spectre du niveau d'eau du piézomètre de la station météorologique, tracé en coordonnées logarithmiques pour deux troncatures différentes (Figure 60), présente une légère pente négative (-0.92), signifiant que le processus d'évapotranspiration n'est pas strictement aléatoire. La représentation graphique du spectre (Figure 60, échelle linéaire) laisse apparaître quelques pics. Ces différents pics sont assimilables à des phénomènes périodiques relatifs au fonctionnement du système. On note par exemple un pic à la fréquence $0,00261 \text{ j}^{-1}$ correspondant à une périodicité annuelle (383 jours). L'étude du spectre permet aussi d'extraire deux paramètres i) le temps de régulation (150 jours), ii) la fréquence de coupure ($F_{CM} = 0,11667 \text{ j}^{-1}$).

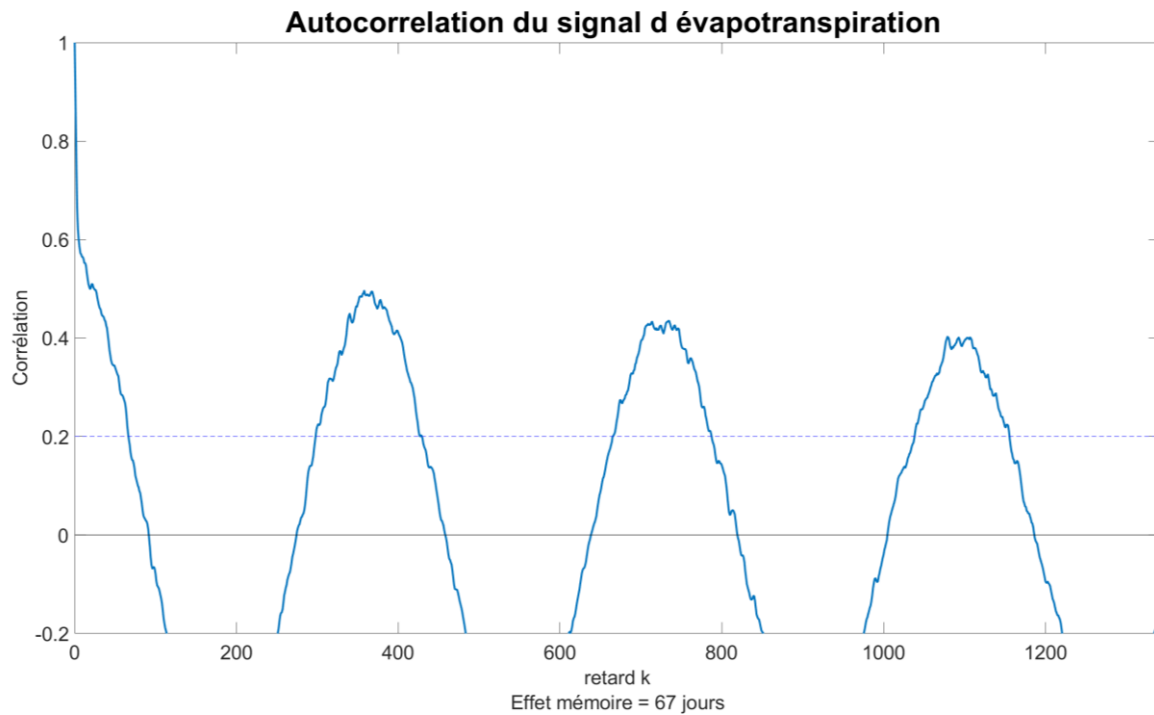


Figure 59. Autocorrélogramme du signal d'évapotranspiration

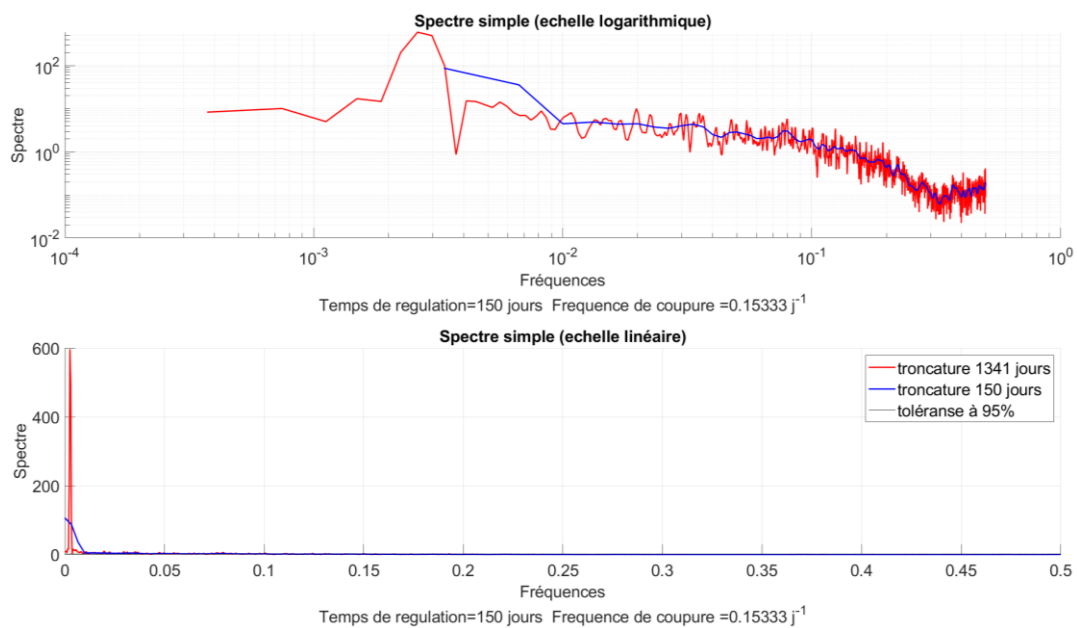


Figure 60. a) spectre des cumuls journaliers d'évapotranspiration (échelle logarithmique) b) spectre des cumuls journaliers d'évapotranspiration (échelle linéaire)

3.1.4.4. Analyses croisées

L'analyse des signaux effectuée précédemment permet d'appréhender la structure, la dépendance temporelle ainsi que la périodicité de chacun des jeux de données. Néanmoins, l'analyse du système nécessite une analyse croisée des signaux afin de mieux caractériser leurs relations.

3.1.4.4.1. Pluie-débits FF1

L'analyse de la réponse impulsionnelle (pluie-débits) effectuée à partir du corrélogramme croisé (Figure 61) permet dans un premier temps d'illustrer la réponse du système à une impulsion. Le maximum de

corrélation, atteint au bout de 1 jour, renseigne sur le temps de réponse du système. La décroissance rapide du corrélogramme entraîne un passage sous le seuil théorique de décorrélation après 12 jours.

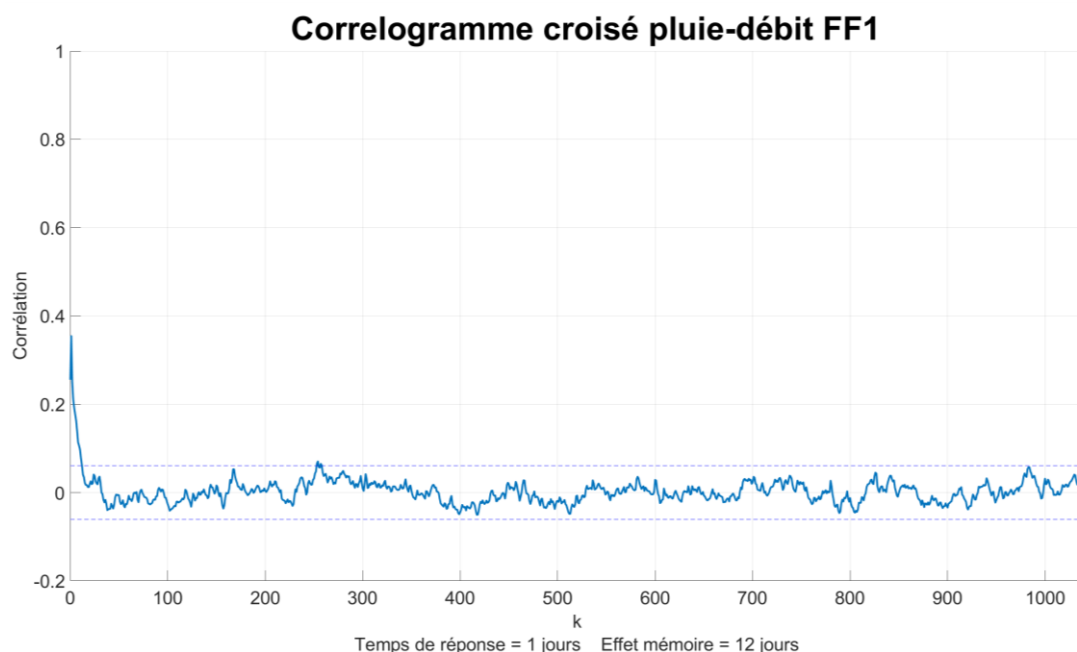


Figure 61. Correlogramme croisé pluie-débits FF1 (les lignes horizontales en pointillés représentent les seuils de décorrélation théoriques), période novembre 2009- novembre 2018.

La représentation de la fonction de transfert en échelles logarithmiques (Figure 62) permet dans un premier temps d'observer que les basses fréquences ne sont pas, ou très peu, modifiées par le système. La tourbière de Luitel a donc un rôle de filtre passe-bas dont la fréquence de coupure (F_c) vaut environ $0,04667 \text{ j}^{-1}$ (21 jours). La fréquence de coupure du filtre passe-bas est la fréquence au-delà de laquelle toutes les fréquences supérieures sont atténuées par le système. Ainsi, le système effectue un filtrage des entrées sur 21 jours. Cela signifie que la réponse du système à une impulsion en entrée va être atténuée et répartie sur plus de 21 jours. La Figure 62 montre qu'il existe des ruptures de pentes correspondant aux périodes suivantes : 346, 140, 90, 40, 21, 12 jours. Ces ruptures peuvent être interprétées comme autant de transitions d'un comportement vers un autre.

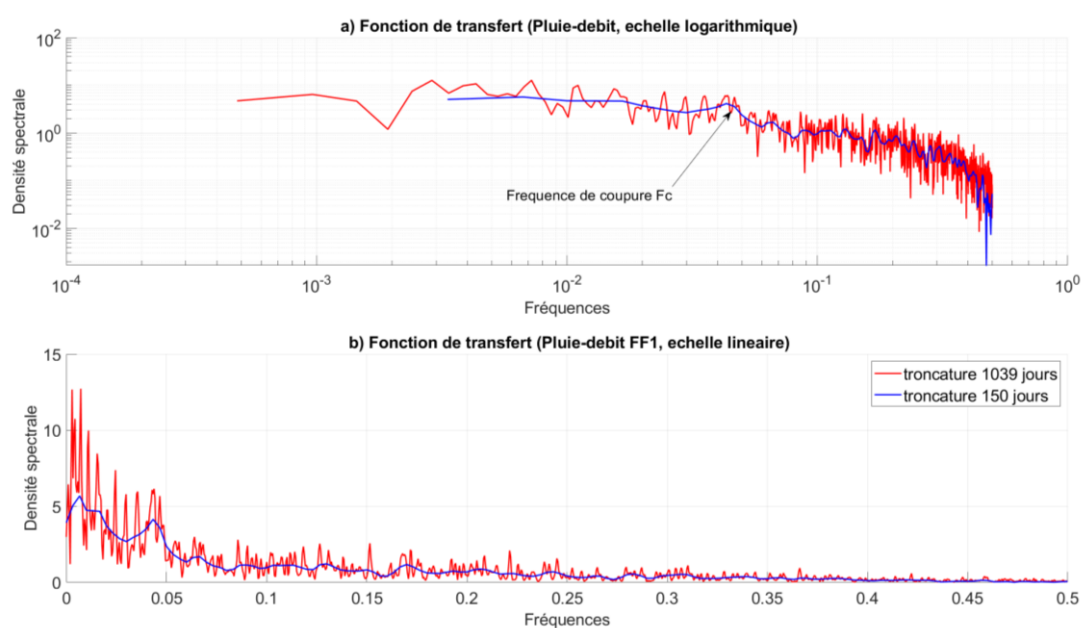


Figure 62. a) fonction de transfert en échelle logarithmique, b) fonction de transfert en échelles linéaire

3.1.4.4.2. Pluie-piézomètres

L'analyse de la réponse impulsionnelle (pluie-piézomètre de la station météorologique) montre que les pluies sont faiblement corrélées aux niveaux de ce piézomètre (Figure 63). Néanmoins, les calculs statistiques donnent un temps de réponse de 1 jour et un effet mémoire de 3 jours. La comparaison de ces valeurs (détaillée dans le 3.1.6.3 Analyse de la nappe) avec celles fournies par les autres piézomètres montrent que vraisemblablement ces valeurs sont fausses. En particulier, elles soulignent (encore) des lacunes dans le traitement du piézomètre de la station météorologique. La fonction de transfert associée à la réponse impulsionnelle pluie-piézomètre de la station météorologique n'est pas présentée car la mauvaise qualité des données piézométriques rend le graphique difficile à interpréter.

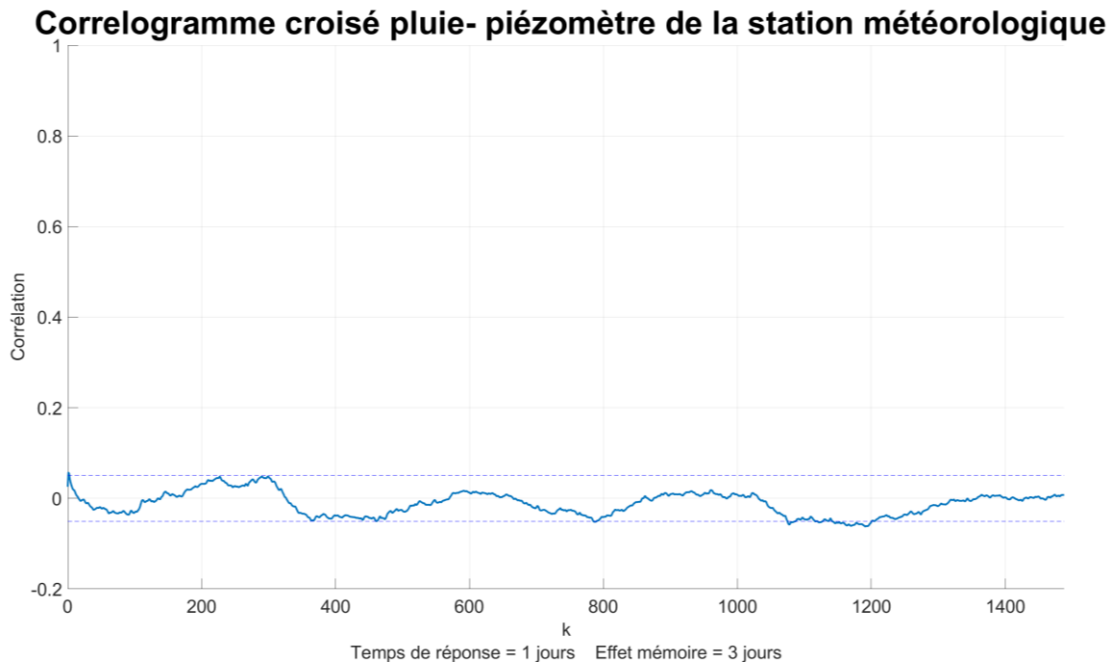


Figure 63. Corrélogramme croisé pluie-piézomètre de la station météorologique (les lignes horizontales en pointillés représentent les seuils de décorrélation théoriques), période juillet 2006- décembre 2018.

3.1.5. Premières conclusions

3.1.5.1. Débits/période d'été

Le graphe des fréquences des débits journaliers issus de la sonde FF1 sur la période novembre 2009-décembre 2018 (Figure 64) permet de mettre évidence 4 fonctionnements bien différents du système hydrologique : gros débits (comportement 1 pour des débits supérieurs à Q_5), majorité des débits (comportement 2 et 3 pour des débits entre Q_5 et Q_{90}), faibles débits (comportement 4, débits inférieurs à Q_{90}). Concernant l'été, nous pouvons définir le débit d'été comme Q_{90} (0.36 l.s^{-1}).

Le débit étant déterminé, nous définissons une période d'été (>1 jours) au cours de laquelle le débit du RDL passe sous la valeur de Q_{90} . Ainsi, sur la période novembre 2009-décembre 2018, nous comptabilisons 312 jours d'été répartis essentiellement sur la période juillet-octobre. En moyenne, il y a 35 ± 22 jours d'été par an (Figure 65). L'année 2018 est l'année qui comptabilise le plus de jours d'été (77). Les mois d'été s'étalent de juillet à octobre (Figure 65). Notons aussi, les présences d'été ponctuels hivernaux.

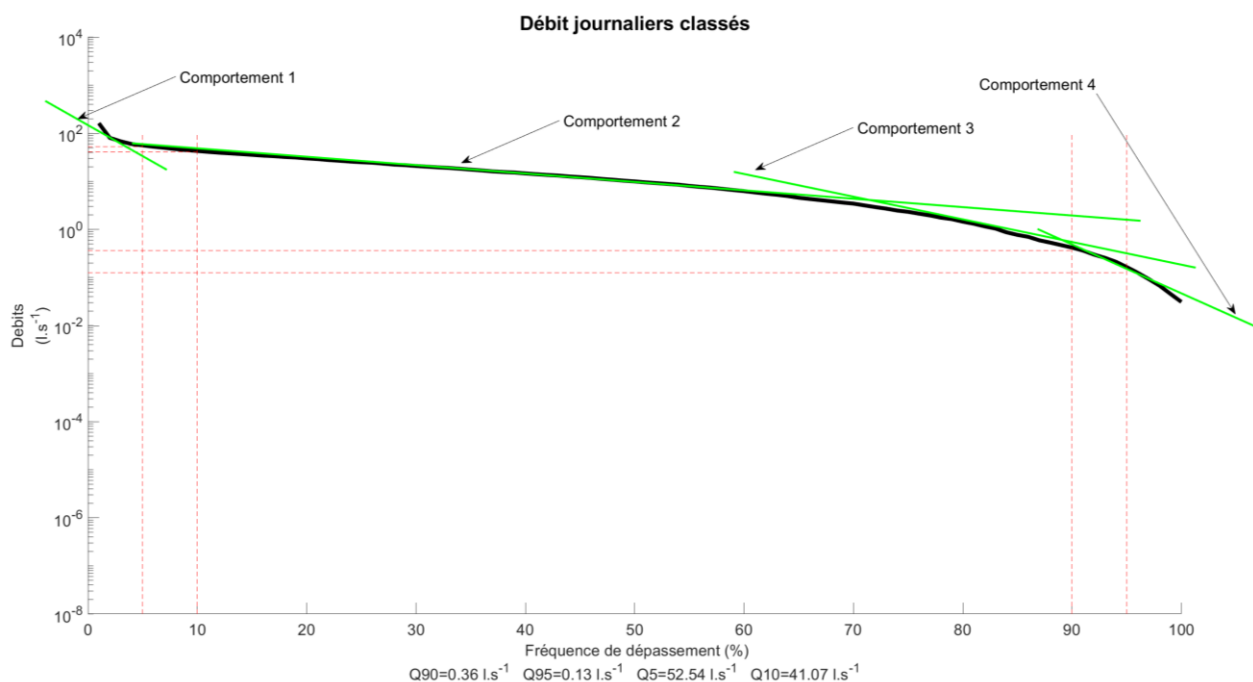
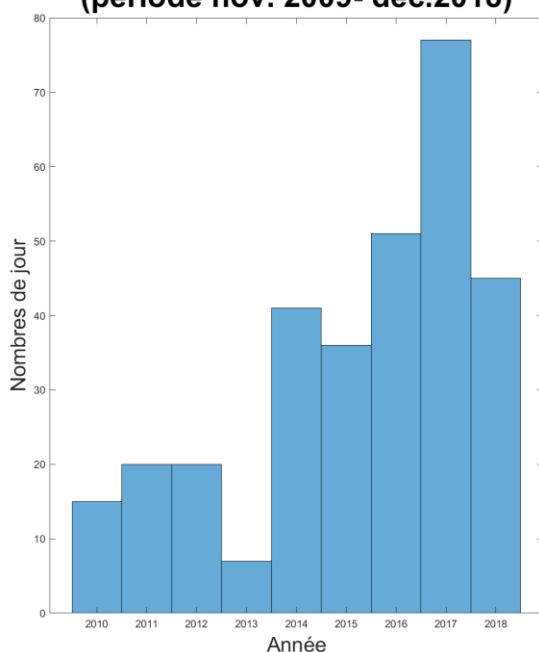


Figure 64. Graphe des fréquences des débits FF1 journaliers sur la période novembre 2009-décembre 2018

Repartition annuelle des jours d'étiages (periode nov. 2009- dec.2018)



Repartition mensuelle des jours d'étiages (periode nov. 2009- dec.2018)

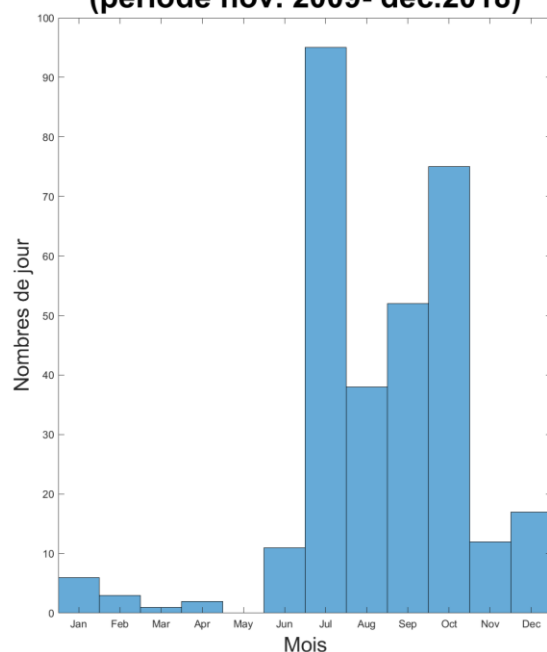


Figure 65. Répartitions des jours d'étiages sur la période novembre 2009- décembre 2018 : a) annuellement, b) mensuellement

3.1.5.2. Saisonnalité des index d'analyse corrélatrice.

Sur la période novembre 2009-décembre 2018, l'analyse simple des débits à FF1 montre que l'effet mémoire du système « tourbière de Luitel » est de 28 jours. L'analyse croisée pluie-débits permet d'estimer le temps de réponse à 1 jours et l'effet mémoire (d'une pluie sur le débit) à 12 jours. La restriction du calcul de ces indicateurs sur des périodes plus courtes permet une étude de l'influence de la saisonnalité (Figure 66). Il est important de noter que les valeurs calculées sur des courtes périodes assimilées comme homogènes réduisent l'effet mémoire. Ainsi, cette analyse met en évidence : 1) une faible variation du temps de réponse restant sur une base de 1 jour ; 2) une légère variation l'effet

mémoire (de 3 à 6 jours) au cours de l'année. Ainsi, les précipitations printanières (les plus abondantes) sont plus rapidement assimilées que sur les autres périodes.

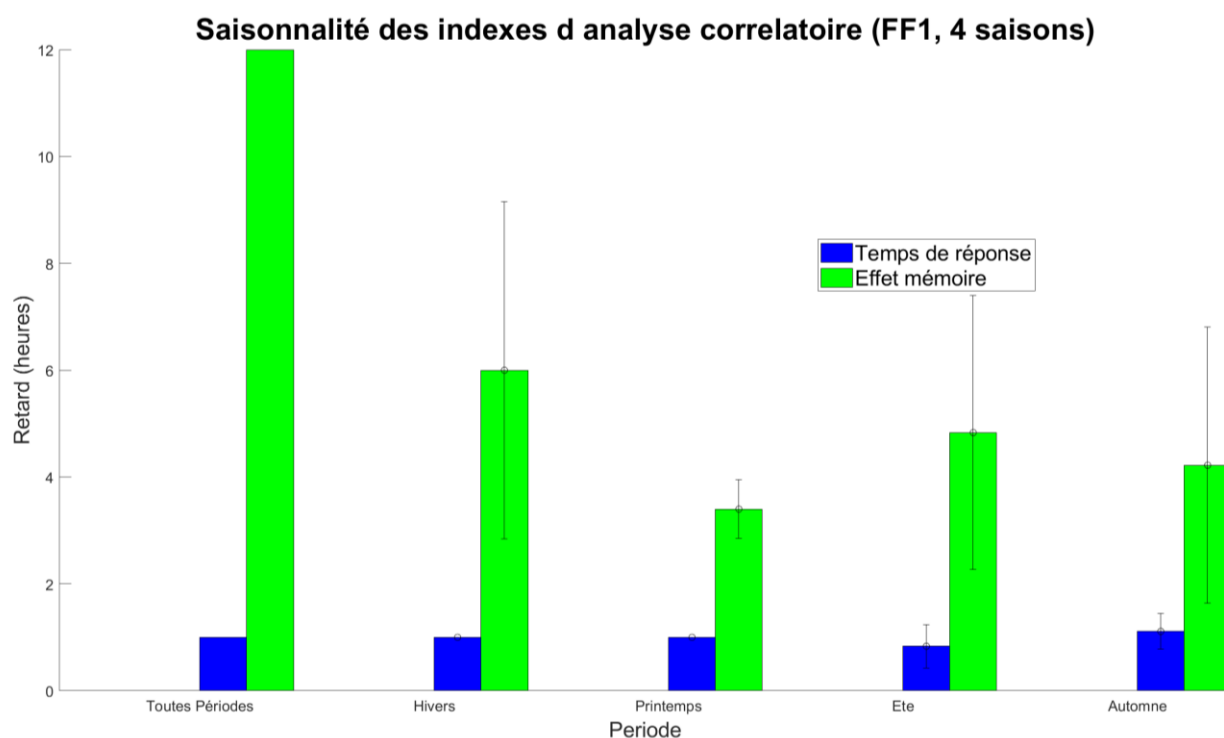


Figure 66. Étude de la saisonnalité des temps de réponse et effet mémoire du ruisseau de Fontfroide

3.1.5.3. Coefficient d'écoulement

3.1.5.3.1. Analyse comparative

L'analyse comparative du coefficient d'écoulement, calculé sur les 180 jours précédents une date t , entre les deux ruisseaux révèle des différences majeures. La Figure 67 décrit la dynamique temporelle du coefficient. La comparaison de cet indice montre que sur la période septembre 2014- novembre 2018, les coefficients d'écoulement moyens (calculs sur les 180 jours précédents) de FF1 et RDL sont respectivement de $0,66 \pm 0,23$ et $0,23 \pm 0,11$. Cela signifie donc que : 1) la tourbière permet une restitution plus large de la pluie via le ruisseau de FF1 ; 2) cette restitution pour le ruisseau passant par la tourbière possède une plus grande variabilité. Ces deux tendances semblent aller dans le sens d'un rôle potentiel de soutien d'été de la tourbière pour le ruisseau de Fontfroide.

3.1.5.3.2. Saisonnalité

Outre cette différence moyenne, il est important de noter que les coefficients d'écoulement de FF1 présentent à certains moments (mars-mai 2018) des valeurs supérieures à 1. Cela signifie, qu'à cette période précise, il s'écoule légèrement plus d'eau dans le ruisseau que l'eau issue des pluies durant les 180 derniers jours. La fonte du manteau neigeux qu'il est difficile de prendre en compte ne peut que partiellement expliquer ce phénomène, puisque celui-ci n'est pas reproduit sur le ruisseau RDL. Cela pourrait mettre en valeur une restitution différée de la tourbière, en lien avec une très forte saturation.

En étudiant d'un peu plus près la saisonnalité (Figure 67), nous nous apercevons que les deux coefficients d'écoulements n'évoluent pas de la même manière au cours d'un cycle hydrologique. Durant les périodes associées à des étiages (été-automne), le coefficient d'écoulement de FF1 diminue mais reste élevé ($>0,50$). Ainsi, cette différence de comportement et de valeur des coefficients d'écoulement permet de supputer un soutien d'été et automnal de la tourbière au ruisseau de Fontfroide. Toutefois, cette analyse ne permet de préciser s'il s'agit d'eau de pluie déstockée pour la tourbière ou d'apports souterrains différés dans le temps par une circulation dans la tourbe.

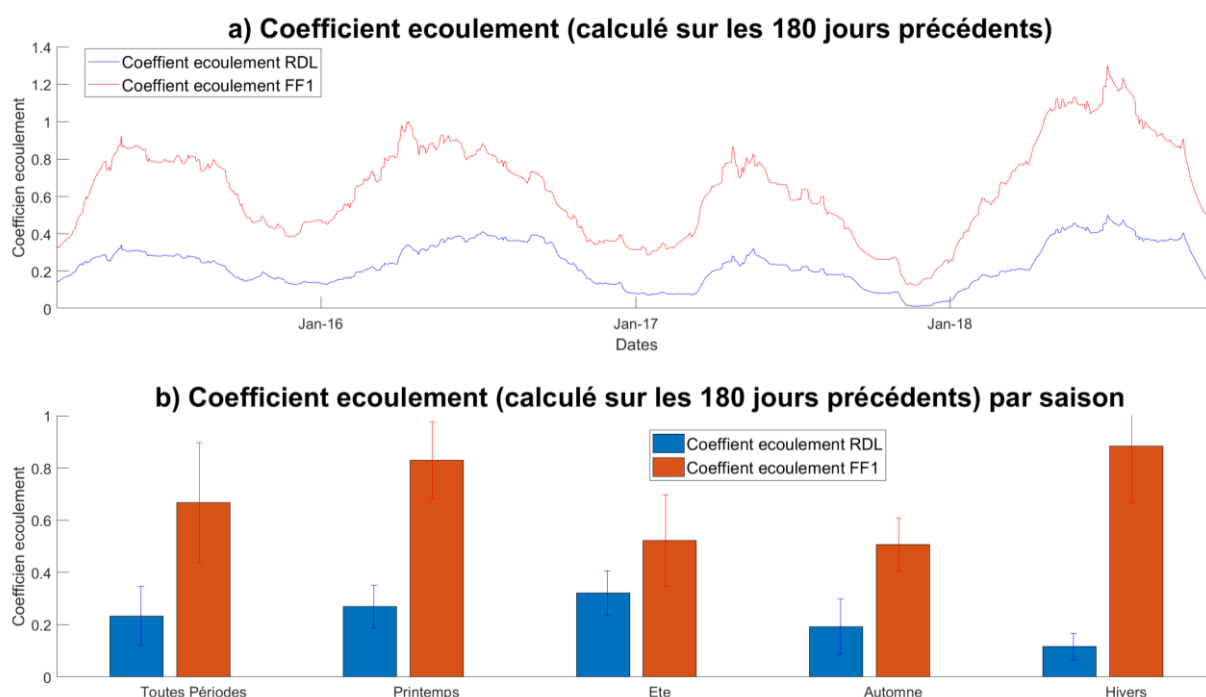


Figure 67. Analyse du coefficient d'écoulement pour les ruisseaux de Fontfroide et du lac : a) série temporelle ; b) Analyse de la saisonnalité

3.1.5.3.3. Analyse de la nappe

Les analyses corrélatoires révèlent l'hétérogénéité de la nappe. Les autocorrélogrammes montrent que selon la localisation dans la tourbière, l'inertie (effet mémoire) est variable : de 39 jours au P17 à 86 jours pour P20_Solinst ou 77 jours pour le P14. Les piézomètres ayant les plus petits temps de mémoires sont, logiquement, ceux situés près de fossés de drainage. Concernant la relation pluie-hauteur piézométrique, les temps de réponse sont quasi-immédiats (1 jours), les effets mémoires sont similaires (~13 jours). Le faible effet mémoire trouvé pour P20_Solinst (8 jours) est à relativiser en raison de la petite profondeur dont nous disposons sur les données issues de ce piézomètre.

Piézomètre	Inertie	Système pluie-piézomètre	
	Effet mémoire (jours)	Temps de réponse (jours)	Effet mémoire (jours)
P3	67	1	12
P13	54	1	13
P14	77	1	13
P15	56	1	14
P17	39	1	12
P20_Diver	113	1	1
P20_Solinst	86	1	8
PM	143	1	3

Tableau 9. Tableau des indicateurs statistiques liés aux piézomètres suivis continuellement (PM et P20_Diver sont considérés comme défaillants, P20_Solinst présente une courte profondeur temporelle (octobre 2017- novembre 2018))

3.1.6. Comparaison entre sondes installées sur le ruisseau de Fontfroide

3.1.6.1. Comparaison des sondes FF1 et FFAv

La comparaison entre les sondes FF1 et FFAv, distantes de 28,25 m, révèlent des différences significatives entre les données relevées, malgré de bons coefficients de corrélation ($>0,88$). Ainsi, les données de conductivité diffèrent de $13,92 \pm 6,03 \text{ } \mu\text{m.cm}^{-1}$, et les données de débits de $-9,57 \pm 12,24 \text{ l.s}^{-1}$. Il apparaît important de : 1) ré-établir la courbe de tarage de FF1 ; 2) ré-étalonner les sondes de conductivités.

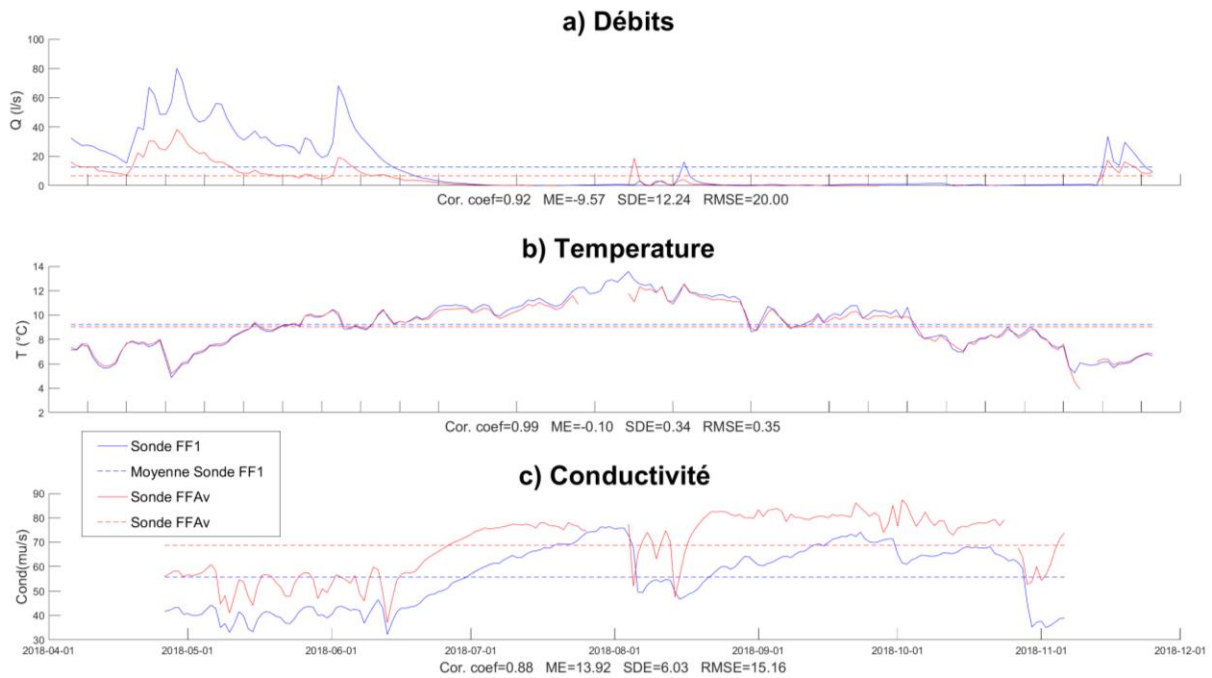


Figure 68. Analyse comparatives entre les sondes FF1 et FFAv : a) débits b) température, c) conductivité

3.1.6.2. Comparaison des FFam et FFAv

La comparaison entre les sonde FFam et FFAv, distantes de 133,80 m, montrent de faibles différences entre les données relevées, et de bons coefficients de corrélation ($>0,86$). Ainsi, les données de conductivité diffèrent de $-8,88 \pm 6,29 \mu\text{m}\cdot\text{cm}^{-1}$, signifiant que la traversée de la tourbière contribue à une déminéralisation du cours d'eau. Les données de débits diffèrent de $-3,56 \pm 4,83 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$, et le débit reste le plus élevé au niveau de FFam (en amont). La température varie peu ($-0,34 \pm 0,47 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Il est à noter que : 1) sur certaines courtes périodes, il peut y avoir des inversions (plus de conductivité en aval, plus de débits en aval) ; 2) les inversions notées en août 2018 correspondent vraisemblablement à la fin d'une période où une des deux sondes était restée hors d'eau.

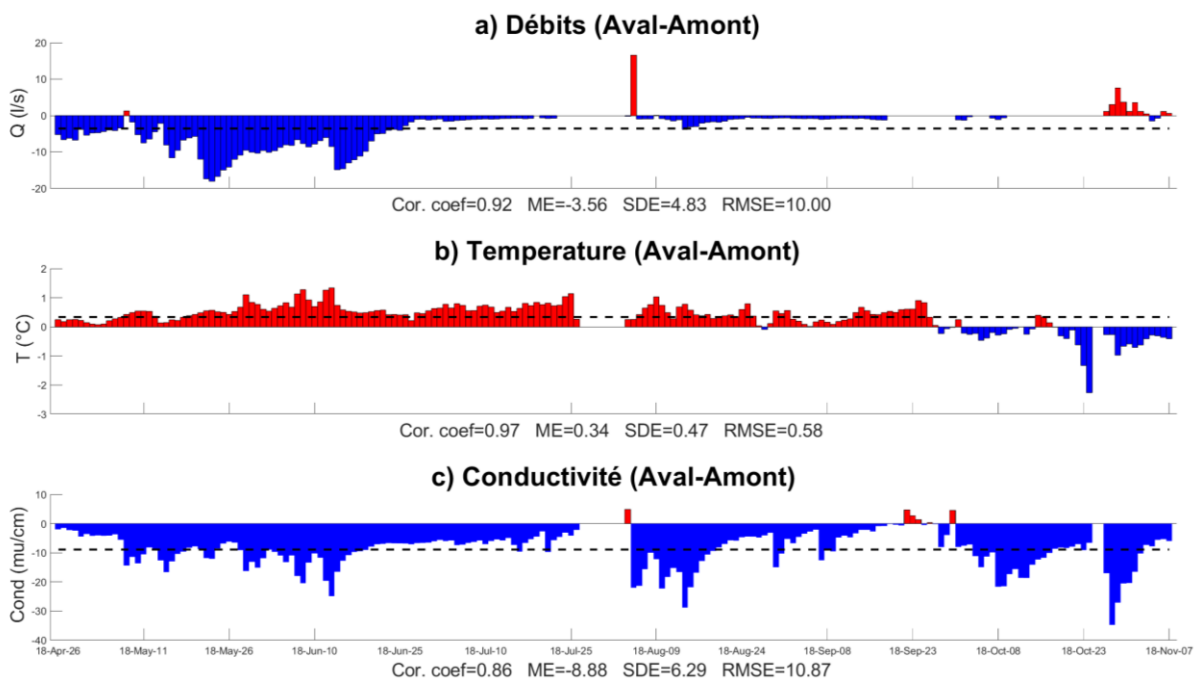


Figure 69. Analyse comparatives entre les sondes FFam et FFAv : a) débits b) température, c) conductivité.

3.1.6.3. Comparaison des FF1 et RDL

Les sondes FF1 et RDL sont distantes de 489 m. Par leur proche distance, ces ruisseaux sont soumis à des conditions climatiques très similaires. Outre la différence de tailles de bassin versant (735 000 m² pour le ruisseau du lac, et 625 929 m² pour le ruisseau de Fontfroide), la différence majeure entre ces cours d'eau est que le ruisseau de Fontfroide traverse la tourbière, contrairement au ruisseau du lac. De plus, il est important de noter que la sonde FF1 est placée en sortie de la tourbière, alors que la sonde RDL est située en amont du lac.

Ainsi, les différences entre données de débits, température et conductivités des deux cours d'eau (Figure 70) peuvent être vraisemblablement attribuées à la traversée de la tourbière. La comparaison des débits montre que leurs débits sont similaires. En effet, la différence moyenne des débits sur la période septembre 2014- novembre 2018 est de 8.63 ± 12.63 l.s⁻¹. Les températures sont similaires (différence moyenne de $-0,15 \pm 1,01$ °C). Par contre, les conductivités montrent une différence moyenne de $-54,69 \pm 31,11$ uS.cm⁻¹, confirmant le caractère d'eaux de tourbière peu minéralisées.

L'analyse comparative des indicateurs liés l'analyse corrélatoire montre que les deux cours d'eau ont des index identiques : même temps de réponse (1 jours), et même effet mémoire (12 jours). En revanche, en étudiant la saisonnalité de ces indices, il apparait que l'effet mémoire (Pluie-débits RDL) chute drastiquement à 1 jour pendant le printemps (contre 3 pour le ruisseau de Fontfroide). Ainsi, la tourbière réagit plus lentement aux pluies printanières.

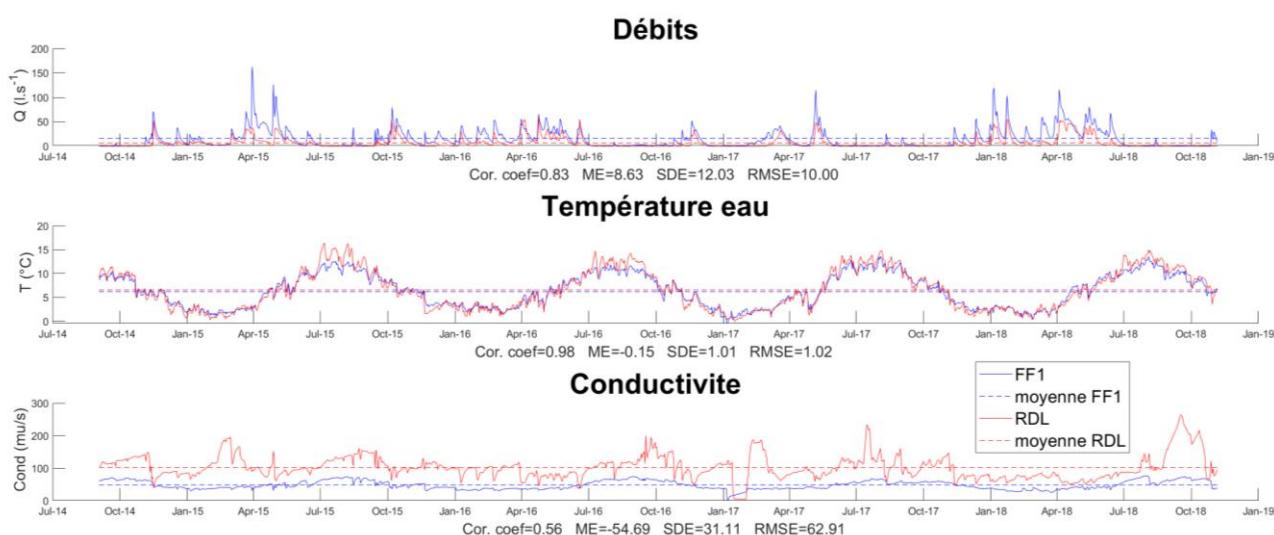


Figure 70. Comparaison entre la sonde FF1 et la sonde RDL a) débits, b) température, c) conductivité

3.2. Tourbière de Frasne

Le même type d'approche qu'au Luitel est mis en œuvre sur la tourbière de Frasne pour l'analyse statistique des données hydrologiques. Un premier travail de préparation des données et d'analyse a été effectué dans le cadre du stage de H. Caldirak. À l'heure actuelle, ces résultats ne sont pas assez aboutis pour être présentés. Les travaux continueront en phase 3.

4. Modélisation du rôle de soutien d'été

4.1. Modèles réservoirs – modélisation du soutien d'été au Luitel

Cette partie présente une synthèse du travail de modélisation du soutien d'été au Luitel, fondé sur un modèle de type « réservoir », effectué par Y. Pascoletti dans le cadre de son stage de master 2 à Mines Saint-Etienne⁹. Ce stage a été réalisé conjointement à celui de T. Jolly sur le volet pédologie (Partie III - §2. Volet pédologie, p100).

L'approche qui a été choisie ici pour l'évaluation quantitative du soutien d'été est la modélisation numérique. Un modèle de type « réservoir » a ainsi été conçu pour simuler le fonctionnement hydrologique du site. Cette approche consiste en une simplification du système constitué de la tourbière et de son bassin versant. Le modèle a été réalisé à l'aide du logiciel Vensim¹⁰, qui est un outil de la dynamique des systèmes facile à prendre en main et qui permet la mise en œuvre des modèles rapidement à l'aide d'équations simplifiées. Le modèle ainsi réalisé a permis une simulation validée par l'observation. Cette validité a été évaluée à l'aide du calcul d'un indice de corrélation, lequel atteste d'une bonne fiabilité des résultats présentés. Les débits de soutien d'été ont été calculés à partir de ce modèle validé.

4.1.1. Fondements du modèle conceptuel pour la modélisation du soutien d'été

Les zones humides se caractérisent par la présence d'eau permanente ou temporaire (SIE, 2017), le critère hydrologique est donc fondamental pour comprendre leur fonctionnement (processus, fonction par exemple). Par ailleurs, les caractéristiques hydrologiques conditionnent la présence d'une flore spécifique au caractère hygrophile (SIE, 2017) et l'intensité des propriétés hydromorphes des sols (Medde et Gis Sol, 2013). Les zones humides sont classées d'après des typologies basées sur ces aspects, que ce soit Corine-Biotopes pour l'écologie (Bissardon et al., 1997), ou bien la typologie légale de l'Afés (2008) pour la pédologie. Les zones humides sont de plus au cœur d'enjeux de conservation majeurs de par les fonctions qu'elles assument. Ainsi, diverses typologies liées à leur fonctionnalité existent (Acreman et Miller, 2006). Ces fonctions sont à la base des services écosystémiques rendus par les zones humides, notion qui renvoie aux bénéfices que l'humain peut tirer de celles-ci. Les zones humides de tête de bassin versant apparaissent comme particulièrement intéressantes à cet égard car leur influence est généralement déterminante sur les flux quantitatifs et qualitatifs des eaux à l'aval (US EPA, 2015). Les tourbières sont des milieux humides représentatifs de tête de bassin versant d'altitude, même si leur présence est courante dans les plaines alluviales (tourbières fluviogènes) voire possible sur les littoraux. D'une manière générale, c'est l'excès d'eau permanent qui favorise la formation de tourbe.

Les tourbières doivent leur apparition et leur fonctionnement à un bilan hydrologique équilibré ou légèrement positif (Manneville et al., 2006). L'hydrologie ressort encore une fois comme un facteur prépondérant. Un consensus scientifique se fait donc autour des approches typologiques fondées sur la genèse de ces milieux en lien avec leur source d'approvisionnement en eau dominante (Manneville, 2001). Il est néanmoins nécessaire de garder à l'esprit les trois autres facteurs mis en avant plus haut. Cela se justifie pour le facteur écologique, par le fait que la végétation est l'expression du type d'alimentation hydrique. La pédologie, c'est-à-dire les caractéristiques des histosols constituant le milieu est également d'une grande importance puisqu'elle prête aux tourbières une hydrodynamique spécifique

⁹ Pascoletti Y. (2018) Modélisation du fonctionnement hydrologique de la tourbière du col de Luitel (Isère). Rapport de stage de master 2 Géographie Mention Gestion de l'Environnement, Université de Saint-Etienne, Mines Saint-Etienne, UMR 560 EVS, ZABR, AERMC, 140p.

¹⁰ Vensim software, © 2015 Ventana Systems : <https://vensim.com/>

PARTIE II – Volet hydrologie

dont dépend leur fonctions, notamment celles de stockage et de restitution (Agence de l'Eau Loire-Bretagne, 2002).

Le service de soutien d'étiage est rendu possible grâce à ces fonctions de stockage temporaire et de restitution déphasée. Cette notion est empruntée à l'hydraulique et renvoie à la gestion quantitative de la ressource en eau (les lâchers de barrage sont un exemple de mesures de soutien d'étiage). Une quantification de ce service nécessite de maîtriser le bilan hydrologique qui s'exprime généralement de la manière suivante (Porteret, 2008 ; Price, 2001) :

$$(P + Q_{eSo} + Q_{eSu}) - (ET + Q_{sSo} + Q_{sSu}) = \Delta R$$

Avec :

ΔR : quantité d'eau dans le réservoir (ex : tourbière)

P : précipitations

ET : évapotranspiration

Q_{eSo} : débit entrant (eau souterraine)

Q_{eSu} : débit entrant (eau de surface)

Q_{sSo} : débit sortant (eau souterraine)

Q_{sSu} : débit sortant (eau de surface)

La construction de ce bilan peut être mise en lien avec la typologie de Gilvear et Bradley (1994). Mais il est concrètement assez malaisé de « boucler » ce bilan en distinguant quantitativement les flux. Déterminer par exemple la proportion de pertes d'eaux à travers d'éventuelles fissures du socle où repose la tourbe est difficile ou peut même rester dans le domaine de l'hypothétique. En l'occurrence, la littérature scientifique nous engage à négliger ces éventuels flux (Van Der Schaaf, 2002). De plus, l'hétérogénéité et l'anisotropie des histosols induisent une complexité accrue pour notre démarche de quantification. Le modèle diplotelmique mis au point par Ingram (1978) facilite néanmoins notre approche. Ce modèle distingue l'acrotelme, couche de tourbe superficielle dont la conductivité hydraulique est suffisante pour la rendre hydrauliquement active, du catotelme, couche inférieure qui à l'inverse ne permet pas aux flux de transiter facilement. Les caractéristiques de l'acrotelme font que trois types d'écoulement sortants peuvent être distingués : 1) les écoulements rapides à sursaturation ; 2) les écoulements rapides à sous-saturation ; 3) les écoulements de base lents. Ce sont ces derniers écoulements qui attirent davantage l'attention en vue d'une caractérisation quantitative des débits de soutien d'étiage grâce à la longue durée sur laquelle ils peuvent potentiellement se maintenir.

L'étude vise une caractérisation à partir d'une approche de type systémique. Le systémisme est une façon de concevoir la réalité particulièrement pluridisciplinaire qui repose principalement sur la notion d'interrelation (Von Bertalanffy, 1993). Un système est donc un ensemble d'éléments qui échangent des flux entre eux ou avec leur environnement. La pensée systémique comprend la dynamique des systèmes, une sous-discipline qui permet la conception d'un système à partir de peu d'éléments (flux, réservoirs, variables auxiliaires, réseau de communication) en incluant le dynamisme, ou les changements internes, en fonction de la temporalité. Le site retenu pour cette étude peut être considéré comme un système avec des flux, qui correspondent aux éléments de gauche dans le bilan hydrologique (ci-avant), et qui conditionnent le niveau d'un réservoir, soit ΔR dans ce même bilan. Ce système a été représenté par un modèle conceptuel ou paramétrique ou encore « réservoir » qui convient parfaitement pour permettre une étude quantitative simplifiée, rapide et efficace du potentiel de soutien d'étiage.

4.1.2. Mise en œuvre et validation du modèle

Comme évoqué précédemment, le site d'étude est la tourbière du Col du Luitel. Située à 1200 m d'altitude, elle est sous l'influence d'un climat frais et humide avec 1233 mm de pluies reçues en moyenne par an et une température moyenne annuelle de 5,7°C. Sa surface est d'environ 10 hectares et elle se situe à l'aval d'un bassin versant de 555 hectares, divisés en plusieurs sous-bassins versants qui l'approvisionnent en eaux de pluies ruisselées. D'après la typologie selon les sources d'approvisionnement en eau dominantes, cette tourbière est de type ombrotrophe et partiellement minérotrophe. Les zones minérotrophes sont celles qui bordent les deux ruisseaux qui traversent la

tourbière, au Sud la source Pezanti, et au centre, Fontfroide. Le principal exutoire de la tourbière est le ruisseau de Fontfroide qui sépare deux zones ombrotrophes, soit deux cuvettes remplies de tourbe dont le socle se situe, au maximum, à environ 10 m de profondeur. Les informations, issues du plan de gestion du site (Desplanque, 2011), nous ont permis de déduire le fonctionnement hydrologique de la tourbière et de reprendre le bilan hydrologique établi plus haut. En vue d'une modélisation, les différents flux ont été ainsi identifiés et trois réservoirs ont été distingués (Figure 71) :

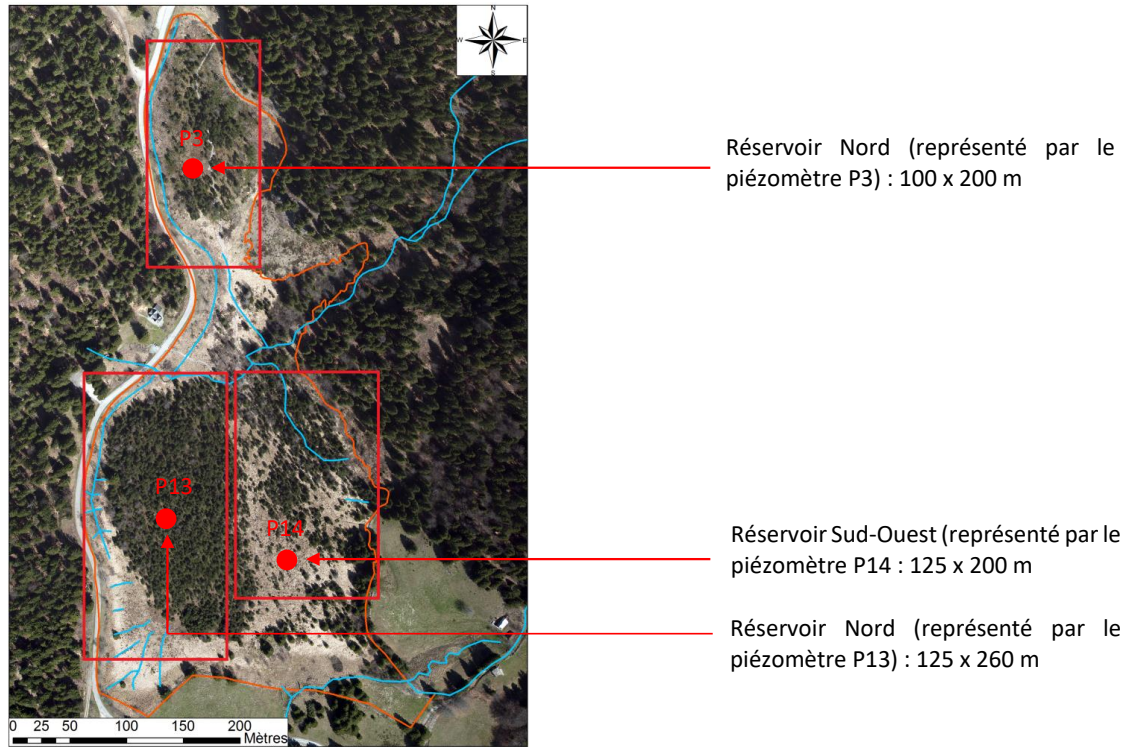


Figure 71 : Trois réservoirs pour la modélisation des flux

La Figure 72 propose une synthèse visuelle des flux et des réservoirs constitutifs du modèle conceptuel. Le modèle complet est présenté Figure 73.

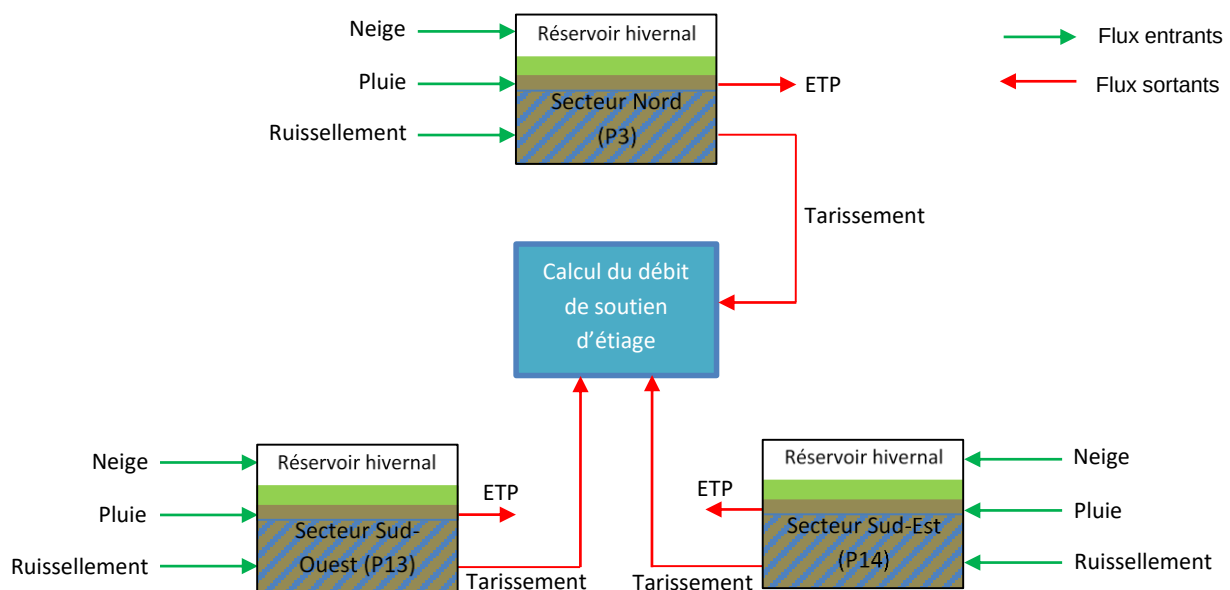


Figure 72 : Schéma de synthèse du modèle conceptuel : flux et réservoirs

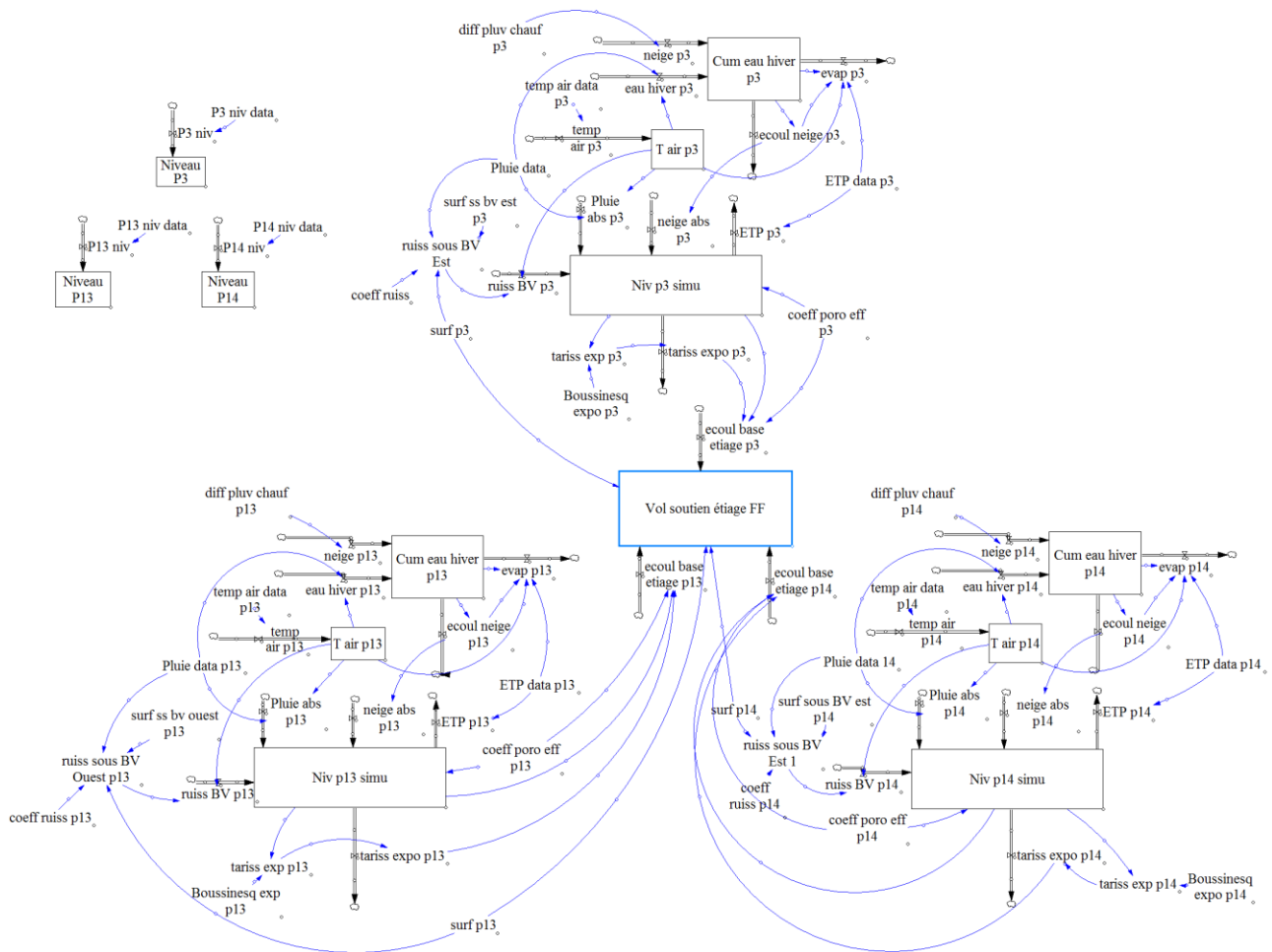
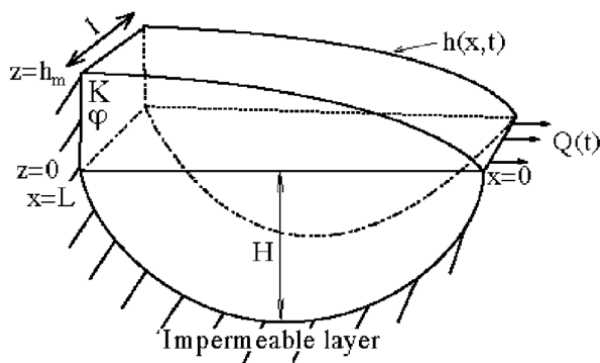


Figure 73 : Modèle complet réalisé avec le logiciel Vensim

L'état de l'art a permis d'extraire des valeurs issues de la littérature scientifique (Porteret, 2008 ; Rezanezhad et al., 2016) afin de modéliser l'hydrodynamisme de la tourbière et ainsi de simuler les écoulements. Ainsi, la formule de Boussinesq adaptée a été utilisée pour simuler le tarissement des réservoirs poreux (Figure 74).

Modèle :



Formule :

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

$$Q_0 = (\pi/2) K H l (h_m/L),$$

$$\alpha = \pi^2 K H / 4 \varphi L^2$$

Avec,

- K : perméabilité (m/s)
- H : profondeur du socle (m)
- h_m : hauteur de la nappe (m)
- L : longueur de la surface d'écoulement (m)
- l : largeur de la surface d'écoulement (m)
- φ : porosité efficace

Figure 74 : Modèle d'écoulement des fluides dans un réservoir poreux (Dewandel et al., 2002)

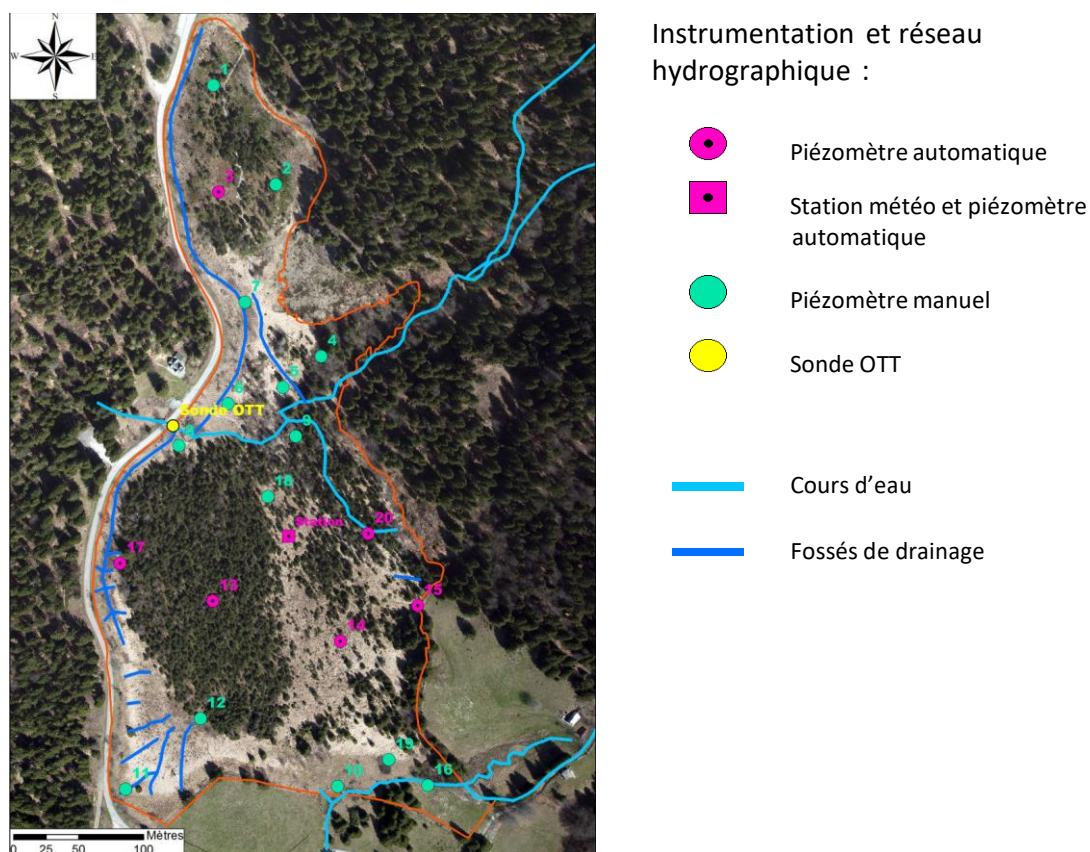


Figure 75 : Instrumentation de la tourbière du Col du Luitel

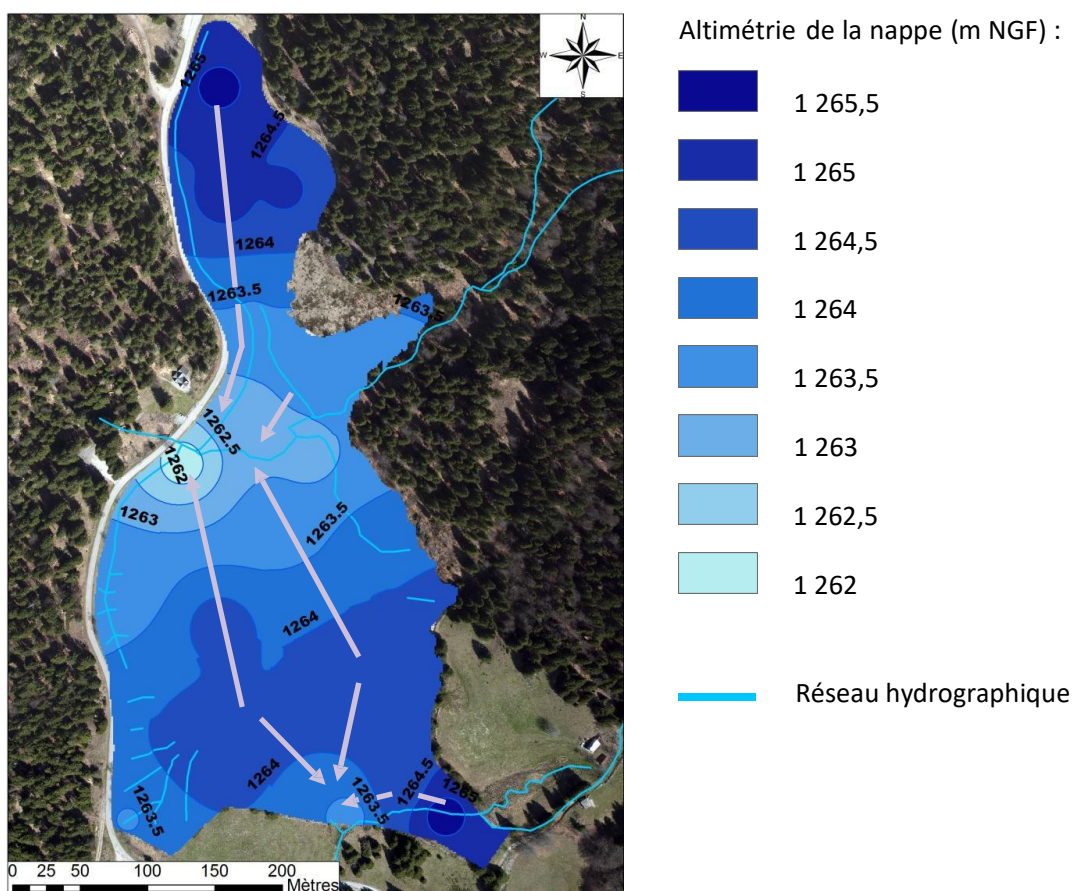


Figure 76 : Carte piézométrique de la tourbière du Col du Luitel (construite à partir des niveaux relevés le 25.06.2018)

La construction du modèle s'est appuyée sur l'instrumentation (Figure 75) et les données hydrologiques et météorologiques acquises depuis plusieurs années par les gestionnaires du Luitel. Elles nous ont permis de modéliser trois cycles hydrologiques (mi 2014 à fin 2017). L'hydrologie du site est connue grâce à un réseau de 20 piézomètres dont 6 équipés de sondes mini-diver permettant des relevés horaires. Les aspects météorologiques du site sont évalués grâce à la station dont la tourbière est équipée et qui mesure, entre autres, la pluie et la température de l'air et calcule l'ETP.

Un pluviomètre chauffant situé plus au Sud apporte également des données sur les précipitations sous forme neigeuse. La méthode de construction du modèle a consisté en l'implémentation progressive des différents flux à l'aide de du logiciel Vensim. Le logiciel ArcGis a également été utile pour calculer les sous-bassins versants et ainsi évaluer les ruissellements et pour créer, par interpolation, la carte piézométrique (Figure 76) de la tourbière (utile pour comprendre la manière dont l'eau s'écoule et donc pour mettre en place la géométrie des réservoirs).

Le premier objectif de ce modèle a été de simuler les variations des niveaux de nappe des trois secteurs retenus. La simulation a été comparée aux variations établies par les sondes des piézomètres 3, 13 et 14 (Figure 71 et Figure 75). Ces piézomètres sont considérés comme représentatifs respectivement des secteurs Nord, Sud-Ouest et Sud-Est étant donné qu'ils se corrélaient bien avec ceux que chacun de ces secteurs comprennent. Le comportement de ces piézomètres a donc été interpolé à une surface afin de permettre une évaluation quantitative. La simulation des niveaux de nappe sur ces trois secteurs se corrélaient bien avec l'observation. Le coefficient de corrélation étant à chaque fois supérieure à 0,8, le modèle est considéré comme validé. Dans Vensim une « boîte » de calcul dans laquelle sont dirigés les écoulements sortants de nos trois réservoirs a été implémentée. Cette boîte calcule des débits de soutien d'étiage qui sont fonction de la surface modélisée et des variations de hauteur de nappe simulées. Le calcul n'est actif qu'à partir d'un certain seuil déterminé d'une part, par la décomposition graphique de l'hydrogramme qui nous a permis d'évaluer le lit d'étiage de Fontfroide à partir des écoulements de base et d'autre part, par la mise en corrélation du lit d'étiage de Fontfroide avec les niveaux de nappes dans la tourbière.

4.1.3. Résultats : une première quantification du soutien d'étiage au Luitel

D'après le seuil retenu, la simulation (2014-2017) fait apparaître trois périodes d'étiages estivales, une hivernale et une plus étendue, en 2017, où l'étiage se manifeste de manière plus diffuse (Figure 77). En terme quantitatif, la valeur de débit de soutien d'étiage journalière maximale est de 0,38 l/s.

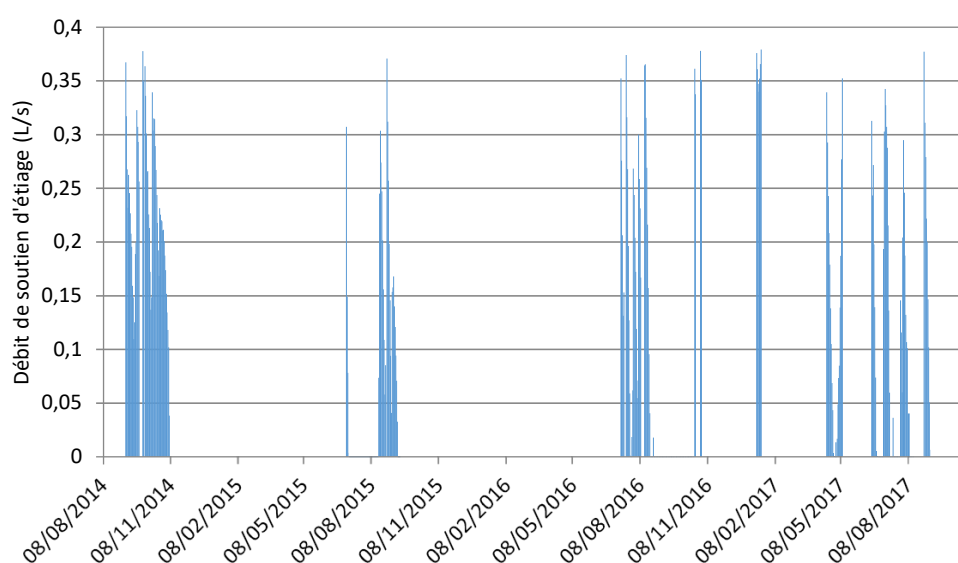


Figure 77 : Débits participant au soutien d'étiage

Les valeurs de soutien d'été calculées par le modèle doivent être comparées afin de mieux comprendre ce qu'elles représentent. Une première comparaison a été réalisée entre les débits moyens journaliers de soutien d'été et les débits moyens journaliers de Fontfroide pendant les trois périodes d'été estivales que le modèle a fait ressortir (Tableau 10).

Il est par ailleurs notable que quantitativement, les débits de soutien d'été s'amenuisent alors que les niveaux de Fontfroide baissent, comme le démontrent les graphiques de comparaison suivants proposés ici avec une double échelle (Figure 78 à Figure 81). La sécheresse prévenant la possibilité de réplétion des réservoirs tourbeux, ceux-ci se tarissent naturellement et n'apportent qu'une quantité de plus en plus faible d'eau.

Période	Débit moyen de Fontfroide (l/s)	Débit moyen de soutien d'été (l/s)	Pourcentage
Été 2014	8,36	0,21	2,52 %
Été 2015	11,74	0,06	0,53 %
Été 2016	4,56	0,07	1,45 %

Tableau 10 : Comparaison des moyennes des débits de Fontfroide et de soutien d'été par période

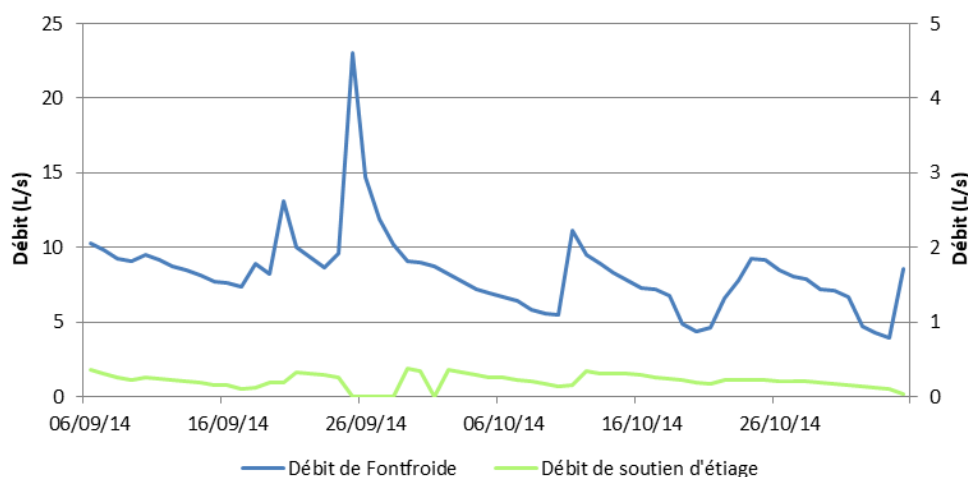


Figure 78 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2014 :

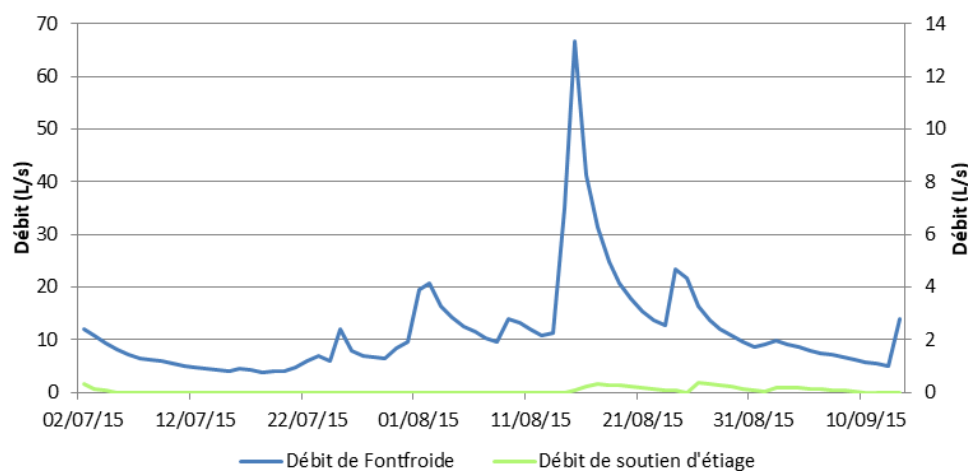


Figure 79 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2015

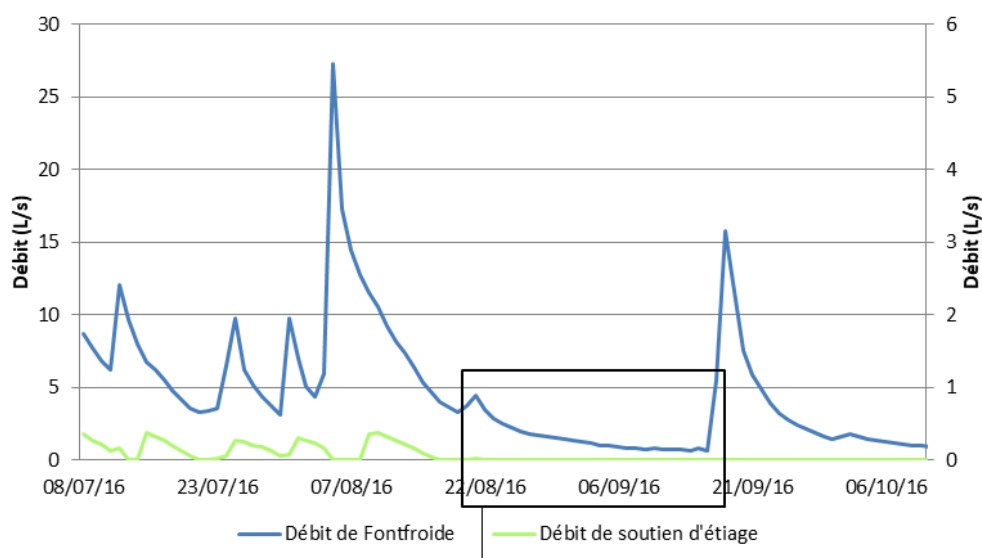


Figure 80 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2016

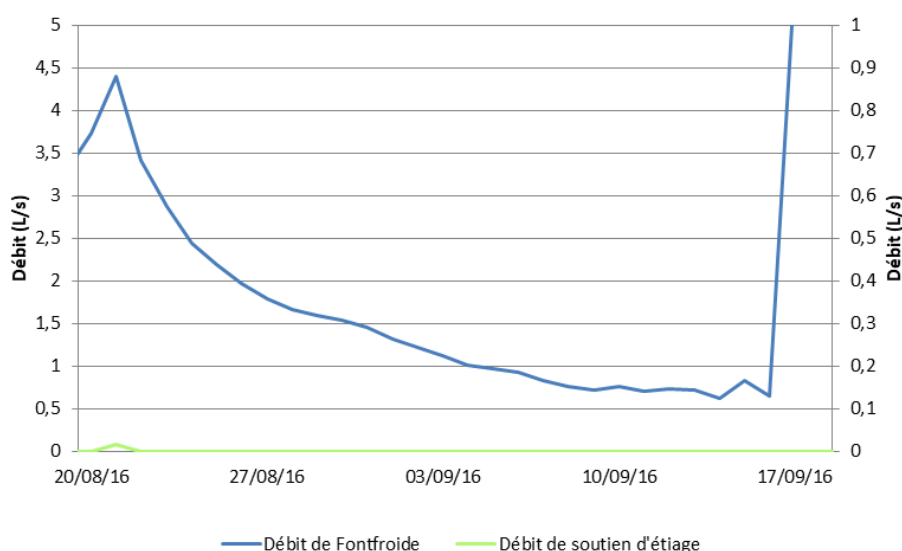


Figure 81 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2016 (agrandissement de la partie encadrée de la figure précédente)

4.1.4. Discussion

La comparaison des valeurs de débit d'étéage peut également être faite avec d'autres débits, ce qui permet par ailleurs de proposer un recul sur les résultats et la méthode. Le QMNA5 est généralement utilisé afin d'apprécier l'étéage, néanmoins la série de données, trop courte, rend son évaluation mal aisée et peu pertinente. À titre indicatif, le module interannuel est donné dans le Tableau 11.

Année	Débit moyen annuel (L/s)
2011	28,57
2012	37,89
2014	39,40
2015	36,96
2016	31,11
Module	34,79

Tableau 11 : Débits moyens annuels et module interannuel de Fontfroide

De plus, cette évaluation ne saurait faire sens qu'à l'échelle à laquelle notre travail a été réalisé. Certes des débits d'étiage sont évalués dans le contexte départemental, et les enjeux du soutien d'étiage ressortent dans le Sage du bassin versant Drac-Romanche (Agence MTDA, 2017), mais les ordres de grandeurs sont tout autres à cette échelle et empêchent toute comparaison.

En outre, l'analyse des résultats permet également d'envisager des pistes d'améliorations qui pourront être utilement mises en œuvre afin de consolider ceux-ci, et surtout, afin de mieux traduire en système la réalité saisie d'après l'observation. Les courbes de comparaison entre la simulation et l'observation montrent que le fonctionnement hydrologique de la tourbière en période hivernale pourrait être transcrit de manière plus fine. Le réservoir d'eau hivernal à vidange lente que nous avons mis en place a néanmoins permis de modéliser rapidement un mécanisme complexe. Ses imprécisions ne nuisent pas aux résultats puisque nous évaluons l'étiage pour la période estivale. Le modèle semble, pour certaines périodes, se rapprocher de très près de la réalité, tandis que pour d'autres il accuse d'un léger décrochage. Dans ce dernier cas, les écoulements semblent avoir été surévalués et la simulation serait probablement meilleure si les réservoirs tourbeux étaient scindés en deux : un réservoir d'eau utile où l'ETP serait puisé, et un réservoir d'eau libre où les écoulements auraient lieu. La démarche est basée sur des simplifications qui sont acceptées dans une certaine mesure. Pour permettre la mise en œuvre du modèle, des valeurs de porosité efficace ou de conductivité hydraulique uniques ont ainsi été affectées à l'ensemble des différentes aires modélisées. Ce travail de terrain a permis de faire le constat de la complexité du site et des processus qui l'animent. À titre d'exemple, T. Jolly (Partie III - §2. Volet pédologie, p100) a pu mettre en avant certains indices de résilience, tels que la relance de la turfigenèse, ou certaines traces de dégradations, telles que la présence d'histosols assainis qui affectent le comportement hydrologique du site. De plus la géométrie des aires modélisées où les écoulements ont lieu a dû être simplifiée pour être traduite sous forme de sections rectangulaires. La géométrie est en réalité plus complexe, d'autant qu'elle est variable avec l'effet de respiration des tourbières (Howie et Hebda, 2018) non pris en compte. Ces facteurs de complexité sont certes occultés par le modèle mais sont tout de même considérés pour les éclairages intéressants qu'ils apportent sur la fonctionnalité du site. Ils justifient par ailleurs la nécessité de la démarche itérative qui a permis la construction progressive du modèle. Ils montrent également l'intérêt d'une itération entre la théorisation du fonctionnement hydrologique et des observations de terrains plus concrètes qui sont en l'occurrence relatives à l'approche de T. Jolly (Partie III - §2. Volet pédologie, p100).

La construction du modèle a enfin été très largement tributaire des données disponibles, d'autant que le modèle a été conditionné par la manière dont ces données ont été traitées. Il a ainsi fallu réagencer ces données sur un pas de temps journalier, et également combler certains vides liés à des défaillances techniques. Le modèle Safran-Isba a ainsi pu être utilisé pour remplacer des valeurs d'ETP absentes, d'autant que la corrélation des valeurs de ce modèle avec celles calculées par la centrale installée dans la station du Luitel est tout à fait correcte. Quant à la pluie, les données de la station de Chamrousse, adjacente, située à 5 kilomètres, ont été utilisées en cas de vides de données. Fort heureusement, ces vides sont limités à moins d'une dizaine de jour car les données de la station de Chamrousse ne se corrélaient pas très bien avec celles du Luitel. Certaines données n'ont pas été utilisées dans Vensim, mais ont tout de même servi à élaborer notre approche. La mise en corrélation des piézomètres d'un même secteur nous a par exemple permis de savoir dans quelle mesure tel piézomètre pouvait être représentatif du comportement de la nappe sur une aire d'étude et l'analyse des hydrogrammes de Fontfroide nous a permis de déduire le lit d'étiage. Corréler les données est donc à la fois utile pour combler les vides par extrapolation, ou pour généraliser une tendance ponctuelle sur une aire par interpolation. L'imprécision liée à la mesure des données peut également être un facteur limitant la qualité des résultats. Les capteurs ont des marges d'imprécision qui paraissent faibles prises séparément. En revanche leur cumul, lié à la mise en relation mathématique des divers paramètres mesurés au sein d'une formule déterminant les variations des niveaux des réservoirs, est susceptible de donner une marge d'erreur assez importante. Cette imprécision semble compromettre qu'assez peu une démarche

aussi simplificatrice que la nôtre. Un autre facteur d'imprécision provient de l'élaboration du calcul de l'ETP qui repose justement sur une relation mathématique, en l'occurrence la formule de Penman, entre plusieurs paramètres mesurés par la station météorologique¹¹. Le calcul effectué par la centrale de la station météo du Luitel est cela dit extrêmement proche de l'ETR. Néanmoins, ces valeurs devraient peut-être être pondérées en fonction du type de végétation. L'observation des données piézométriques révèle d'ailleurs des battements de nappes plus importants dans le secteur de la pinède que dans celui du prébois ou de la dépression à Scheuchzérie (au Nord), et pour cause, les arbres consomment d'avantage d'eau¹². D'ailleurs les variations des hauteurs de nappe sont susceptibles de soumettre l'évapotranspiration à un effet de seuil, qui correspond : 1) à la profondeur à laquelle les espèces végétales sont capables de puiser de l'eau et ainsi d'enclencher le phénomène d'évapotranspiration ; 2) à la disponibilité de l'eau mobilisable (eau utile + eau libre) par les végétaux qui conditionne l'ETP pour satisfaire la demande climatique¹³.

Au vu de tous ces éléments qui relativisent la méthode et les résultats, une perspective intéressante consisterait à proposer d'autres scénarios. Que se passe-t-il si l'ETP est revue à la baisse ? Que se passe-t-il si des pertes souterraines sont intégrées ? Que se passe-t-il si l'argile n'imperméabilise que le fond et pas les bords de la tourbière ? Le modèle a été construit à partir d'hypothèses, d'autres pourraient aussi être testées.

4.1.5. Conclusion

Il ressort donc de l'étude quelques résultats susceptibles d'améliorer la connaissance du fonctionnement des zones humides, mais qui sont toutefois à interpréter avec un certain recul car ils découlent d'un choix méthodologique qui est apparu pertinent mais qui n'a pas pour autant vocation d'absolu. Nous nous sommes en effet attachés à montrer que le travail avec des données environnementales induisait nécessairement des biais et un certain nombre d'incertitudes. Certes ces incertitudes peuvent être jugées comme acceptables dans la démarche simplificatrice mais elles engagent tout de même à une certaine prudence quant à l'utilisation des résultats. L'intérêt de ce travail réside surtout dans la démarche qui a permis d'aboutir aux résultats présentés, et dans le fait qu'elle puisse être reprise pour d'autres études. Cela pourrait éventuellement être le cas pour le site de Frasne. Il s'agit en l'occurrence d'un complexe tourbeux installé dans une dépression comblée par des formations glaciaires. Le site comprend 37 tourbières pour une surface d'environ 1057 hectares. La démarche pourrait servir de base pour une modélisation d'un système plus grand et plus composite que celui de Luitel.

¹¹ Cette formule a été établie à partir d'un dispositif expérimental dans lequel l'ETP est mesurée en clysimètre avec une végétation couvrante et en pleine croissance (Fétuque élevée). Tout est mis en place expérimentalement pour que l'ETP soit satisfaite.

¹² Les racines des pins à crochets sont superficielles et explorent essentiellement les 20 à 30 cm. Si les arbres consomment plus d'eau, le réseau de sphaignes constitue une mèche efficace qui favorise quant à elle la remontée capillaire de l'eau sur plusieurs dizaines de centimètres (André et André, 2008).

¹³ Les grosses molécules humiques et la tourbe ont une affinité pour l'eau qui est forte et dont une forte proportion (eau liée) n'est pas disponible pour l'ETP.

4.2. Réseaux de neurones

4.2.1. Objectifs

Lorsque le fonctionnement d'un système hydrologique ne peut être décrit de façon explicite parce qu'il est trop complexe ou trop incertain, l'approche de modélisation statistique par réseaux de neurones présente l'avantage de ne pas faire d'hypothèse sur ce fonctionnement en proposant de relier entrées et sorties du système de la meilleure manière possible sur cette base.

4.2.2. Données

La Figure 82 présente les données utilisées pour les modélisations : i) précipitations hybrides ii) évapotranspiration et évapotranspiration virtuelle iii) débits observés par la sonde FF1 iv) piézomètres (P3, P13, P14). Le choix des piézomètres est fait en fonction de leur situation au sein de la tourbière : P3 situé au nord du ruisseau de Fontfroide, P13 et P14 sont situés au sud du ruisseau et repartis centralement sur les zones sud-est et sud-ouest, respectivement. Les autres piézomètres automatiques présentent des contraintes : la sonde installée en P20 a été défaillante et a nécessité un changement d'équipement, P17 est situé à côté d'un fossé de drainage qui altère les niveaux piézométriques, P15 est situé en bordure de la tourbière (donc peu représentatif), le piézomètre de la station météorologique n'étant pas ancré dans le sol, ses données associées sont difficilement exploitables.

		2014				2015				2016				2017				2018			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Ruisseau (C, T,D)	Sonde FF1																				
Piezo (T,D)	Piezomètre 3																				
	Piezomètre 13																				
	Piezomètre 14																				
Meteo	Evapotranspiration																				
	Evapotranspiration virtuelle																				
	Pluie																				
	Pluie avec neige																				

Figure 82. Données utilisées pour modélisations à base de réseaux de neurones (Pluie avec neige est aussi dénommée pluie hybride dans le texte)

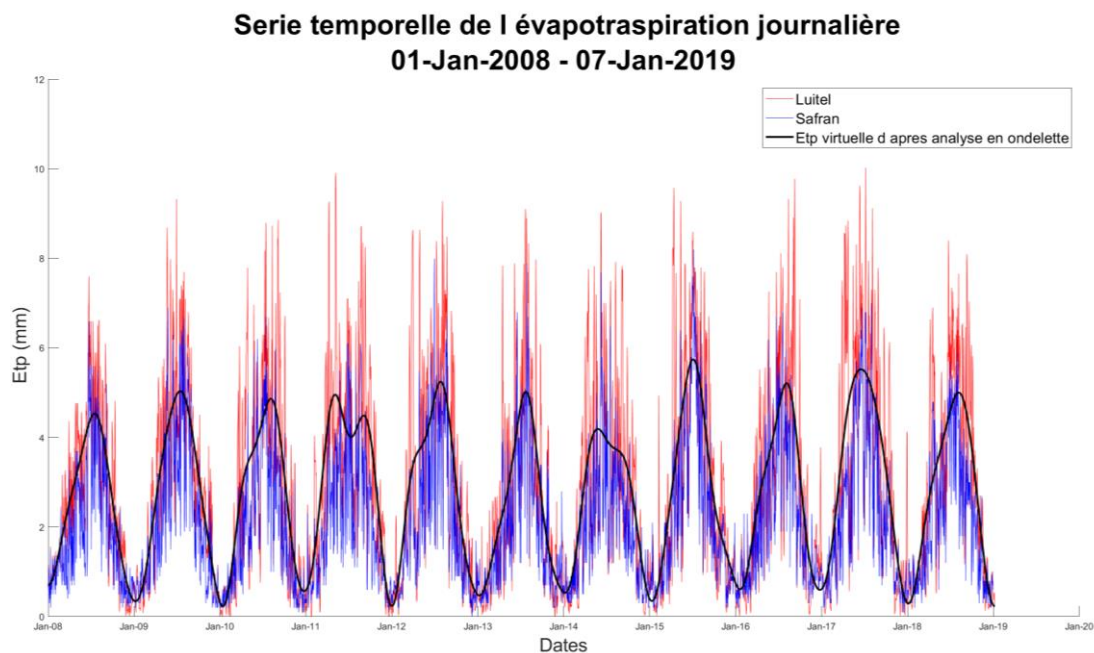


Figure 83. Comparaison de l'évapotranspiration virtuelle avec l'évaporation mesurée, et l'évaporation fournie par le modèle SAFRAN-ISBA

Andreassian et al. (2004) ont montré que : i) l'évapotranspiration calculée avec l'équation de Penman n'est pas forcément adaptée aux conditions locales, ii) en vue de modélisations hydrologiques, une évapotranspiration modélisée peut donner de meilleurs résultats. Devant le caractère très bruité des données d'évapotranspiration, il a été préféré de procéder à un lissage, les données sont ainsi plus faciles à assimiler pour un modèle statistique (Figure 83).

4.2.3. Méthode de sélection des modèles

4.2.3.1. Simulations effectuées

Les cibles choisies pour la modélisation sont le débit de Fontfroide, et un niveau piézométrique. Compte-tenu des objectifs de la simulation (processus longs) et des temps de calcul, le pas de temps choisi est journalier. Les simulations s'étendent sur la période aout 2014-novembre 2018 et prennent en compte toutes les données étudiées des chapitres précédents.

4.2.3.2. Complexité et Architecture

L'objectif est d'ajuster le nombre de neurones cachés, de variables d'entrées et leur profondeur temporelle (nombre de pas de temps) à utiliser. D'après les estimations de l'effet mémoire et du temps de réponse, des fenêtres glissantes (sur la profondeur) sur les données de pluie, d'évapotranspiration et des hauteurs piézométriques ont été ajustées avec précision au moyen d'une validation croisée, comme proposé par Kong A. Siou et al (2011). L'apprentissage a été fait en utilisant la méthode du second ordre de Levenberg-Marquardt connue pour sa robustesse. Enfin la validation croisée couplée à l'arrêt précoce est utilisée pour assurer une meilleure capacité de généralisation et éviter le surapprentissage.

Une fois les variables sélectionnées, une routine destinée à l'optimisation des couches de neurones cachés, des couches de neurones linéaires, et à l'entrée récurrente (si le modèle est récurrent). Cette étape d'optimisation est réalisée en minimisant le score de validation croisée obtenu sur chaque combinaison.

4.2.3.3. Sélection des ensembles d'apprentissage, d'arrêt précoce, test et validation croisée

Les données utilisées pour la modélisation sont disponibles sur la période aout 2014-septembre 2018 (Figure 84). L'ensemble d'apprentissage est constitué de 70 % de la base de données. L'ensemble d'arrêt précoce situé en dehors de l'ensemble d'apprentissage est constitué de 12 % des données et s'étend d'avril 2017 jusqu'à septembre 2017. L'approche de validation croisée devrait être appliquée à l'ensemble de la base de données d'apprentissage. En vue d'appliquer cette méthode, la banque de données est scindée en deux parties : les données relevées pendant les mois d'été et printemps (soit d'avril jusqu'à septembre), et les données pendant les mois d'automne et hiver (soit de janvier à mars et d'octobre jusqu'à décembre). L'ensemble test peut être n'importe lequel de la série de données. Arbitrairement, nous avons choisi pour tester un l'ensemble des données sur 2018 (de janvier à septembre). Cette année contient des événements hydrologiques intenses, moyens, et mineurs et des événements d'étiages. Un tel choix de tests permet un aperçu de l'efficacité du modèle développé sur une large gamme d'évènements. L'ensemble test constitue 18 % de la base de données.

	2014					2015					2016					2017					2018					
	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S
Ensembles																										

Figure 84. Répartition des ensembles pour la modélisation (vert = apprentissage, bleu = arrêt, jaune = test)

4.2.4. Présentation des modèles choisis

4.2.4.1. Modélisation du ruisseau de Fontfroide

La Figure 85 décrit le modèle de réseau de neurones simulant au mieux le ruisseau de Fontfroide. Il s'agit d'un réseau statique non dirigé. Pour simuler un débit journalier à un instant donné t , les entrées associées sont les informations de pluies allant du jour précédent jusqu'au 18^{ème} jour, l'évaporation sur

le même jour, le niveau des piézomètres P3 et P14 au même jour, et l'état sur les deux derniers jours du piézomètre P3. Les piézomètres sont agrégés via 5 neurones linéaires et le nombre de neurones cachés optimal est de 6.

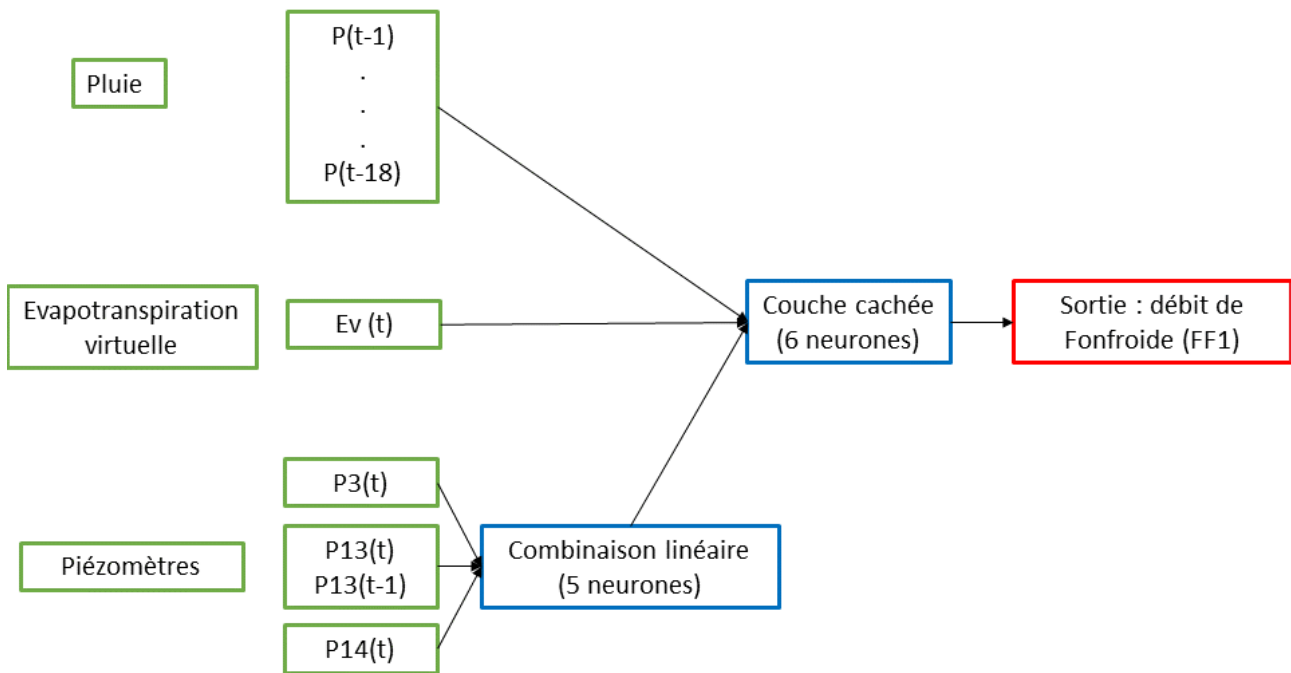


Figure 85. Architecture du réseau choisi pour modéliser le débit de Fontfroide

La visualisation de la comparaison simulation/observation durant apprentissage montre que le modèle reproduit assez fidèlement les débits observés (Figure 86). Le NSE obtenu pendant la calibration est de 0,72, le NSE obtenu sur l'ensemble de test est de 0,50. Ces résultats sont de qualité moyenne mais sont riches d'enseignements (Figure 86) :

- Le modèle reproduit en phase les pics de crues dans des proportions correctes, et simule bien les récessions de débits.
- Certaines périodes de hautes eaux, notamment avec la fonte de neige, sont mal simulées par le modèle.
- Des débits négatifs sont simulés par le modèle, généralement après une certaine période de basses eaux.

Ce dernier point est à mettre en perspective avec les remarques de la partie sur l'évapotranspiration dans les tourbières. Physiquement, l'existence de débits négatifs est évidemment absurde. Toutefois, le fait que le modèle produise ces valeurs pourrait montrer qu'après une période d'évapotranspiration suffisamment longue, l'évapotranspiration potentielle que le modèle utilise ne saurait être convertie par le système hydrologique en évapotranspiration réelle, faute d'eau disponible. En d'autres termes, la demande climatique (ETP) existe, mais le milieu ne peut pas la satisfaire car les forces de succion des plantes sont à leur limite. Ainsi, le modèle, par ce comportement a priori aberrant, indiquerait une période de stress particulièrement importante pour le système.

Ces conclusions partielles font actuellement l'objet de nouvelles analyses et de nouvelles modélisations afin de déterminer plus précisément quelles sont leurs implications pour le soutien d'été.

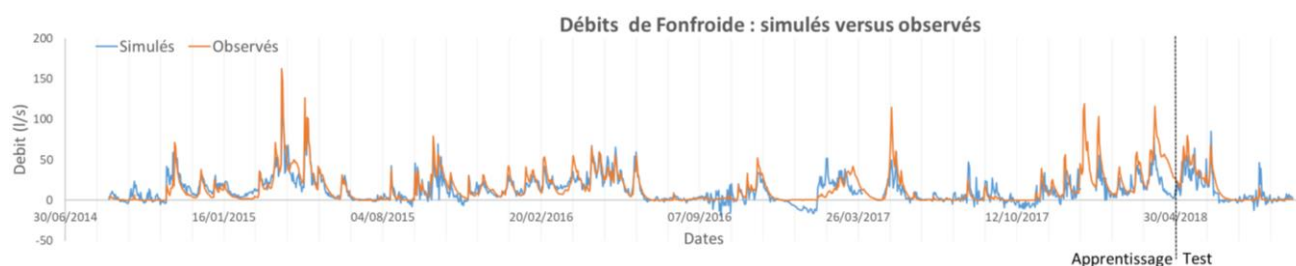


Figure 86. Débits de Fonfroide : simulés versus observés

4.2.4.2. Modélisation de piézomètres

La Figure 87 décrit le modèle à réseau de neurones simulant au mieux le piézomètre P3. Il s'agit d'un réseau avec 8 entrées récurrentes. Pour simuler une hauteur piézométrique journalière à un instant donné t , les entrées associées sont les informations de pluies du jour précédent et remontant jusqu'au 14^{ème} jour (effet mémoire), l'évaporation sur le même jour. Le nombre de neurones cachés optimal est de 10.

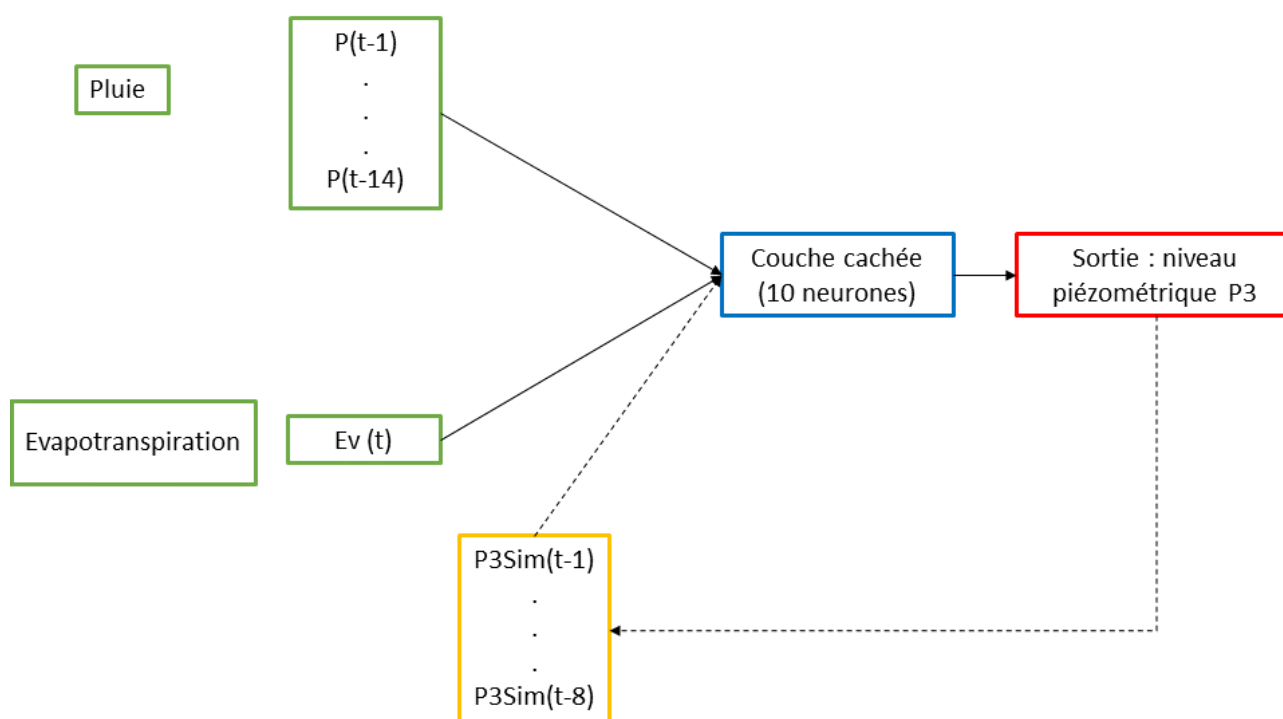


Figure 87. Architecture du réseau choisi pour modéliser le piézomètre P3

La visualisation de la comparaison simulation/observation durant apprentissage montre que le modèle reproduit fidèlement les hauteurs observées (Figure 88). Le NSE obtenu pendant la calibration est de 0,91, le NSE obtenu sur l'ensemble de test est de 0,86. Ces résultats sont satisfaisants et montrent que le modèle reproduit avec précision les niveaux du piézomètre P3, notamment les récessions de niveaux piézométriques. Cependant, nous pouvons noter des périodes où le modèle a du mal à simuler les variations de débits. Comme pour les débits, les fontes sont souvent sous-estimées alors qu'en revanche, les étiages sont plutôt surestimés. Il est difficile d'établir un parallèle entre les deux types de simulations mais on peut déjà noter que la reproduction des hauteurs est plus aisée.



Figure 88. Niveaux piézométriques de P3 : simulés versus observés

4.2.5. Perspectives pour la phase 3

Pour la phase 3 du projet, les perspectives sont les suivantes :

- Poursuivre l'optimisation de la modélisation afin d'obtenir de nouvelles informations sur le fonctionnement du système ;
- Tenter de nouveaux traitements du piézomètre de la station météorologique, pour pouvoir bénéficier de 10 ans de données exploitables (un modèle statistique doit, a priori, s'améliorer avec une augmentation de la population qui est utilisée pour le construire) ;
- Changer le découpage de la base de données pour un découpage trimestriel basé sur le régime moyen sur 10 ans.

Ces travaux sont déjà en cours mais les résultats, ne sont pas encore suffisamment aboutis pour être présentés ici. À terme, lorsque les modèles seront opérationnels, il serait intéressant de travailler de manière prospective sur des scénarios climatiques (ex : augmentation de l'ETP en lien avec le point de flétrissement¹⁴, diminution de la pluviométrie, capacité de la tourbière à fournir l'ETP ou à stocker les précipitations...).

¹⁴ L'ETP est contrainte par des limites de cessibilité (fermeture des stomates, transpiration nulle).

PARTIE III

—

Volets géophysique, pédologie, géochimie

Cette partie vise à préciser : 1) la géométrie et la structure des tourbières étudiées ; 2) leurs propriétés hydrodynamiques ; 3) l'origine des eaux stockées et restituées par les zones humides étudiées. Elle présente :

1. Volet géophysique	p92
2. Volet pédologie	p100
3. Volet géochimie	p114

1. Volet géophysique

La connaissance de la géométrie et des interfaces des tourbières de Frasne et Luitel permettra de préciser le bilan hydrologique.

1.1. Éléments bibliographiques

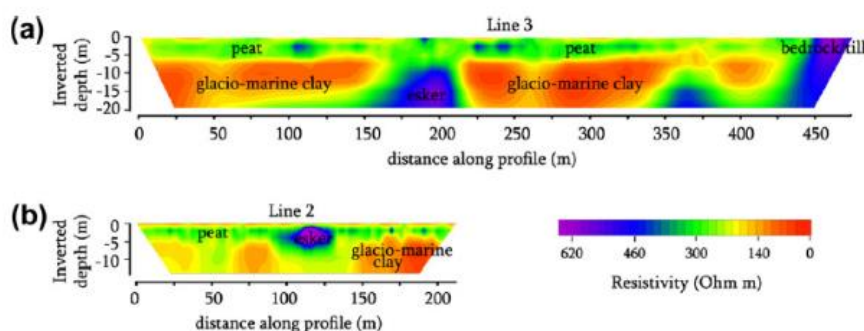
Il existe de nombreuses publications (Bossuet, 1997 ; Holden et al., 2002 ; Lowry et al., 2009 ; Comas et al., 2011 ; Dangeard et al., 2017 ; ...) décrivant des investigations par méthodes géophysiques sur les tourbières. Deux grands types de méthodes sont préconisés :

- méthode électrique – Tomographie Electrique ou Electric Resistivity Tomography (ERT)
- méthode électromagnétique – Radar Géologique ou Ground Penetrating Radar (GPR)

Ces méthodes présentent chacune des avantages et des inconvénients (Figure 89) qui s'avèrent décisifs en fonction des objectifs poursuivis.

Méthode électrique

Tomographie Electrique ou Electric Resistivity Tomography (ERT)



Exemple de résultat (Comas et al., 2011)

Avantages :

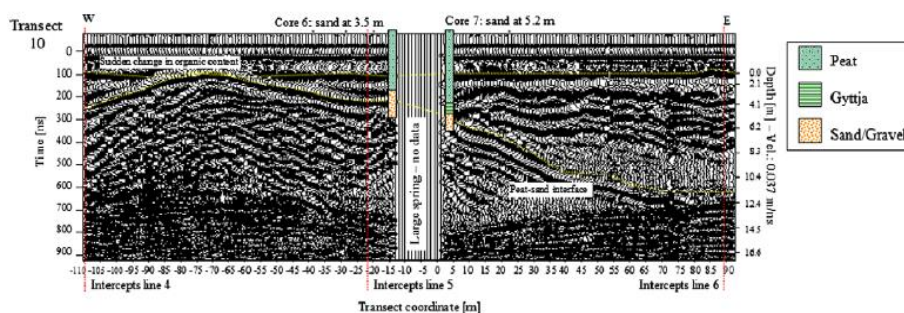
- profondeur d'investigation (>50m)
- possibilité d'imagerie 3D

Inconvénients :

- faible résolution verticale
- difficulté d'interprétation (effet patateïde)
- difficulté de mise en œuvre

Méthode électromagnétique

Radar Géologique ou Ground Penetrating Radar (GPR)



Exemple de résultats (Lowry et al., 2009)

Avantages :

- forte résolution verticale (interprétation de structure plus aisée)
- facilité de mise en œuvre

Inconvénients :

- profondeur d'investigation (<15m)
- signal perturbé par une conductivité de l'eau supérieure à 300μS/cm

Figure 89 : Principaux avantages et inconvénients des 2 principales méthodes géophysiques (ERT et GPR) mises en œuvre sur les tourbières

1.2. Matériel et méthode

Compte-tenu des objectifs poursuivis sur les tourbières de Frasne et de Luitel la méthode électromagnétique (GPR) semble la plus adaptée. Elle permet en effet une de disposer de données permettant une meilleure interprétation des structures et d'une meilleure résolution sur les 5 premiers

mètres investigués voire sur les 10 premiers mètres. Cet avantage est décisif, par rapport à l'ERT, quand on travaille sur des tourbières dont l'épaisseur maximale est inférieure à 15 m et que l'on souhaite disposer d'une connaissance fine des structures sur les 2 ou 3 premiers mètres. De plus, la facilité de mise en œuvre du GPR, par rapport à l'ERT, n'est pas négligeable quand on travaille sur des milieux comme les tourbières.

Le dispositif d'acquisition de données avec le GPR est présenté sur la Figure 90. La réalisation d'un profil nécessite au moins 6 personnes : 1 opérateur responsable la console de commande et d'acquisition de données du GPR ; 1 tracteur, guidé et aidé par 1 éclaireur, qui tire le GPR sur le profil ; 2 guides qui s'assurent que le GPR reste dans l'axe du profil et qu'il ne se renverse pas ; 1 perchiste qui tient le GPS mobile sur le GPR (si le GPS n'est pas fixé directement sur le boîtier du GPR). Une septième personne peut être nécessaire pour surveiller la base fixe du GPS.

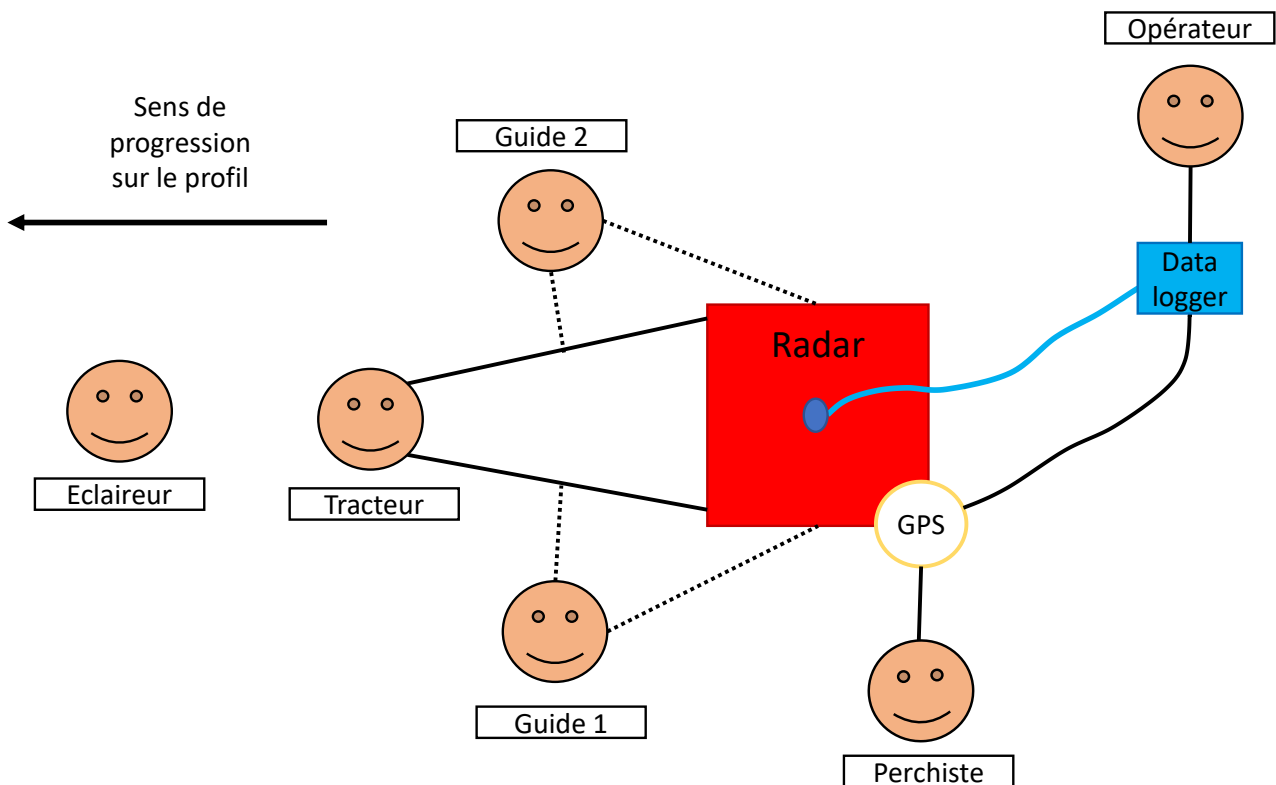


Figure 90 : Dispositif d'acquisition de données avec un GPR

Pour l'acquisition de données, compte-tenu du caractère humide voire inondé des tourbières, deux périodes spécifiques ont été choisies :

- l'hiver sur sol gelé et enneigé pour travailler sur les parties très humides voire inondées (on note que la neige, surtout si elle est fraîche et contient beaucoup d'air, amorti le signal radar ce qui réduit nettement la profondeur d'investigation) ;
- l'été pour travailler sur les parties les plus sèches ou asséchées par les conditions estivales.

Dans les deux cas, les profils préalablement repérés sur une carte sont balisés (drapeaux couleur ou peinture sur les arbres) et débroussaillés pour faciliter la progression du GPR. Sur sol enneigé, il est nécessaire de faire une trace à l'aide de raquettes pour permettre un passage aisé du GPR.

1.3. Tourbière de Luitel

Au Luitel, l'acquisition de données géophysiques vise à améliorer la connaissance de :

- l'interface substratum/tourbière notamment au niveau des versants ;
- la structure interne de la tourbière sur les 2 premiers mètres.

À terme, l'objectif est d'affiner la géométrie 3D de la tourbière de Luitel.

1.3.1. Protocole d'acquisition de données géophysique

Le protocole d'acquisition de données (Figure 92) est calqué sur celui mis en œuvre par Garambois (2007). La réalisation de 14 profils à l'aide d'une antenne de 100Mhz a permis d'obtenir une première estimation de la topographie du substratum sur lequel repose la tourbière de Luitel. Le type d'antenne et la fréquence utilisée ont permis l'acquisition de données à une profondeur suffisante pour cartographier le modelé du substratum (Figure 91). Toutefois, ces données ne permettent pas de connaître la structure interne de la tourbière.

Le protocole mis en œuvre en 2018 visait donc à compléter les travaux réalisés par Garambois (2007). L'acquisition de données a été faite sur 12 profils (environ 6 km), superposables à ceux de Garambois (2007) à l'aide d'antenne de fréquence 400 Mhz et 200 Mhz afin d'obtenir une meilleure résolution sur les 2 premiers mètres (Figure 92). L'interprétation des radargrammes sera, à terme (phase 3) validée et calibrée à l'aide de sondages pédologiques (Figure 92) dans le cadre du volet pédologique (Partie III - §2 Volet pédologie, p100).

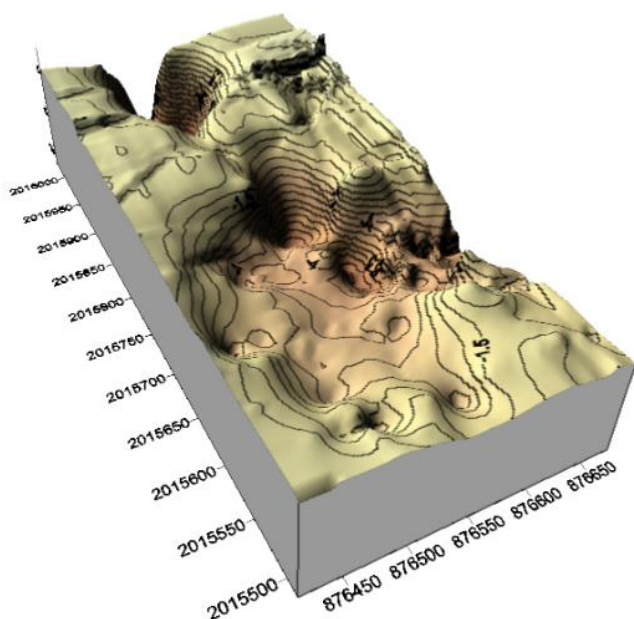


Figure 91 : Topographie du fond (profils GPR 2007)

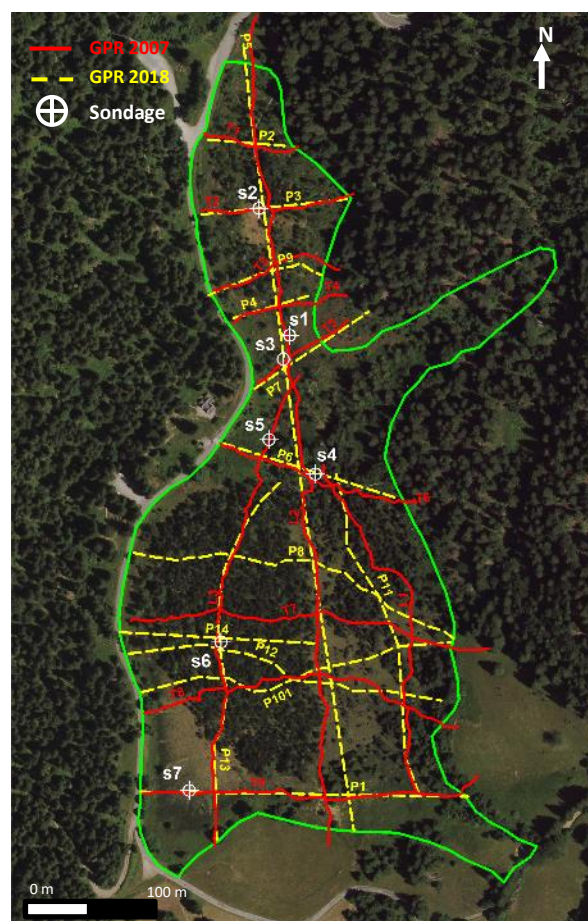


Figure 92 : Profils GPR 2007 et 2018

1.3.2. Premiers résultats

Les premiers résultats sont prometteurs. En effet, sur les mêmes profils nous disposons de l'interface substratum/tourbière en profondeur grâce aux travaux de Garambois (2007) et d'une vision plus fine de la structure des 2 à 4 premiers mètres de la tourbière (Figure 93 et Figure 94).

Les données sont en cours d'interprétation.

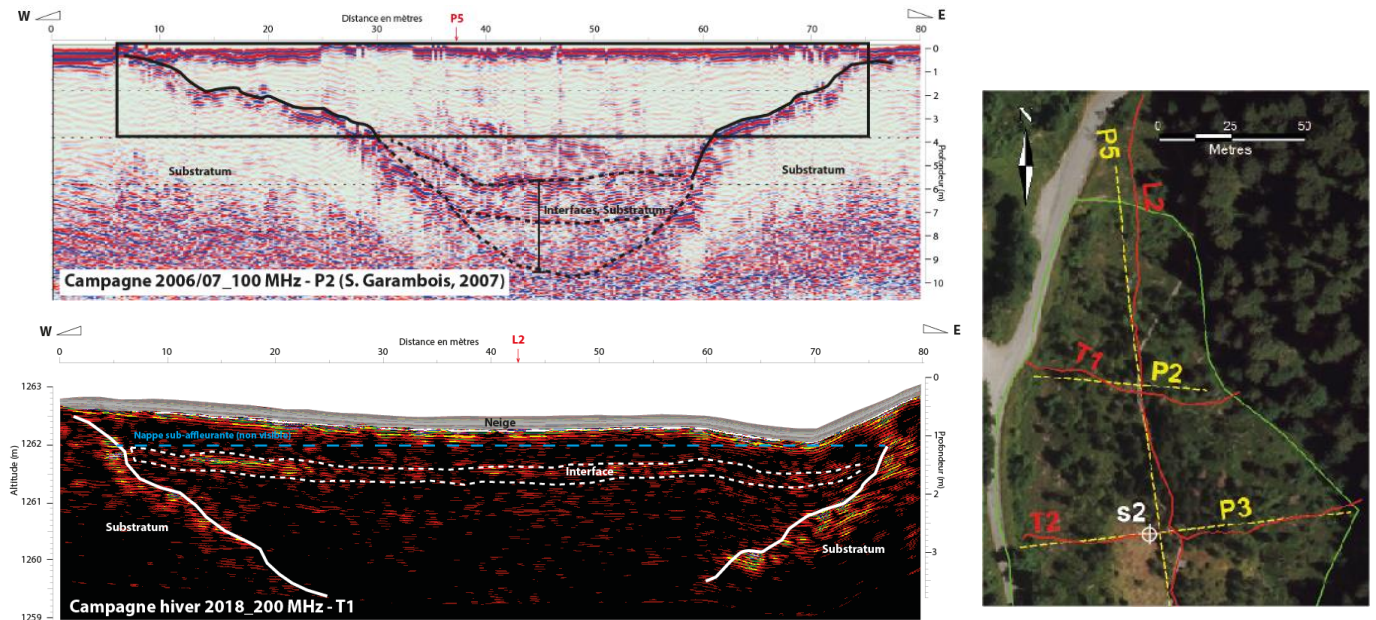
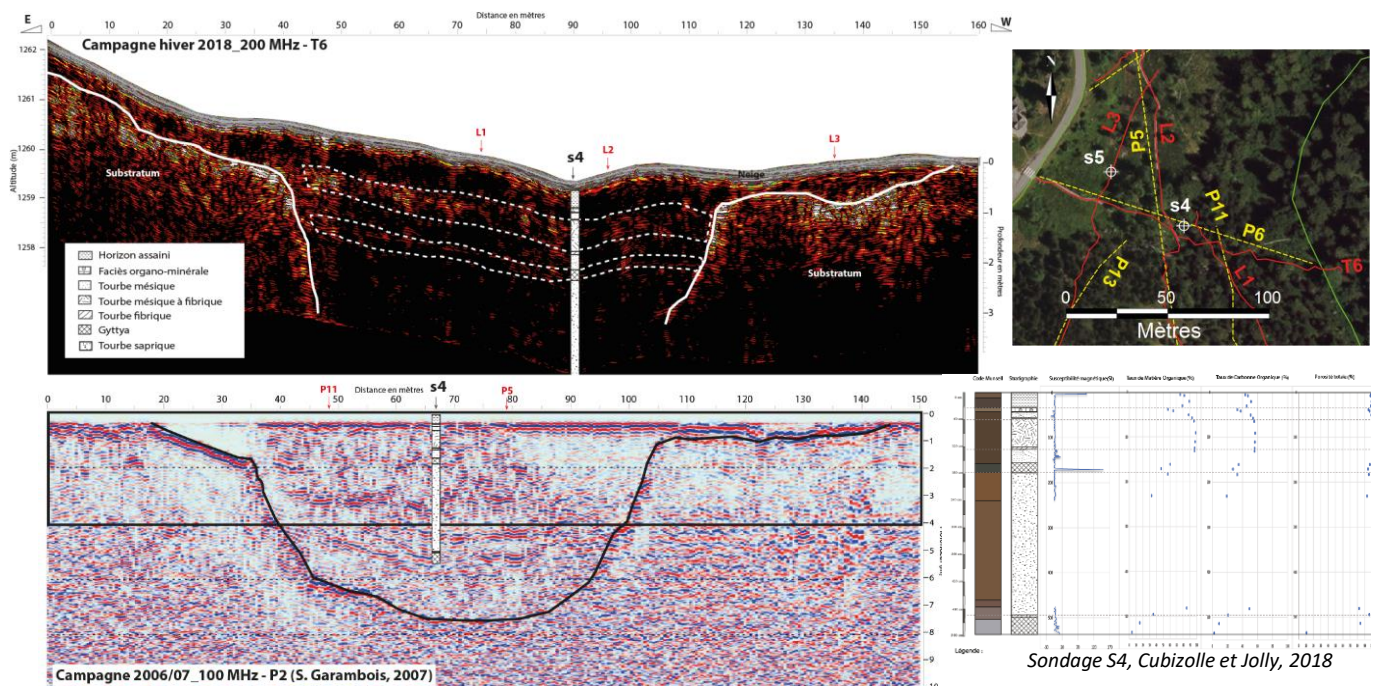


Figure 93 : Premiers résultats sur le profil P2 (GPR 2007) ou T1 (GPR 2018)



PARTIE III - Volets géophysique, pédologie, géochimie

- les limites latérales de la tourbière contraintes par des moraines dont la localisation est mal connue ;
- l'interface substratum/tourbière (topographie de fond) ;
- la structure du complexe tourbeux (si les données le permettent).

L'objectif vise à préciser la surface des aires d'alimentation du ruisseau exutoire et d'estimer le volume de tourbe, voire sa structure, dans ces aires d'alimentation.

1.4.1. Protocole d'acquisition de données géophysique

Les données géophysique sur Frasne sont rares. Il existe uniquement un profil ERT (Bichet, 2015) dans le secteur du Creux au Lard (carrés rouge sur la Figure 95). Ces profils ont une profondeur d'investigation d'environ 30 m mais sont peu informatifs concernant la structure de la tourbière (Figure 96).

Toutefois, la tourbière de Frasne a fait l'objet de nombreux sondages à la perche pour déterminer la profondeur du substratum. Ces sondages sont représentés sur la Figure 95 (points jaune et rouge).

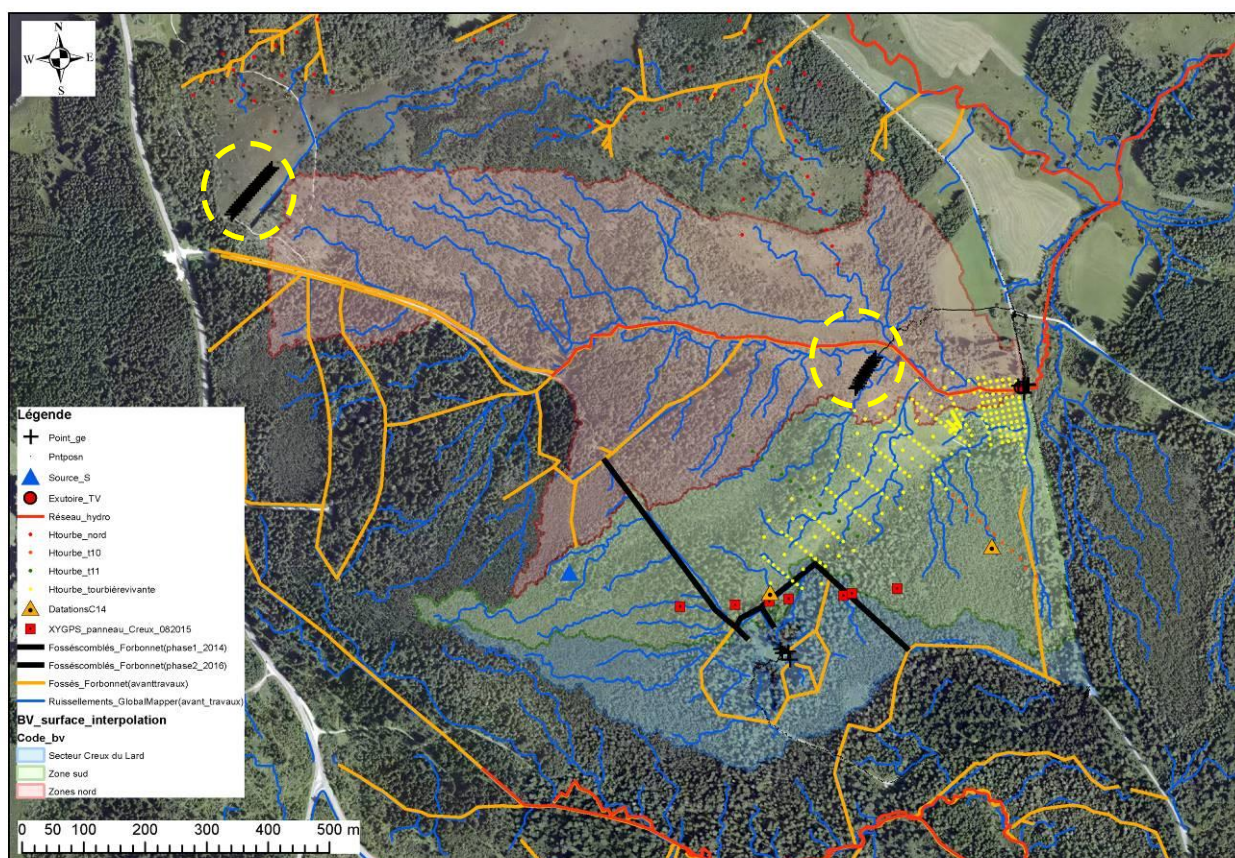


Figure 95 : Données géophysiques sur la tourbière de Frasne

Compte-tenu des plus fortes valeurs de conductivités électriques de l'eau de la tourbière de Frasne par rapport à celle de Luitel, il s'est avéré nécessaire de tester la méthode GPR pour s'assurer que l'acquisition de données était possible. Ainsi 4 courts profils ont été réalisés avec une antenne de fréquence 200 Mhz :

- 2 en juin 2018 sur des zones sèches (Figure 95, profils en noir cerclés de pointillés jaune) ;
- 2 en janvier 2019 sur des zones humides gelées et couvertes de neige (Figure 97 et Figure 98, tronçon ouest du profil A1 et tronçon est du profil 1).

La Figure 97 présente le protocole d'acquisition de données et la position des profils prévus. Ceux-ci ont été disposés en fonction des connaissances sur l'extension de la tourbière et la localisation supposée des moraines. Le profil 1 et les profils A1 à A5 sont prioritaires. Les profils B1 à B5 sont optionnels.

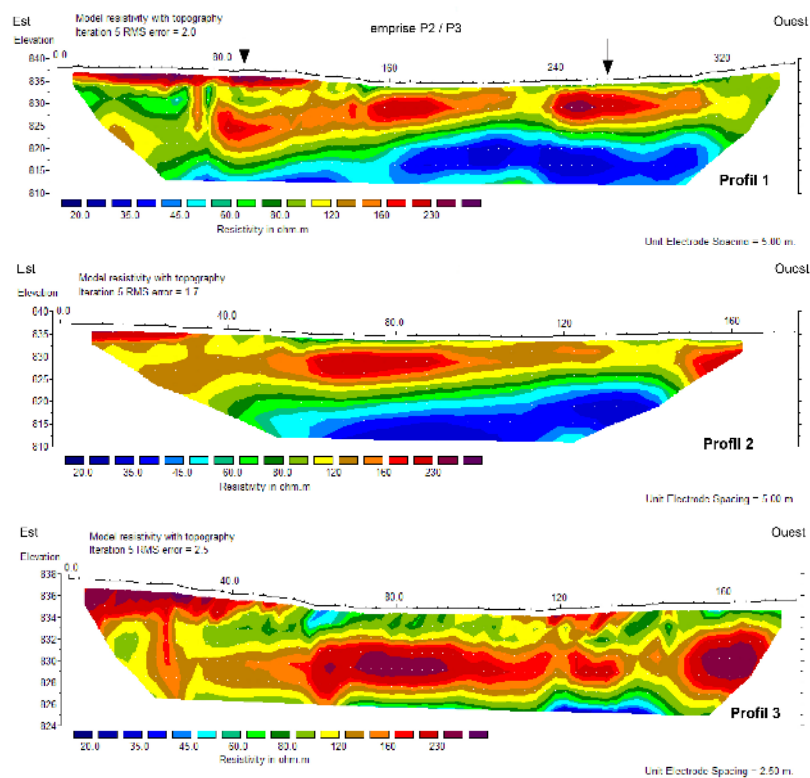


Figure 96 : Prospection ERT du Creux au Lard (Bichet, 2015)

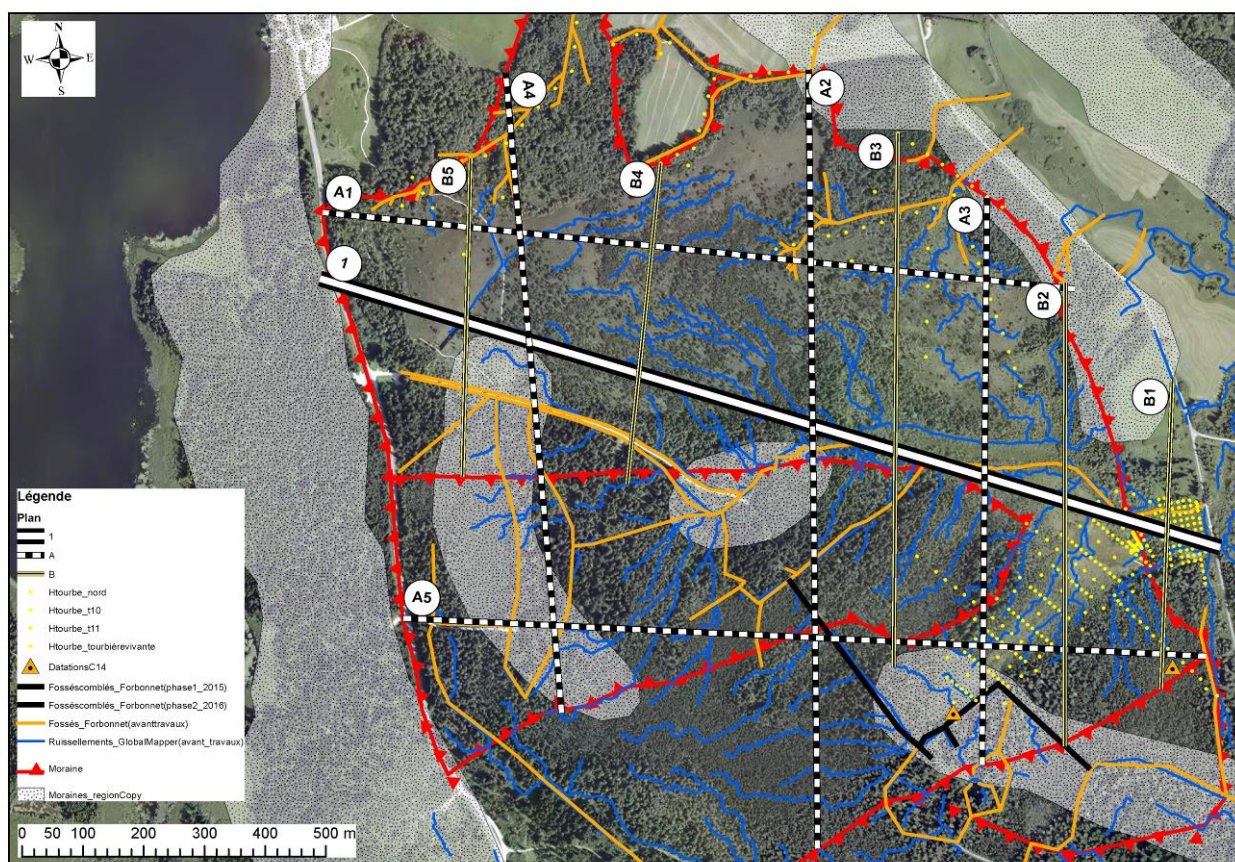


Figure 97 : Profils géophysiques prévus sur Frasne

1.4.2. Premiers résultats

La Figure 99 présente les premiers résultats et interprétations des profils réalisés en janvier 2019 (Figure 99). Sur ces profils le signal permet de positionner le substratum morainique. La profondeur du substratum déterminé par analyse des radargrammes est confirmée par les sondages à la perche (P1 et P2, Figure 99).

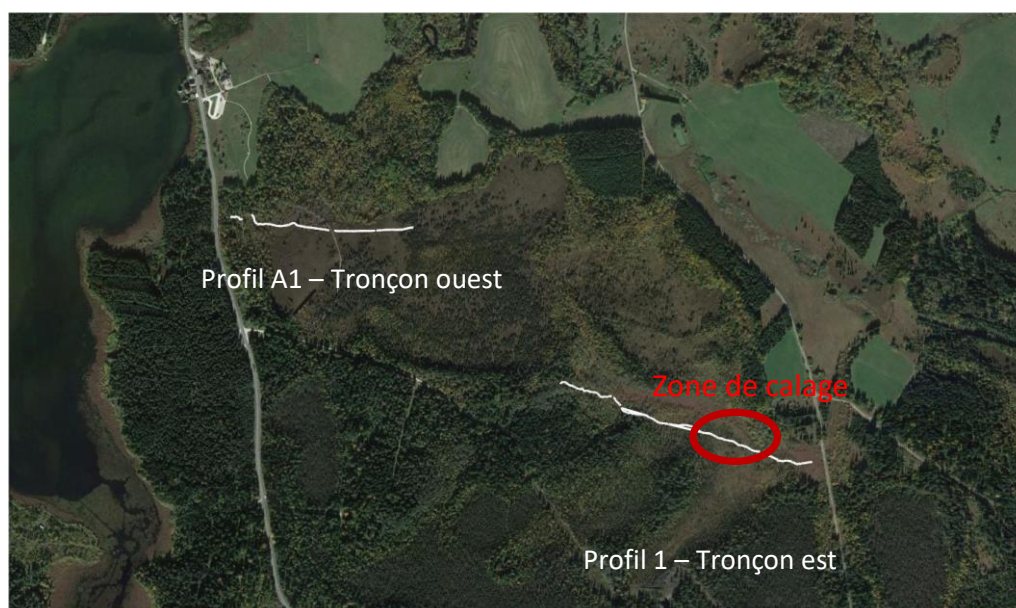


Figure 98 : Profils test réalisés en janvier 2019

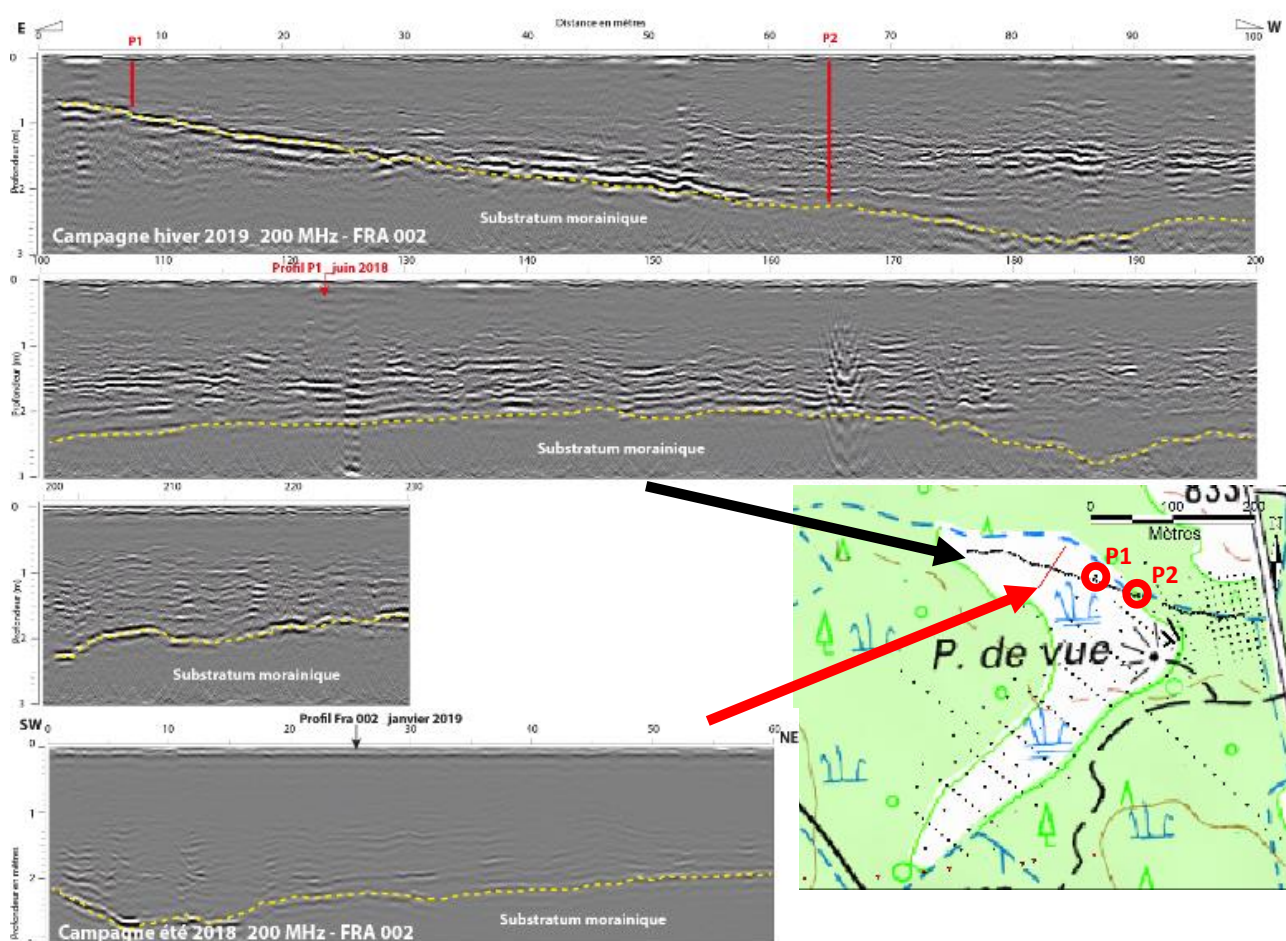


Figure 99 : Premiers résultats et validation à l'aide des sondages à la perche

1.5. Conclusion et perspectives

Les travaux engagés sur le volet géophysique ont permis de valider la méthode sur les 2 sites. L'ensemble des profils a été acquis sur le site de Luitel. Sur le site de Frasné, seuls des profils test ont pour l'instant été acquis. Une nouvelle campagne géophysique d'acquisition de données a été réalisée sur Frasné en septembre 2019 (environ 12 km de profil). Sur les 2 sites, les résultats concernant la morphologie et la géométrie des tourbières sont prometteurs.

2. Volet pédologie

L'articulation du volet pédologie (couplé à la végétation) et du volet géophysique [cf. Stage de Master de T. Jolly] est de première importance (notamment au Luitel) pour bien cerner spatialement la géométrie 3D et les interfaces des sites d'études :

- calibration/validation des profils géophysiques ;
- caractérisation du complexe tourbeux (zones à sphaignes, tourbière boisée, zones périphériques...) ;

À terme (Phase 3), l'articulation des ces 2 volets devrait permettre de préciser le bilan hydrologique (au moins au Luitel) en :

- intégrant la question du point de flétrissement ;
- spatialisant les propriétés hydrodynamiques du complexe tourbeux, incluant les zones périphériques ;
- délimitant des zones contributrices au soutien d'étiage.

Cette partie propose une synthèse du travail et du rapport de stage de master 1 de T. Jolly¹⁵. L'objectif de ce travail est de caractériser le fonctionnement hydrogéomorphologique de la tourbière de Luitel par une approche fondée sur la pédologie.

S'il est établi que la composition organique de la tourbe joue un rôle primordial dans la capacité des zones humides à stocker et restituer l'eau au moment opportun, la connaissance exacte des horizons histiques est essentielle pour arriver à une compréhension plus fine des processus de fonctionnement hydropédologique/hydrogéomorphologique. Pour ce faire, une analyse pédologique est nécessaire afin de déterminer la composition et le comportement du substrat face à l'eau ainsi que la distribution spatiale (horizontale et verticale) des faciès tourbeux. In fine, ces informations croisées avec des données hydrologiques permettront de mieux cerner la capacité de stockage et de restitution des eaux de la tourbière de Luitel.

2.1. Notions clefs : fonctionnement hydrogéomorphologique des tourbières de têtes de bassins

Avant de s'intéresser au fonctionnement hydrogéomorphologique des tourbières du Luitel, il est nécessaire de définir cet écosystème (système tourbeux) si particulier. Ces zones humides sont des sites colonisés par une flore edificatrice, dont les conditions écologiques spécifiques ont permis la formation d'un histosol : la tourbe (Cholet et Magnon, 2010). Cette accumulation de matière végétale et animale n'est que partiellement dégradée du fait des conditions de saturation en eau du sol et d'anoxie qui y règnent, privant ainsi le métabolisme des détritivores et décomposeurs. Les tourbières situées à l'amont des bassins versants constituent des systèmes clefs de voutes pour le reste du continuum hydrologique. Ainsi une réflexion systémique à l'échelle du bassin versant est essentielle pour arriver à une compréhension optimale du secteur tourbeux.

Si les tourbières sont des milieux présents sur des aires de répartitions bien spécifiques, du fait des conditions bioclimatiques, topographiques, hydrogéomorphologiques et écologiques essentielles, l'hydrologie du site est le facteur limitant conduisant à l'édification de la tourbe. Un bilan hydrique équilibré (Grosvernier, 2009) ou excédentaire équiréparti entre les saisons et les années est capital pour

¹⁵ Jolly T. (2018) Caractérisation du fonctionnement hydrogéomorphologique de la tourbière de la Réserve Naturelle Nationale du Lac Luitel. Essai méthodologique pour contribuer à la détermination du rôle des tourbières de têtes de bassins versants dans le soutien d'étiage. Rapport de stage de Master 1 Géographie Gestion de l'environnement parcours GRAINE. Université de Saint-Etienne, Mines Saint-Etienne, UMR 560 EVS, ZABR, AERMC, 174p.

préserver l'état hydro-écologique des milieux tourbeux. La présence d'aménagements humains modifiant les conditions écologiques d'un lieu (rétention d'eau) permet également d'être instigateur dans la formation de tourbe. Du point de vue structural et fonctionnel, ces zones humides possèdent une structure diplotelmique, avec l'acrotelme dans la partie supérieure et le catotelme dans sa partie inférieure. L'acrotelme constitue la partie active du point de vue hydrologique avec des valeurs de conductivités et de porosités plus élevées, qui tendent à décroître à mesure que l'on s'enfonce en profondeur dans le catotelme (Figure 100). Notons que les paramètres hydrophysiques sont également étroitement liés au degré d'humification de la tourbe. Ainsi une tourbe fibrique (blonde) affichera des propriétés structurales (densité) et hydrauliques plus élevées qu'une tourbe saprique (noire)¹⁶.

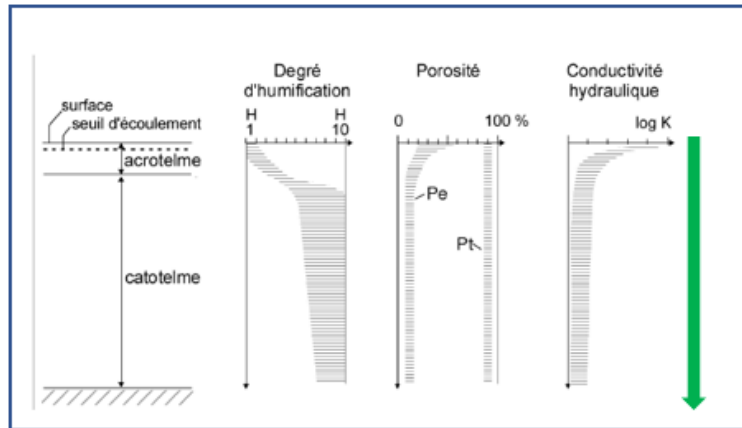


Figure 100 : Paramètres hydrophysiques généraux pour une tourbière haute à sphaignes (Wastiaux, 2008)

H : degré d'humification

K : conductivité hydraulique à saturation

Flèche verte : baisse globale des paramètres (exceptée Pt)

Pt : Porosité totale

Pe : Porosité efficace

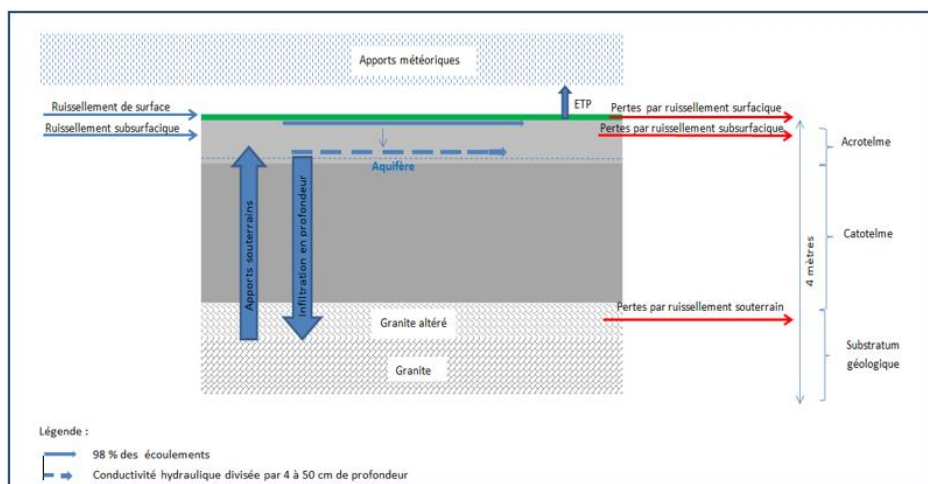


Figure 101 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrologique supposé d'une tourbière de tête de bassin versant en contexte granitique (socle imperméable). Ce fonctionnement est aussi possible en contexte calcaire avec plancher argileux (ex : Tourbière de Frasne).

¹⁶ La tourbe blonde résulte de la transformation des sphaignes : très forte acidité, grande porosité. La tourbe brune provient de débris ligneux (la dégradation des végétaux est plus poussée que dans la précédente). La tourbe noire est marquée par la présence importante de particules minérales ou organiques.

PARTIE III - Volets géophysique, pédologie, géochimie

Concernant la relation tourbière et soutien d'étiage, l'analyse de la littérature met en exergue un discours très contrasté avec deux théories qui s'opposent. La première affirmant que le substrat tourbeux et les sphaignes en surfaces joueraient le rôle « d'éponges » régulant les flux d'eaux. Les défenseurs de la seconde théorie affirment quant à eux que la tourbe est presque toujours à saturation en hiver et le devient rapidement en été, après des précipitations importantes. Dans ces conditions, toutes l'eau excédentaire s'écoule rapidement allant alimenter les cours d'eau. Si cette question du soutien d'étiage n'est pas tranchée, des pistes de réflexion sur l'intégrité des écosystèmes tourbeux pour la restitution d'eau au cours d'eau en période d'étiage semble une piste intéressante à privilégier (Figure 101).

2.2. Matériel et méthode

La méthodologie mise en œuvre a pour objectif de mettre en exergue les différentes étapes du travail de recherche et concourt à la caractérisation du fonctionnement hydrogéomorphologique du site de Luitel. La méthode a pour objectif de donner des résultats du point de vue hydrogéomorphologique et de contribuer à alimenter un modèle qui servira à simuler un soutien d'étiage par la tourbière du col (Partie II - §4.1 Modèles réservoirs – modélisation du soutien d'étiage au Luitel, p75).

Le protocole mis en œuvre pour cette analyse hydrogéomorphologique a pour objectif de :

- déterminer la stratigraphie ainsi que les grands faciès pédologiques présents sur la tourbière via des relevés terrain et des analyses en laboratoire ;
- caractériser des comportements hydrogéomorphologiques en fonction des prélèvements effectués sur le terrain ;
- donner une vision croisée des faciès tourbeux par rapport à la végétation de surface.

Dans le cadre du projet ZHTB, la tourbière du Luitel est un site d'étude qui mobilise plusieurs disciplines scientifiques. L'approche pédologique conduite dans le cadre de ce travail de master, s'est donc déroulée conjointement et complémentarément à d'autres approches et notamment :

- le volet géophysique (Partie III - §1.3 Volet géophysique, p92)
- le volet hydrologique (Partie II - §4.1 Modèles réservoirs – modélisation du soutien d'étiage au Luitel, p75)

2.2.1. Mesures in situ et échantillonnages

- Le sondage du site par carottage

Points de prélèvement	Arguments							Mode de prélèvement	sédiments conservés	Carotte analysée en laboratoire
	Faciès phytosociaux	proximité d'un ruisseau	Proximité d'un fossé de drainage	Proximité d'un piezomètre	Proximité d'un transect géophysique	Position: centre	Position: périphérie			
T1		X	X	X	X		X	Tarrière	non	non
T2			X	X			X	Tarrière	non	non
T3			X	X			X	Tarrière	non	non
T4		X	X	X	X		X	Tarrière	non	non
T5	X				X		X	Tarrière	non	non
T6	X			X	X		X	Tarrière	non	non
P7S1	X		X	X	X	X		Carottier russe	oui	oui
P3S2	X			X	X	X		Carottier russe	oui	oui
P7S3	X		X	X	X	X		Carottier russe	oui	non
P6S4		X		X	X	X		Carottier russe	oui	oui
S5	X		X	X	X		X	Carottier russe	non	non
P12S6	X			X	X	X		Carottier russe	oui	oui
P1S7	X		X		X		X	Carottier russe	oui	oui

Tableau 12 : Justificatif du plan d'échantillonnage de la tourbière du col Luitel

Les prélèvements par carottages sont une phase essentielle du protocole visant à déterminer une stratigraphie pédologique du site. Afin d'obtenir une vision la plus réaliste des pédofaciès de la tourbière du col le plan d'échantillonnage tient compte de :

- la différence des profils phyto-sociaux dans l'objectif de dresser une analyse spatialisée des faciès tourbeux ;
- la proximité des fossés de drainages et des cours d'eau, afin de déterminer la dynamique turfigenèse et hydro-pédologique dans ces secteurs ;
- la position (centre/périphérie) afin de faire une comparaison entre les secteurs tourbeux et supposés paratourbeux ;
- les transects géophysiques de 2006 et de 2018 afin de croiser les données liées aux analyses avec les images radar issues de ces deux campagnes ;
- l'instrumentation du site à savoir les piézomètres pour croiser les niveaux de nappes avec les faciès pédologiques dans le cadre du modèle hydrologique de la tourbière du col.

Le Tableau 12 résume le choix des points de prélèvements en fonction d'une série d'arguments. La carte des points de prélèvement est présentée Figure 106 (p107).

• Protocole de prélèvements

La technique retenue pour obtenir des enregistrements sédimentaires de qualités exploitables en laboratoire fut la méthode du carottier russe (Figure 102). Cette technique permet d'obtenir un demi-cylindre d'échantillon (Figure 103) sans qu'il soit pollué par les séries sédimentaires supérieures.

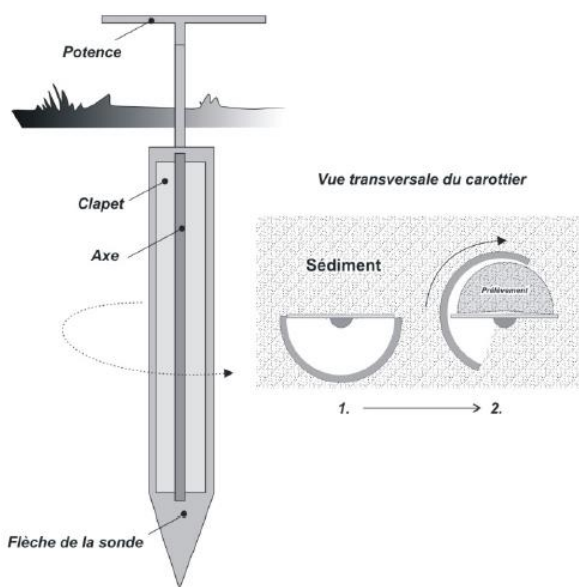


Figure 102 : Principe de fonctionnement du carottier Russe (Guiter et al. 2013)

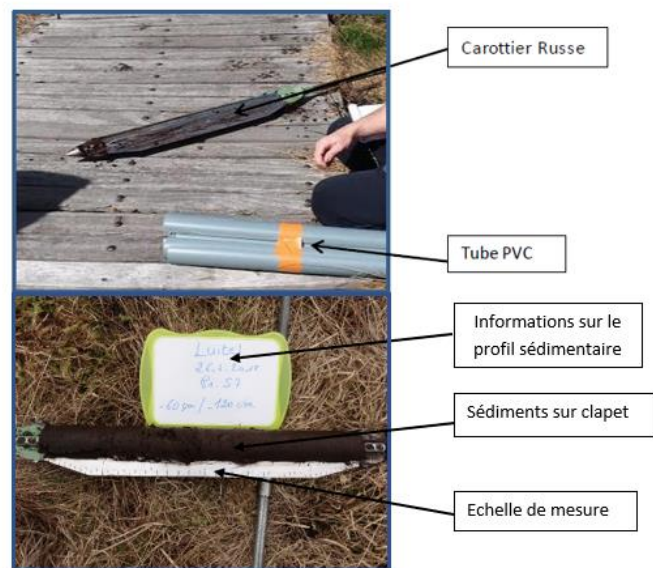


Figure 103 : Matériels de prélèvement et de stockage du sédiment (25/04/2018)

Les échantillons subissent ensuite une première interprétation (stratigraphie à l'aide de la charte de couleur Munsell, et des codes qui caractérisent les types de tourbe) avant d'être placé dans un tube en PVC soigneusement emballé pour que les propriétés hydrodynamiques soient conservées. Des prélèvements à la tarière pédologique ont également été effectués afin d'obtenir des éléments d'interprétations complémentaires. Notons que cette seconde technique est surtout utilisée pour faire des interprétations *in situ* et se révèle peu propice à l'extraction de sédiments pour des analyses en laboratoire.

- **Identification des groupements végétaux dominants**

L'un des objectifs de cette étude est de croiser les types de couverture du sol (tapis végétal) avec les faciès édaphiques superficiels. La méthodologie retenue est de considérer que pour un même polygone de végétation, correspondra le même faciès pédologique¹⁷. Ainsi, nous nous sommes appuyés sur la carte des habitats mais surtout sur des relevés terrains pour dresser une carte des végétaux dominants à l'échelle du site. Nous avons alors pu distinguer de grands secteurs (exemples, Figure 104), retranscrits sous une forme géométrique dans un SIG.

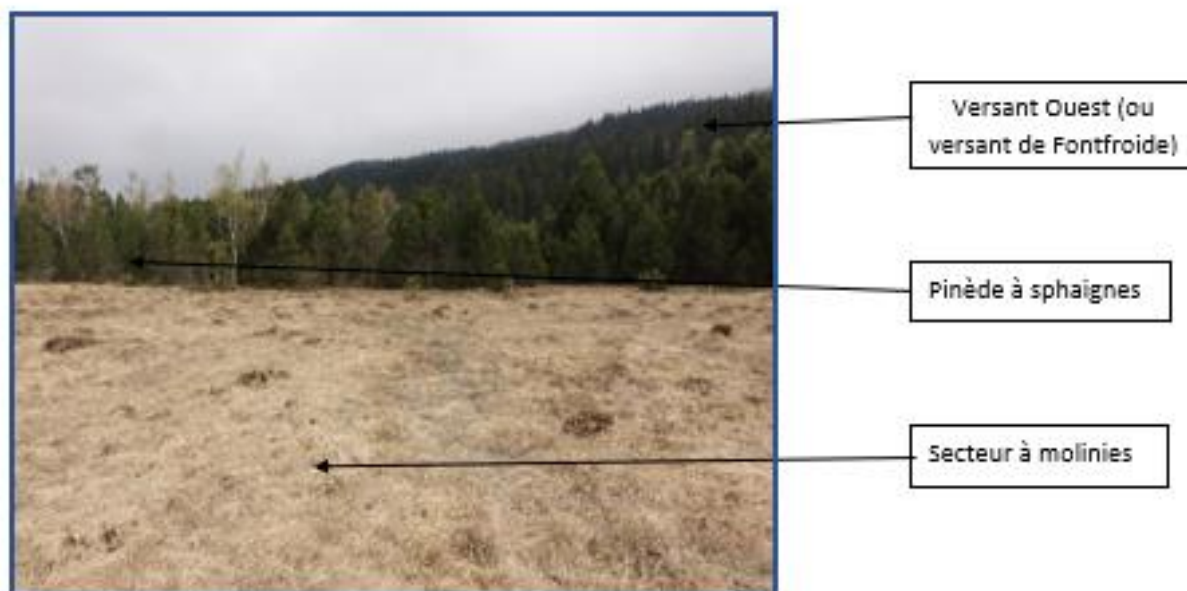


Figure 104 : Zone sud de la tourbière du col – prairie à Molinies bleues (Cubizolle, 2018)

2.2.2. Analyses en laboratoires : mesures physiques

Afin de caractériser la tourbe, il est nécessaire de mettre en place une série de protocoles afin d'établir précisément la nature du sédiment. La détermination du degré d'humification et de minéralisation de la tourbe est primordiale pour aborder par la suite les propriétés structurales et hydrauliques des faciès extraits. Les profils sédimentaires concernés par ce protocole de mesures regroupent les carottes P7S1, P3S2, P6S4, P12S6 et P1S7 (Tableau 12).

- **Susceptibilité magnétique**

La première mesure réalisée est une analyse de susceptibilité magnétique. Cette technique permet d'estimer la concentration en minéraux magnétiques dans un échantillon donné (Naudin, 2012). Cette mesure doit être faite avant tout prélèvement ou intervention sur la carotte, pour obtenir un enregistrement concordant au mode de dépôt du sédiment.

Cette mesure de susceptibilité renseigne, dans le cas de l'étude, sur plusieurs éléments liés à l'environnement et/ou au climat (Dearing, 1999 ; Naudin, 2012 ; Salomon, 2013) :

- les processus de transports, d'érosions des milieux adjacents ou éloignés (éoliens, fluviaux, glaciaires, etc.) ainsi que sur leur mode de dépôt in situ ;
- les phénomènes d'oxydo-réduction du milieu qui conditionnent la solubilité et la précipitation des minéraux par voie biologique ou chimique dû à la forte réactivité du fer.

¹⁷ Il s'agit d'une hypothèse forte qui conduit à une approximation importante car les relations entre le sol et la végétation sont beaucoup plus complexes d'autant plus que le tapis végétal est fortement influencé par les activités humaines et agropastorales.

- **Caractérisation du taux de fibre et de la teneur en Matière Organique (MO)**

Afin de caractériser correctement les faciès de la tourbière du col, il est nécessaire d'analyser le taux de fibres et la teneur en MO des séries sédimentaires prélevées. Cette phase servira d'amorce à la détermination des propriétés des hydrophysiques. Notons que pour chaque strate prédéterminer sur le terrain, deux échantillons seront prélevés et analysés afin d'obtenir une information la plus complète possible.

La première étape consiste à travailler sur la texture¹⁸ de ce qui compose la tourbe (Cubizolle, 2018) pour la classer en fibrique, mésique ou saprique. Pour cette étape les instruments utilisés sont des tamis et une étuve réglée sur 100°C. Le pourcentage de fibre supérieur à 200 microns sert à déterminer le type de tourbe. Les tourbes fibriques ont un taux à 200 microns supérieur à 40%, les tourbes mésiques entre 10 et 40 % et les tourbes sapriques très humifiées un taux inférieur à 10 %.

La seconde étape permet de définir la teneur en Matière Organique (MO) de la tourbe. La technique utilisée est la méthode par perte au feu (PAF) précisément décrite et discutée dans les publications de Heiri et al. (2001), Chambers et al. (2010) et Cubizolle (2018). La finalité de cette mesure est de confronter les poids de l'échantillon avant et après avoir été brûlé au four pour déterminer le taux de MO (Cubizolle, 2018). Le taux de MO sera ensuite réutilisé pour déterminer des propriétés hydrauliques et structurales.

Pour des faciès contenant moins de 30 % de MO, comme c'est souvent le cas sur les profils sédimentaires provenant du contact avec l'ancienne cuvette lacustre, des horizons organo-minéraux ou des horizons assainis, une analyse au granulomètre laser pourra alors apporter davantage de précision sur l'hydrodynamisme et surtout la texture de l'échantillon (% argiles, limons et sables). Les profils sédimentaires concernés par l'expérience suivante correspondent à la carotte P6S4.

- **Détermination des propriétés hydrauliques et structurales**

La connaissance des propriétés hydrauliques et structurales est essentielle pour arriver à une compréhension de la circulation de l'eau dans la tourbe et sols paratourbeux. Ces propriétés sont étroitement liées aux degrés d'humification et à la composition de la tourbe. Les paramètres analysés sont la porosité totale, la porosité efficace, la conductivité hydraulique ainsi que la densité. Le détail des calculs pour obtenir la valeur de ces paramètres est présenté dans le mémoire de T. Jolly (p72).

2.2.3. *Vue en plan et vue en coupe de la stratigraphie de la tourbière du col*

Si la création de cartes pédologiques par rapport aux faciès végétaux dominants est intéressante, acquérir une vision schématique de la structure de la tourbe en profondeur semble aussi importante et concourt à répondre aux objectifs d'acquérir, in fine, une vision en trois dimensions du site. Sur le plan de la méthodologie, nous nous sommes appuyés sur les profils en travers réalisés par Garambois (2006).

En effet la dernière campagne au radar géologique et les carottes ayant été réalisées sur les transects géophysiques de 2006, il est alors aisé de caler les points de prélèvements en fonction des profils transverses. Ainsi, en s'appuyant sur le point de prélèvement associé au profil géophysique correspondant, nous pouvons représenter la stratigraphie d'un point précis sur un transect. Cette stratigraphie est ensuite étendue (de part et d'autre du lieu de prélèvement représenté schématiquement) en tenant compte de la carte de végétation et des remontés du substratum géologique.

2.3. Résultats

2.3.1. *Texture et stratigraphie*

La Figure 106 montre la stratigraphie aux points de prélèvement réalisés au carottier russe ; des similarités s'expriment entre les différents profils. Tous les profils (excepté P3S2) possèdent un horizon

¹⁸ Le taux de fibre peut être apprécié sur le terrain à la main (Test de Von Post)

assaini¹⁹. Cependant les profils situés au sud de la tourbière (P3S6 et P1S7) présentent un nouvel étage tourbeux au-dessus des horizons minéralisés. Certains profils sont plus originaux dans leur organisation stratigraphique aux vues de l'ensemble des carottes et des sondages réalisés au carottier russe et à la tarière. C'est ainsi que le profil P6S4 montre des faciès de gyttja²⁰. Le profil P3S2, quant à lui, est le seul à ne pas présenter d'horizon assaini mais on observe une phase liquide sur les premiers 120 centimètres.

2.3.2. Les faciès pédologiques à partir des groupements végétaux simplifiés

À partir des informations recueillies à travers les observations (carottages à la tarière et carottier russe) et les analyses en laboratoire, nous pouvons donc proposer une répartition des faciès édaphiques (Figure 107). Pour rappel, la géométrie spatiale des faciès pédologiques repose sur les polygones de végétation simplifiés et la carte des habitats Corine (exemple, Figure 105).

La collection des cartes des faciès édaphiques (réalisée sous logiciel ArcGIS) permet d'apprécier, au regard de la méthodologie choisie, l'évolution des strates sur une profondeur de 0, 10, 30 et 50 centimètres.

L'observation croisée et la description de ces cartes nous renseignent sur la constance et l'évolution des faciès édaphiques sur une profondeur de 50 centimètres. Nous observons que sur les premiers centimètres la tourbière du col présente globalement des horizons fibriques avec quelques horizons assainis au centre et des sols paratourbeux dans les secteurs périphériques. Une évolution radicale des faciès est visible à 15 centimètres avec une augmentation très perceptible du nombre de faciès assainis (zone centrale, secteurs bordant la pinède et pinède à sphaigne). Les secteurs Nord et périphériques restent globalement les mêmes dans leur organisation stratigraphique. La présence d'argile est à noter dans la zone d'exutoire de Fontfroide. À 30 centimètres, les secteurs Nord sont exclusivement composés de tourbe mésique à saprique. Les horizons assainis ne sont plus présents sur les secteurs de la Pinède à sphaignes mais restent visibles dans les secteurs bordiers et centraux. Nous retrouvons toujours des réductisols en périphérie. À 50 centimètres, seule la pinède à sphaignes et la zone de prébois de pins à crochets sont marqués par des faciès fibriques, le nord étant composé de tourbe plus humifiée. Nous remarquons que les horizons assainis ne sont plus présents à cette profondeur. Les secteurs bordant la pinède au sud et ceux de la zone centrale autour et au Nord de Fontfroide sont composés de tourbe mésique. Les secteurs périphériques sont toujours des réductisols et les zones exutoires sont caractérisés par des remontés de socles et des arènes granitiques.

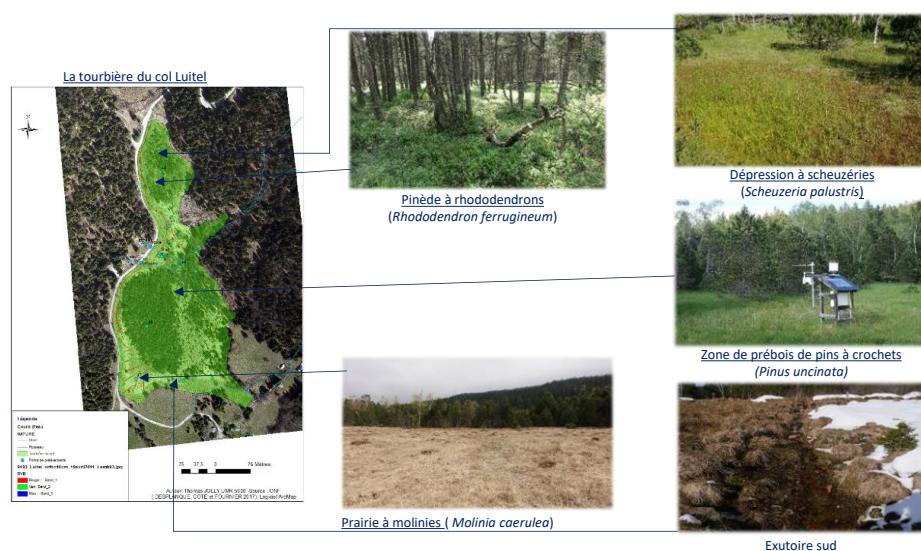


Figure 105 : Présentation des écosystèmes du Luitel (exemples)

¹⁹ Horizon assaini : faciès tourbeux en cours de minéralisation ou fortement minéralisés suite à des processus de tassement ou de rabattement de la nappe d'eau

²⁰ Gytja : boue formée par la décomposition partielle de la tourbe. Elle a un aspect noir et une consistance gélatineuse.

Répartition des points de prélèvements de tourbe sur la tourbière du col

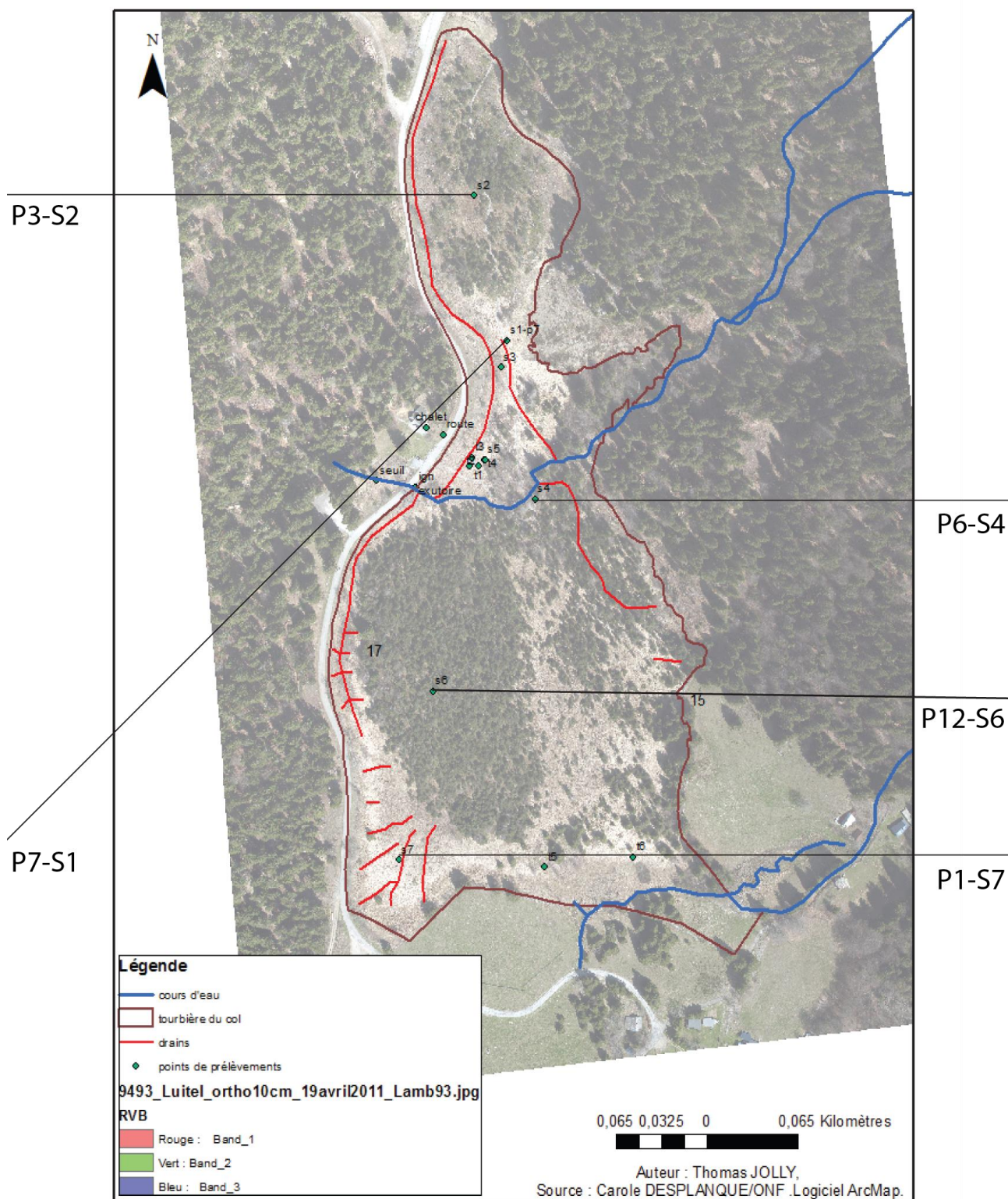
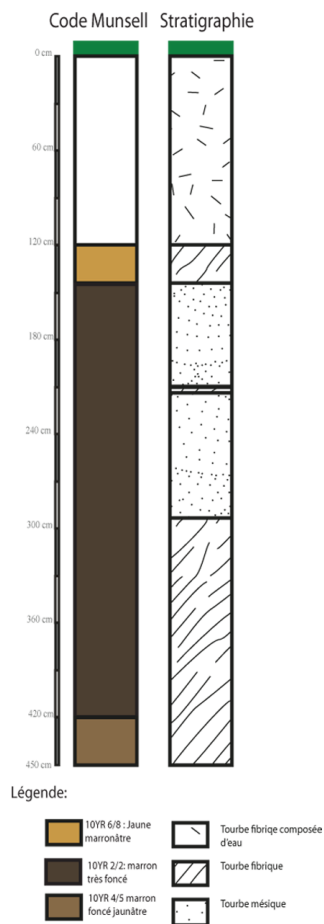
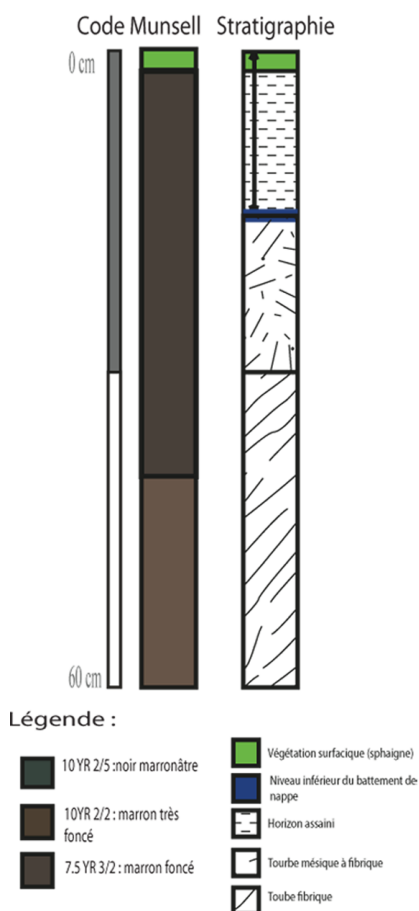


Figure 106 : Stratigraphie des points de prélèvements au carottier Russe – Tourbière du col – RNN du Lac Luitel (voir stratigraphie ci-après)

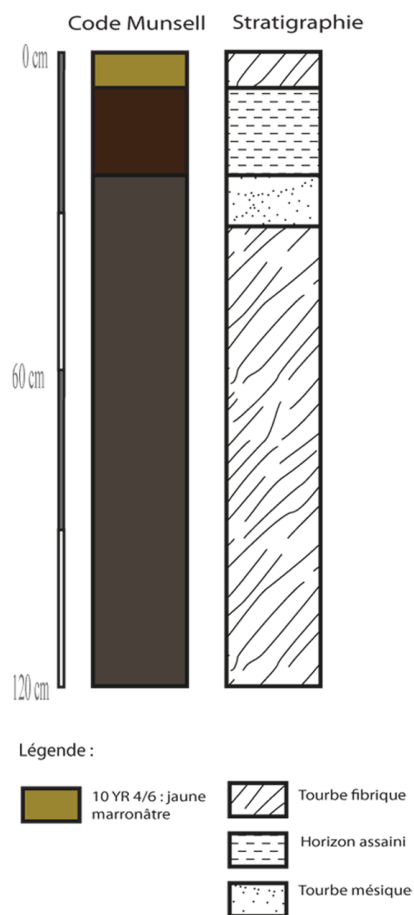
Profil P3-S2



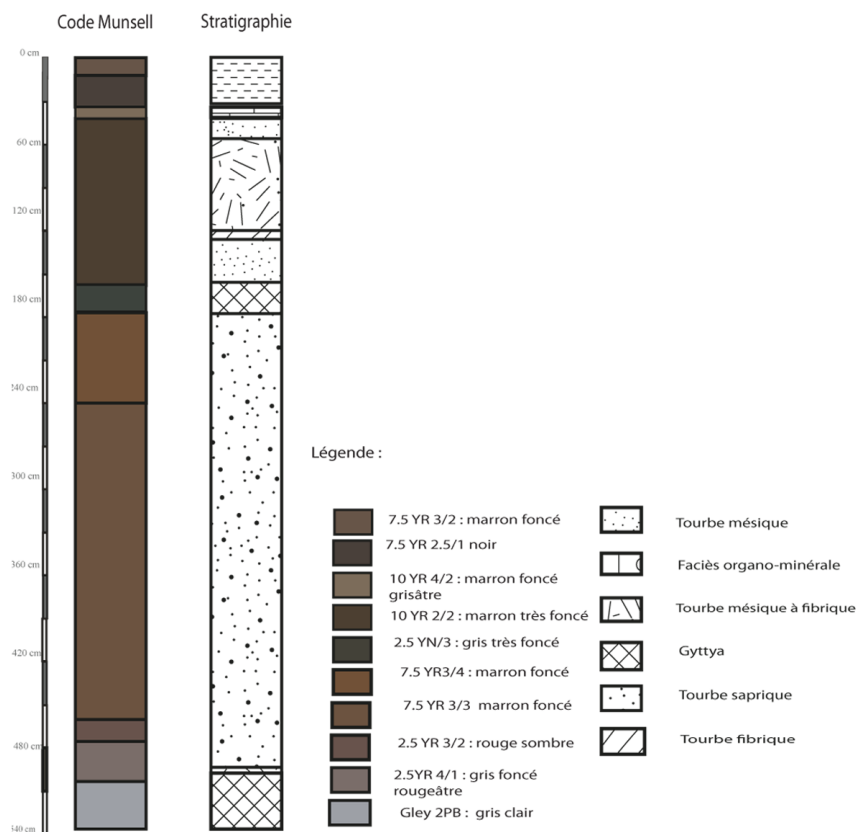
Profil P7-S1



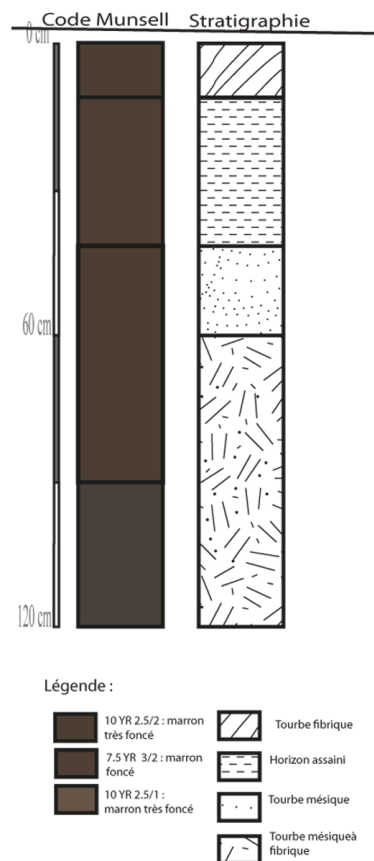
Profil P12-S6



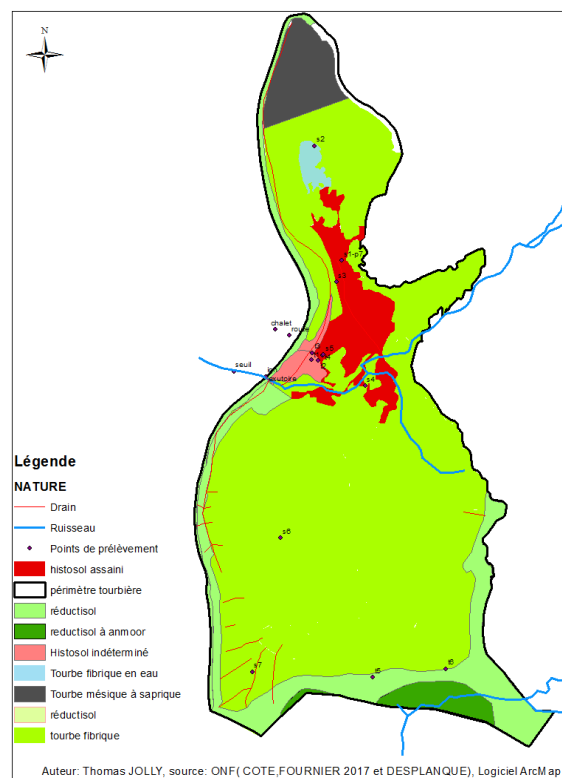
Profil P6-S4



Profil P1-S7

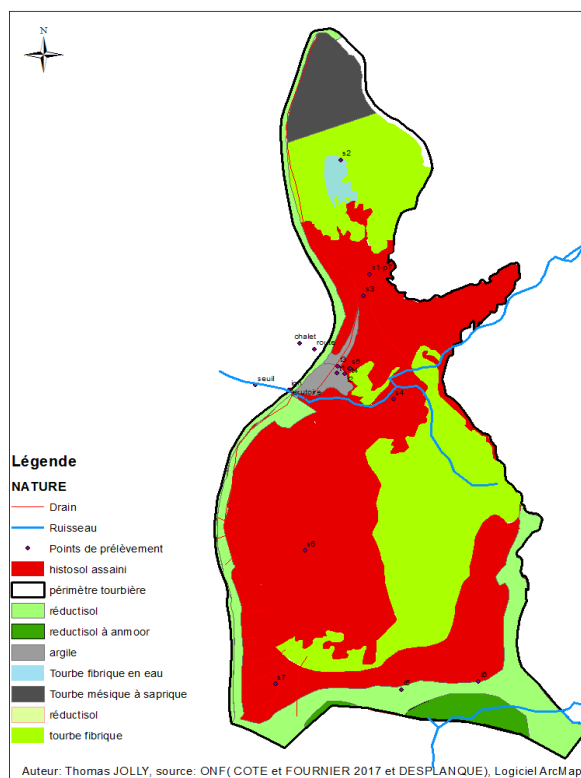


Faciès tourbeux affleurant - tourbière du col - RNN du Lac Luitel

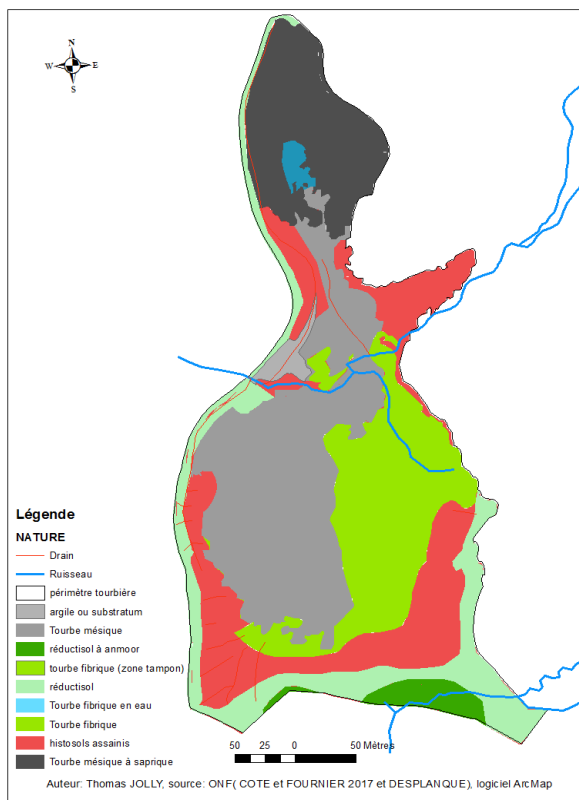


Faciès édaphiques à 0 centimètres de profondeur

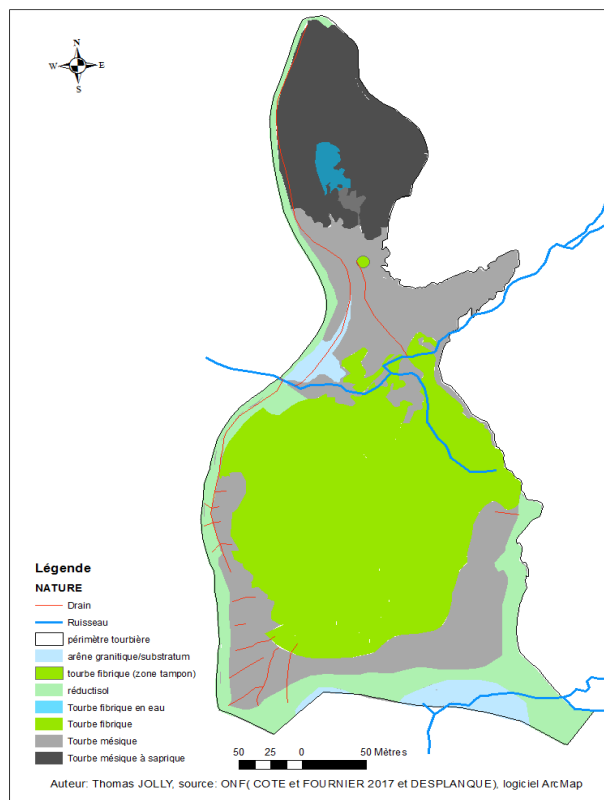
Faciès tourbeux à 15 centimètres- tourbière du col - RNN du Lac Luitel



Faciès édaphiques à 15 centimètres de profondeur



Faciès édaphiques à 30 centimètres de profondeur



Faciès édaphiques à 50 centimètres de profondeur

Figure 107 : Collection de cartes des faciès édaphiques de la tourbière du col.

2.4. Discussion

2.4.1. Interprétation des résultats

Au regard des différents résultats (analyses physiques, carte des faciès édaphiques), nous constatons que la tourbière du col présente des disparités spatiales du point de vue du fonctionnement hydrologique. Globalement la majeure partie des horizons affleurants sont composés d'une tourbe fibrique avec des coussins de sphaignes comme végétation de surface typique des tourbières actives. Les valeurs des propriétés hydrophysiques supposées dans ces faciès sont élevées avec 10^{-1} m/s pour la conductivité hydraulique et 30% de porosité efficace (Wastiaux, 2008). Cependant une majeure partie des secteurs (pinède à sphaigne, prairie à molinie) présentent des horizons assainis (ou KTH), comme l'atteste la carte des faciès à 15 centimètres. Si l'on considère que cette structure modifie l'écoulement des eaux au sein du complexe tourbeux (Cholet et Magnon, 2010), le potentiel joué par les tourbes fibriques n'est pas maximal (comme en témoigne globalement les plus faibles valeurs des propriétés hydrophysiques des tourbes fibriques de surface, par rapport à celle sous l'horizon assaini (P12S6 par exemple). Comprendre l'origine de cette strate assainie est important dans une perspective de gestion durable du site, sur le plan écologique mais surtout hydrologique. Au vue des éléments dont nous disposons (bibliographie, analyses, témoignages), la présence de ces horizons serait davantage liée à un piétinement qu'à la seule action des fossés de drainage. La reprise de l'activité turfigène sur une majorité des secteurs accrédite cette hypothèse, dans la mesure où le piétinement n'a plus lieu alors que les fossés de drainage sont toujours en place. En revanche, il ne faut pas écarter l'action de ces collecteurs, qui peuvent, en complément d'un piétinement, accentuer les processus de minéralisation par le rabattement de la nappe sur les zones connexes (environ deux mètres). En somme, la minéralisation des faciès tient davantage du piétinement, le drainage jouant à priori un rôle complémentaire mais pas déterminant dans le démarrage de ce processus.

À 30 centimètres de profondeur, nous retrouvons encore des horizons assainis dans les zones bordant les pinèdes (au Sud et au Nord). Les autres faciès vont des tourbes humifiées (pinède à sphaignes) voir très humifiées (pinède à rhododendrons et myrtilles) au Nord à des tourbes très fibriques dans la partie de prébois de Pins à crochets au sud-est. Les valeurs de conductivité dans les tourbes humifiées sont de l'ordre 10^{-5} m/s pour une porosité efficace de 10 à 15 %, selon que l'on se trouve dans des tourbes mésiques ou sapriques. Même si les valeurs sont plus faibles, avoir un ordre d'idée des propriétés hydrodynamiques dans ces milieux est intéressant, étant donné que nous nous situons encore dans l'acrotelme « théorique », soit la zone active du point de vue hydrologique. À 50 centimètres, la spatialisation des faciès présente une vaste zone (dans la pinède au sud) avec de bonnes potentialités de stockage théorique de l'eau (faible densité apparente, forte porosité et humidité). La zone au Nord, centrale, et les milieux bordant les pinèdes sont des histosols plus humifiés, mais qui possèdent aussi des bonnes conditions hydrophysiques au regard des analyses et des valeurs théoriques.

Si les zones composées de tourbe ont été décrites, il ne faut pas négliger les zones périphériques qui jouent un rôle dans le fonctionnement de l'hydro-complexe, tant les conditions de circulations et les vitesses d'écoulement des eaux peuvent être importantes dans ces formations. Les secteurs à molinies et à *Carex nigra* sur réductisols, typiques des formations paratourbeuses, sont généralement des zones peu profondes, avec des arènes granitiques déposées sur le substratum²¹. De plus ces zones sont des secteurs privilégiés dans la réception des eaux de ruissellements issus des versants.

2.4.2. La question du soutien d'étiage

Si la caractérisation des faciès pédologiques et la détermination des propriétés hydrophysiques associées permettent d'en savoir davantage sur le comportement de l'eau dans la structure interne de la zone humide, ces informations permettent également d'alimenter et de discuter la question du soutien d'étiage. Pour estimer le débit de soutien d'étiage de la tourbière, un modèle de systèmes dynamiques a été conçu (Partie II - §4.1 Modèles réservoirs – modélisation du soutien d'étiage au Luitel, p75).

²¹ Le processus de formation de ce dépôt n'est pas connu (solifluxion, colluvionnement ou altération en place)

Le débit d'été maximum modélisé en période d'été sur la période allant du 06/08/2014 au 26/10/2017 est de 0,38 l/s (soit 0,55 m³/jour soit 0,023 m³/h). Ce modèle permet donc de répondre à la question de départ : la tourbière du col Luitel délivre un soutien d'été au cours d'eau. Cependant il faut prendre garde à ne pas extrapoler ce résultat à l'ensemble des tourbières de tête de bassin ; chaque contexte d'alimentation en eau et d'intégrité du milieu étant différent.

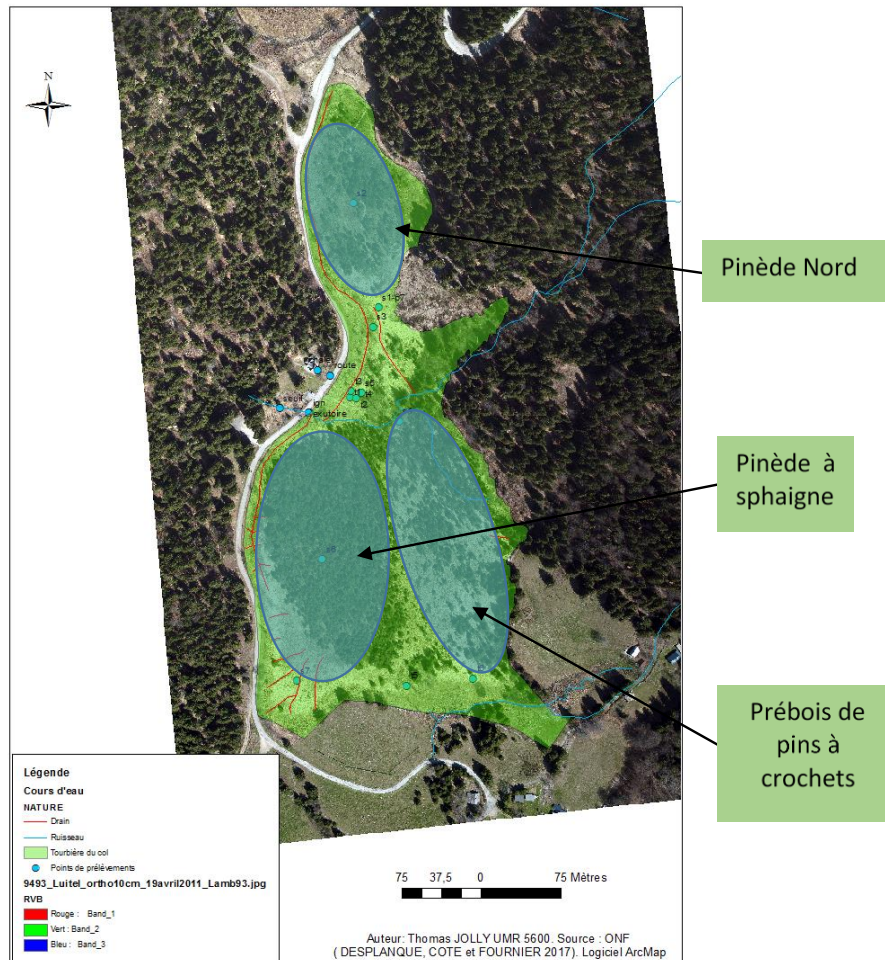


Figure 108 : Synthèse des « zones réservoirs » susceptibles d'assurer un été

Les 3 secteurs désignés présentent de fortes valeurs de conductivités hydrauliques et de porosité efficace (respectivement 10 m³/s et 30 %)

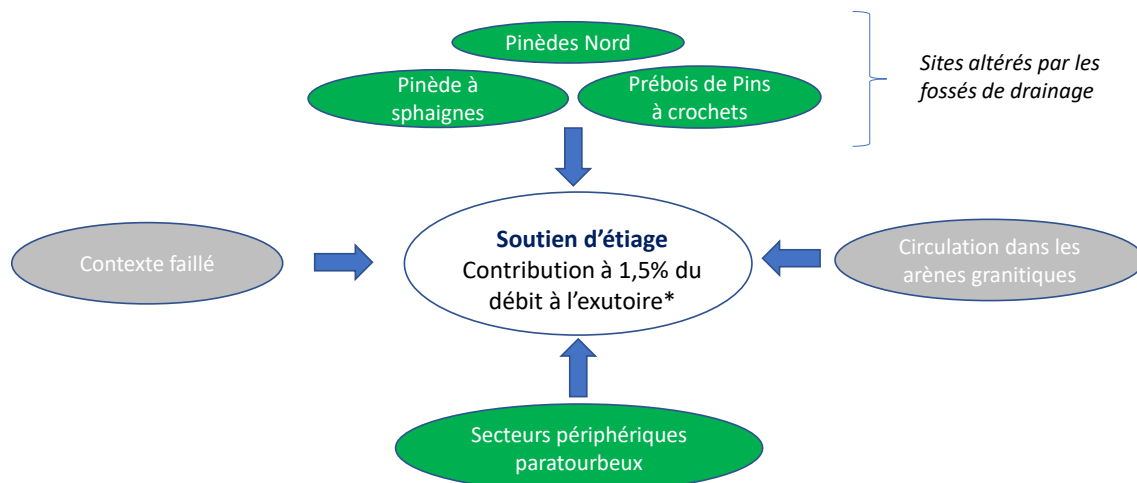


Figure 109 : Hypothèses sur les secteurs contribuant au faible soutien d'été

De plus, la notion d'étiage suggère de fixer des valeurs seuils. À partir de quel volume d'eau supplémentaire pour un débit donné peut-on parler de soutien d'étiage efficace ? La quantité d'eau apportée est-elle réellement profitable aux milieux en aval ?

À ce stade de l'analyse, s'il est établi qu'un soutien d'étiage existe, il est cependant difficile de caractériser avec certitude les secteurs de la tourbière pouvant délivrer un apport en période de basses-eaux. La Figure 108 et la Figure 109 proposent une première sectorisation des zones réservoirs. Toutefois, plusieurs hypothèses demeurent à l'heure actuelle :

- Les secteurs Nord ainsi que les zones de prébois de pins à crochets et pinède à sphaignes offrent des possibilités de relargage faibles et constantes étant donné l'altération du site par drainage. L'hypothèse selon laquelle les tourbières drainées sont susceptibles d'assurer un soutien d'étiage a tendance à se vérifier dans le cas présent. En effet, sans les drains situés sur la partie Nord-Est et Sud-Est, la connexion au ruisseau ne serait pas autant facilitée. Cela contribuerait hypothétiquement à des battements de nappes moins importants. La conclusion que l'on peut donc en tirer est qu'une tourbière drainée est susceptible d'assurer un soutien d'étiage (comme le rapporte Wastiaux, 2008) au moins à court terme.
- Le contexte faillé du site et l'hypothèse exposée dans le plan de gestion selon laquelle des transferts d'eaux probables auraient lieu du lac vers le ruisseau.
- Des phénomènes de circulations au niveau des arènes granitiques ont lieu à l'exutoire sud du site, ce phénomène pourrait être identique au niveau de Fontfroide.

2.5. Conclusion et perspective

Si cette étude a permis de mettre en évidence la caractérisation hydro-pédologique du site, des pistes de réflexions peuvent être avancées afin d'obtenir des résultats plus ciblés.

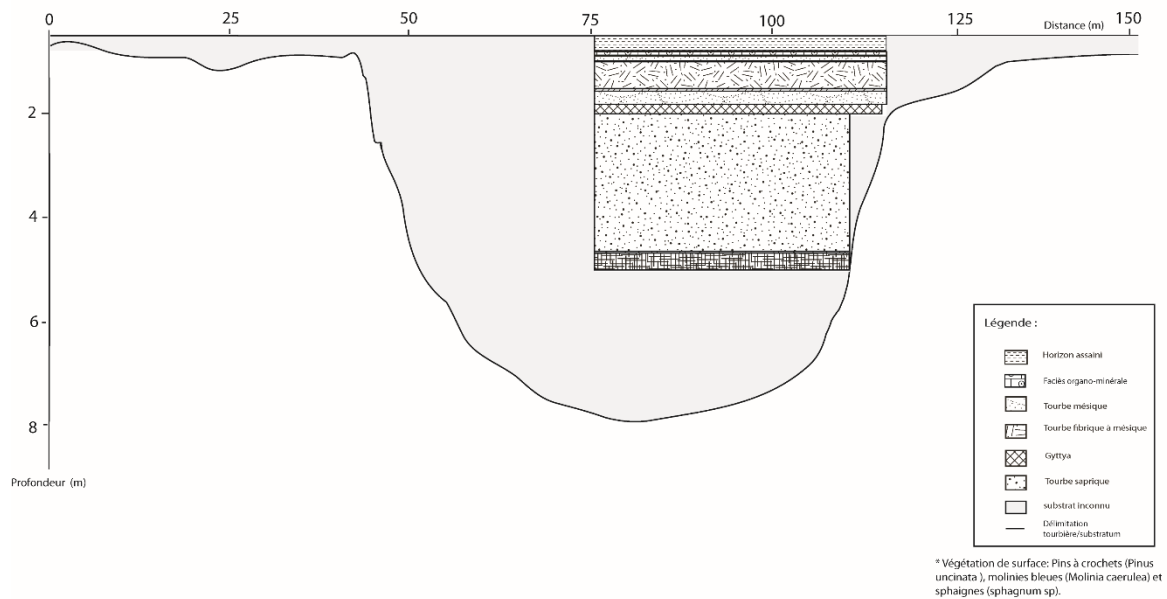
- **Détermination des structures par la géophysique et la pédologie**

Pour rappel, au cours de la phase 2 du projet, une campagne de géophysique a été menée afin de comprendre et de déterminer les structures et les zones d'eau dans les premiers mètres du complexe tourbeux (Partie III - §1 Volet géophysique, p92). Cette phase est cruciale pour estimer les zones susceptibles d'assurer une « réserve en eau » et un soutien d'étiage au cours d'eau. À ce stade de l'étude, les derniers profils géophysiques n'ont pas encore été analysés. L'objectif est donc de repositionner les différentes strates pédologiques en fonction de la géophysique, afin de faciliter la détermination des différentes structures repérées par le radar géologique.

- **Caractérisation de la paléo-topo-stratigraphie de la tourbière du col**

L'un des objectifs du projet est d'arriver à une reconstitution en trois dimensions de la tourbière du col, avec l'intégration des données hydrologiques, géophysiques et pédologiques. Dans ces conditions, proposer une vue en coupe détaillée des faciès pédologiques sur les transects géophysiques est un bon moyen de se représenter les différentes textures dans la tourbe (exemple, Figure 110).

Coupe paléostratigraphique simplifiée du transect P6 - Point S4 - tourbière du col



Auteur: Thomas JOLLY. Logiciel Illustrator, 2018. D'après GARAMBOIS & DESPLANQUE 2009- 2010.

Figure 110 : Coupe paléo stratigraphique simplifiée du transect P6-Point S4 – tourbière du col

À ce stade de l'étude, les résultats apportés suite aux investigations sur le terrain et les analyses en laboratoire ont permis une caractérisation des pédofaciès de la tourbière du col. Ceci a permis de dresser les grandes tendances sur la dynamique de l'eau au sein de cet écosystème. Concernant le modèle développé pour déterminer un éventuel soutien d'été, celui-ci a mis en exergue qu'un écoulement avait lieu vers le ruisseau sur les périodes de sécheresse. Déterminer avec certitude l'origine de ces apports reste encore mal aisé à ce stade du projet. Néanmoins, il semblerait que les fossés de drainage puissent jouer un rôle déterminant dans le transfert des eaux vers l'exutoire de la tourbière. Dans un contexte envisagé de restauration de la tourbière, engager un comblement de ces fossés aurait pour effet de rehausser les niveaux d'eaux sur certains secteurs, mais aussi de limiter les flux vers ces zones d'écoulements préférentiels. Une analyse croisée entre la pédologie et la géophysique permettra d'en apprendre davantage pour formaliser des hypothèses plus solides.

3. Volet géochimie

3.1. Tourbière de Luitel

3.1.1. Contexte

Dans le cadre du projet ZHTB Phase 2 », le LMV de l'Université Jean Monnet – Saint Etienne a réalisé les analyses chimiques et isotopiques en collaboration avec l'équipe EVS de l'École des Mines de Saint Etienne et le Laboratoire de géochimie de l'équipe Chrome de l'Université de Nîmes. Une campagne d'échantillonnage a été réalisée, le 26 juin 2018 et un dispositif de collecte des eaux de pluie a été mis en place. L'objectif était de caractériser les propriétés géochimiques des eaux du site de Luitel (Isère) afin d'identifier le potentiel d'une étude géochimique plus approfondie pour le traçage de l'origine des eaux alimentant la zone humide et les relations hydrogéologiques entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

Cette étude s'intéresse à la zone humide de Luitel (Commune de Séchilienne, Isère), un espace naturel de faible étendue géographique ($<0,3 \text{ km}^2$) se situant à 1250 m d'altitude et avec un allongement quasiment Nord – Sud. Selon la carte géologique (Figure 111), la zone humide se superpose à des dépôts alluvionnaires récents au sein d'une zone bien plus vaste constituée de dépôts glaciaires datant de la dernière période glaciaire (Würm). Le substratum du bassin versant de la zone humide est essentiellement constitué d'amphibolites et de gneiss et micaschistes. Ces formations géologiques sont parcourues par différentes familles de failles. Nous noterons la présence d'une famille de failles SSO-NNE s'étendant sur de grandes distances dont on retrouve un témoin sur la Figure 111 environ 500 mètres à l'ouest de la zone d'étude (Figure 111 et Sarrot-Reynauld et al., 1972). Une deuxième famille de failles SO-NO recoupe la précédente et a des étendues moindres (Figure 111 et Sarrot-Reynauld et al., 1972).

La zone humide est une succession de 3 cuvettes : le lac de Luitel au Nord et la tourbière du col comprenant 2 cuvettes principales (Figure 112). L'étude porte sur la tourbière du Luitel et la tourbière du col. La zone humide est alimentée par deux ruisseaux prenant leur source sur le versant Est. Le ruisseau de Pezanti arrivant au Sud de la tourbière du col et le ruisseau de Fontfroide arrivant dans la partie médiane de la tourbière du col (Figure 113).

3.1.2. Campagne d'échantillonnage

Une campagne d'échantillonnage a été réalisée le 26 juin 2018 avec pour objectif de confirmer la présence de contrastes chimiques et isotopiques entre les différentes masses d'eau accessibles sur site (ruisseaux, fossés/draines et piézomètres). Le site se trouvait alors dans un contexte hydrologique de moyennes eaux.

Quinze piézomètres ont pu être échantillonnés (P1, 2, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 19, 20 ; Figure 113), la répartition de ces piézomètres permet d'avoir une très bonne couverture de la zone humide et des différents milieux recensés. Les deux ruisseaux ont été échantillonnés en amont et en aval des tourbières, pour le ruisseau de Fontfroide deux échantillons supplémentaires ont été collectés sur le segment traversant la tourbière du col. Les eaux s'écoulant dans un fossé de la partie nord de la zone d'étude (tourbière de Luitel, Fo3) et dans un fossé de la partie sud (Fo1, bordure est de la tourbière du col) ont été collectées.

Des eaux souterraines ont été échantillonnées dans le captage d'eau pour l'alimentation du chalet de la réserve du Luitel. Ce captage se situe à proximité du ruisseau de Fontfroide en amont de la zone humide (Figure 113)

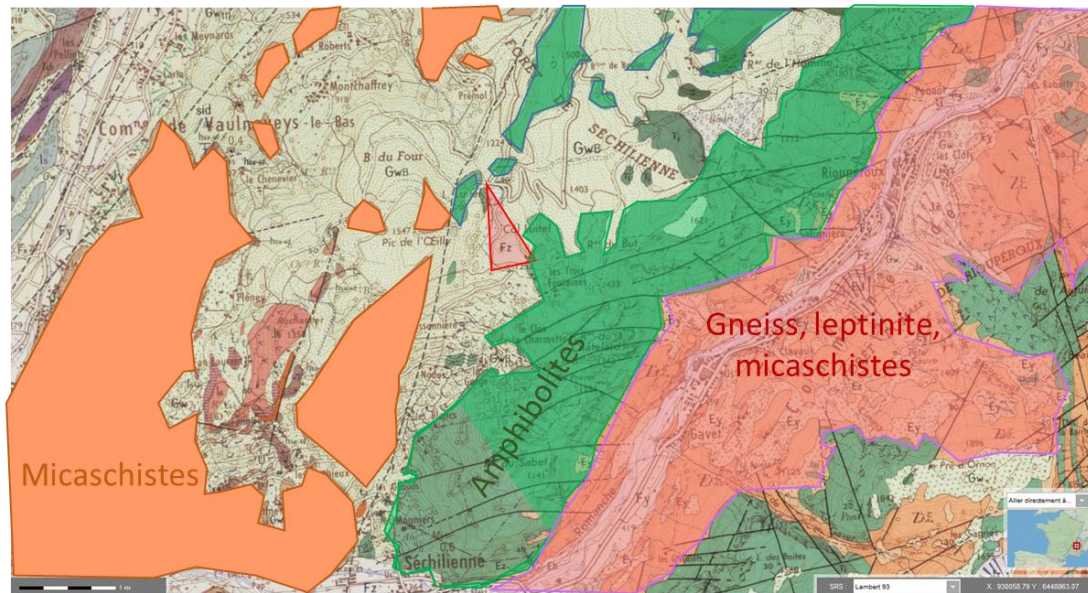


Figure 111 : Extrait de la carte géologique au 1/50000^{ème}. La zone humide de Luitel est localisée par le triangle rouge

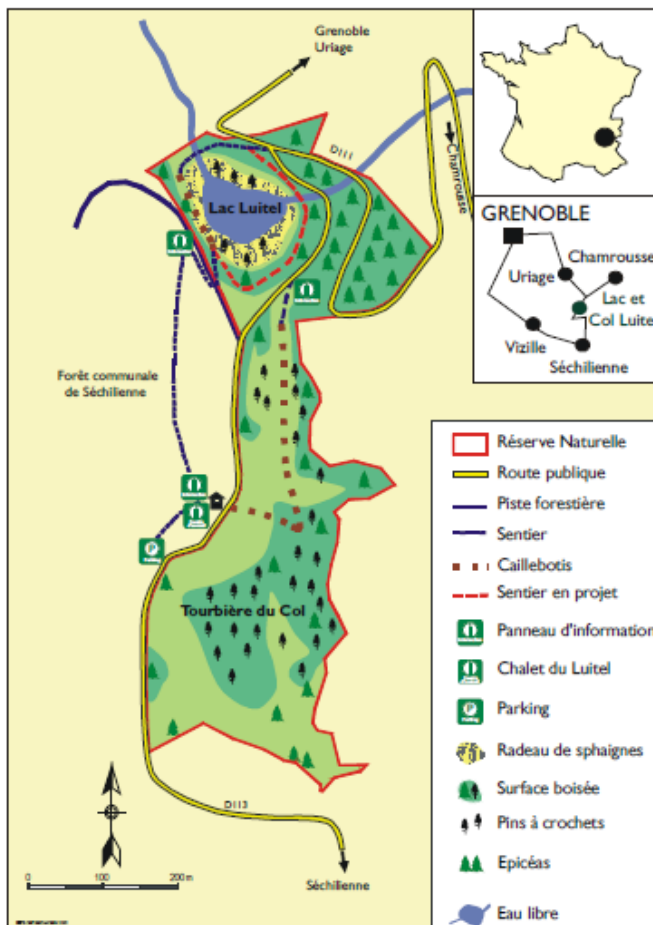


Figure 112 : Carte simplifiée de la réserve naturelle du Lac

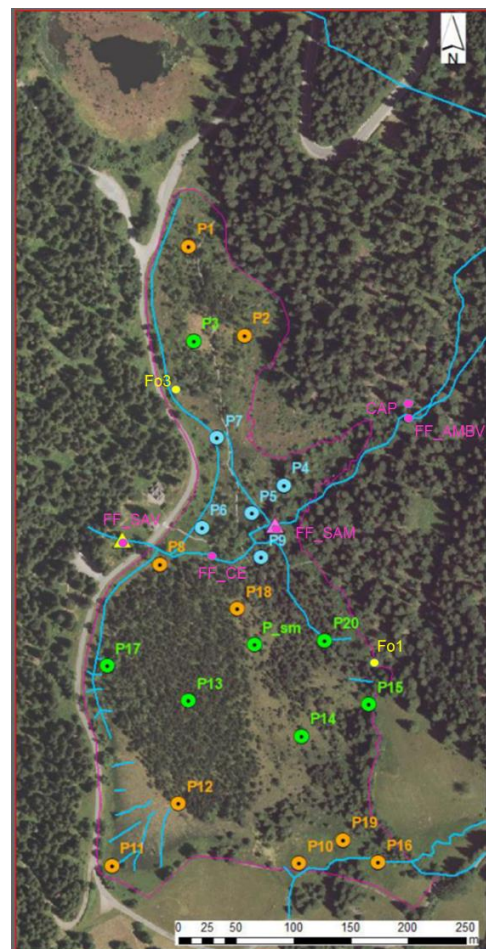


Figure 113 : Localisation des point d'échantillonnage, les piézomètres de la zone humide

Luitel (Desplanque, 2001, publié dans Guiter et al. 2015).

sont notés PXX, les fossés/drains sont notés FoX, le ruisseau de Fontfroide est noté FF (AMBV= amont bassin versant, SAV=seuil aval, SAM : seuil amont, CE : centre) ; CAP=captage

Un collecteur d'eau de pluie a été installé sur site le 25 septembre 2018 pour un suivi des précipitations sur plus de 12 mois afin de définir les propriétés chimiques et isotopiques des précipitations susceptibles d'alimenter les eaux souterraines et de ruissellement de la zone d'étude. Les pluies de la période allant du 25 septembre au 7 novembre 2018 ont été collectées au niveau de la station météorologique implantée sur la tourbière du col (Figure 113, P_SM). L'échantillon analysé regroupe les précipitations de plusieurs événements pluvieux pour un total de 150,5mm (Tableau 13).

Date	Précipitations cumulées (mm)
29-sept	12,9
30-sept	13,8
06-oct	15,9
10-oct	3
26-oct	25,6
27-oct	21,2
28-oct	25,2
29-oct	2,2
31-oct	10,4
01-nov	3,2
05-nov	4,4
06-janv	9,5
07-nov	3,2

Tableau 13 : Enregistrement des précipitations sur la zone humide du Luitel entre le 29 septembre et le 7 novembre 2018 (Date et hauteur de précipitation)

3.1.3. Les traceurs géochimiques utilisés

Afin de connaître au mieux l'origine et le chemin des eaux au sein de la zone humide et dans son environnement immédiat différents traceurs géochimiques ont été utilisés certains dépendant des interactions eau-atmosphère ($\delta^{18}\text{O}$ et δD) et d'autres dépendant des interactions eau-roche (éléments majeurs).

3.1.3.1. Éléments majeurs

L'abondance des ions majeurs dans les eaux (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^{2-}) est contrôlée par la nature chimique des roches et autres matériaux traversées et par le temps d'échanges entre l'eau et ces derniers. Certaines espèces ioniques peuvent également avoir une origine anthropique, du fait de l'activité industrielle, agricole, ou encore du fait des rejets domestiques. Dans le secteur d'étude nous ne relevons pas d'activité agricole significative (uniquement pâturage) ni d'activité industrielle, il est cependant à noter la proximité des routes qui en hiver sont salées pour lutter contre le verglas. La fonte des neiges et les pluies peuvent ainsi entraîner l'infiltration et le ruissellement d'eaux anormalement riches en sodium et en chlorures par exemple.

3.1.3.2. Les isotopes de l'eau

Les isotopes stables de l'eau (^{18}O , ^{16}O , Deutérium ou ^2H) sont utilisés pour comprendre l'origine des eaux (zone de recharge) dans des environnements variés (montagne, aquifères fracturés, etc. ; [Coplen et al., 2000] ; [Barbieri et al., 2005] ; [Chapman et al., 2003] ; [Gurrieri et Furniss, 2004] ; [Kendall et Caldwell, 1998] ; [Maréchal et Etcheverry, 2003] ; [Rademacher et al., 2002]). Les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène, notées respectivement $\delta^{18}\text{O}$ et δD , expriment l'abondance relative des deux isotopes des éléments considérés par rapport à un standard international qui est l'eau

de mer (SMOW). Les $\delta^{18}\text{O}$ et δD des précipitations alimentant les rivières et les nappes sont principalement représentatifs des conditions de leur formation : température de surface (effet saisonnier), latitude, altitude. Sur un diagramme « δD vs $\delta^{18}\text{O}$ », les eaux de pluie se répartissent le long de la droite des eaux météoriques mondiales, des droites locales sont définies comme pour les eaux météoriques de Genève (Halder et al., 2013), de Thonon (GNIP, IAEA) et les eaux météoriques de Méditerranée Occidentale [Celle 2000]. L'oxygène et l'hydrogène de la molécule d'eau étant considérés comme des éléments conservatifs dans les zones tempérées et en domaine de surface/subsurface sur de courtes périodes de temps, les compositions isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et δD des eaux de rivière et des eaux souterraines présentent les mêmes caractéristiques que les eaux de pluie qui les alimentent : variations saisonnières et effet d'altitude. Dans un contexte d'eaux circulantes le principal processus à l'origine de la modification du $\delta^{18}\text{O}$ et du δD d'une eau de surface est le mélange avec des eaux d'une ou plusieurs origines différentes.

3.1.4. Les méthodes analytiques

3.1.4.1. Les mesures de terrain

Le pH, la température, la conductivité ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'une sonde multi-paramètres VWT 3420Tc. La mesure de l'alcalinité par titrage à l'acide sulfurique à l'aide du test de Hach est rendue difficile par la coloration brun-rouge des eaux de la tourbière et par leur pH souvent bas. Ainsi l'alcalinité a été mesurée dès que cela a été possible ($\text{pH} > 5$ et faible coloration des eaux), pour les autres échantillons l'alcalinité a été calculée.

3.1.4.2. Les ions majeurs

Pour chaque station de prélèvement, deux volumes de 60 mL ont été collectés dans des flacons HDPE de 60 mL. Le flacon destiné à l'analyse des cations a été filtré à $0,45\ \mu\text{m}$ et acidifié avec HNO_3 2N ultrapur pour atteindre un $\text{pH} \approx 3$. Les échantillons ont été filtrés en laboratoire avant dosage avec un filtre en fibres de verre à $0,45\ \mu\text{m}$.

Les concentrations en cations et en anions ont été mesurées au laboratoire Chrome de l'Université de Nîmes, sur une double chaîne de chromatographie ionique Methrom 930 compact IC Flex.

L'intervalle de confiance pour les concentrations mesurées est de $\pm 5\%$.

3.1.4.3. Les isotopes de l'eau

Les échantillons destinés à la mesure des compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène sur les eaux ont été collectés dans des flacons en verre ambré de 20 mL en évitant l'emprisonnement de bulles d'air.

Les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène de l'eau ont été déterminées au laboratoire Magmas et Volcans – Saint-Etienne par équilibration isotopique à l'aide d'un système GASBENCH – Thermo, couplé à un spectromètre de masse Delta V Plus Thermo. Les standards internationaux GISP, SMOW-2 et SLAP ont été utilisés pour calibration. Les valeurs isotopiques sont reportées avec la notation δ en ‰ vs SMOW. L'incertitude des mesures est de $\pm 0,1\text{‰}$ pour le $\delta^{18}\text{O}$ et de $\pm 1\text{‰}$ pour le δD .

3.1.5. Discussion autour des résultats

3.1.5.1. pH et conductivité.

Les eaux collectées dans les piézomètres présentent un pH compris entre 3,8 et 5,8. Les eaux de surface (ruisseaux et drains/fossés) présentent un pH compris entre 5,6 et 8,6. Les eaux collectées sont globalement peu minéralisées avec une gamme allant de $7,9\ \mu\text{S}/\text{cm}$ à $126,4\ \mu\text{S}/\text{cm}$. La conductivité des eaux collectées dans les piézomètres décrit l'intégralité de la gamme ci-dessus alors que la conductivité des eaux de surface (ruisseaux, drains/fossés) décrit une gamme plus restreinte entre $15,3$ et $75,2\ \mu\text{S}/\text{cm}$; la conductivité des eaux du captage est également dans cette gamme.

3.1.5.2. Concentrations en éléments majeurs

Les concentrations en éléments majeurs (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^-) ont été utilisés pour la réalisation des projections graphiques de Piper et de Schoeller-Berkaloff à l'aide du logiciel Diagrammes²².

Le diagramme de Piper permet de définir le faciès des eaux collectées sur la zone d'étude (Figure 114). Les eaux collectées possèdent globalement un faciès bicarbonaté calcique à magnésien. Nous relèverons la particularité des eaux de pluie et des eaux des piézomètres 7 et 8 qui se placent dans un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien et aussi des eaux du piézomètre P20 qui se placent dans le faciès bicarbonaté sodique et potassique.

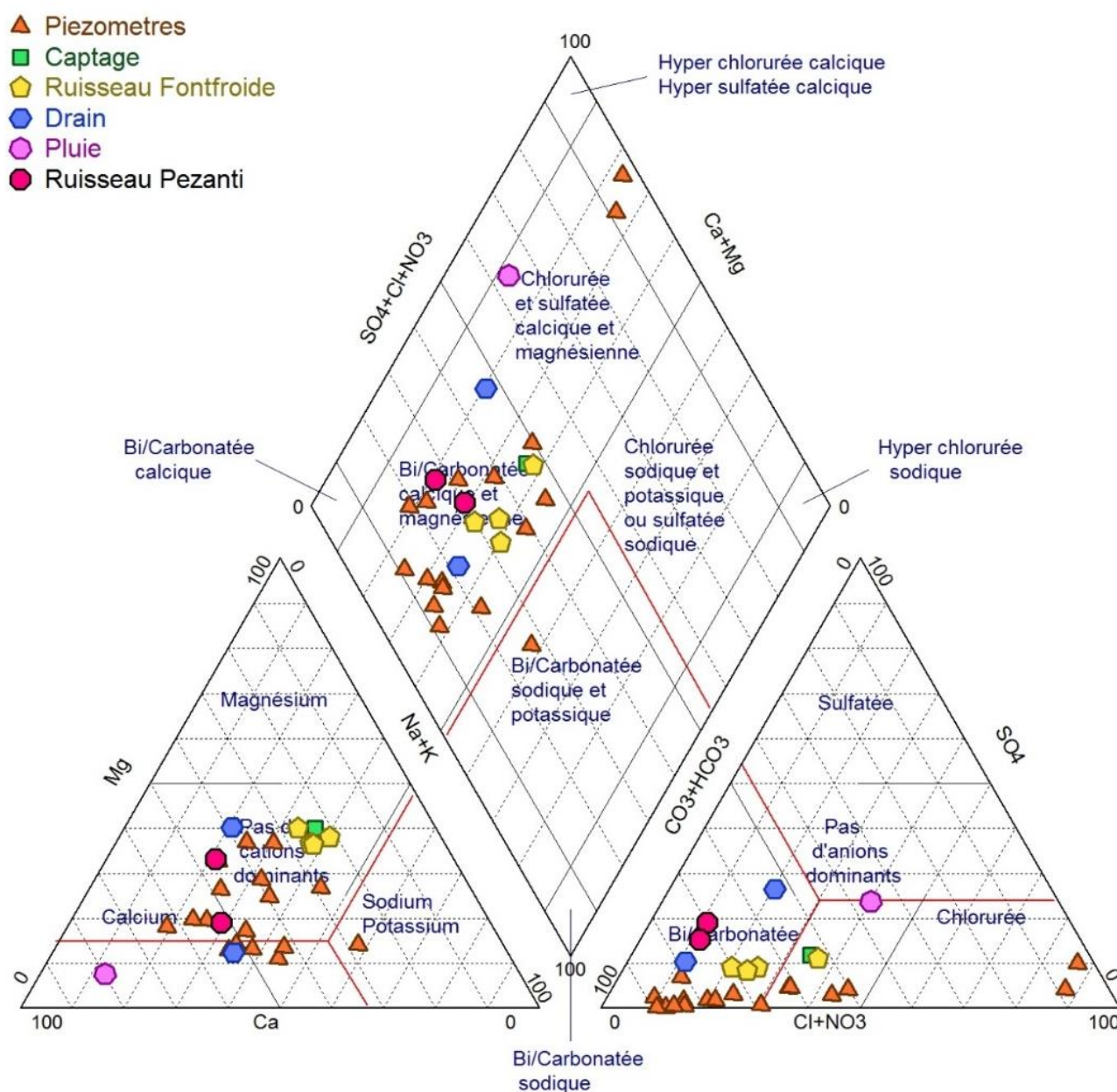


Figure 114 : Digramme de Piper reportant les abondances relatives des espèces ioniques majeures : cations (triangle de gauche) et anions (triangles de droites)

²² <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>

L'utilisation du diagramme de Schoeller-Berkaloff permet de comparer plus facilement le faciès des différentes eaux analysées et ainsi de regrouper les eaux appartenant à un même contexte hydrogéologique (Figure 115) en s'appuyant sur la similitude des rapports d'abondance entre les différentes espèces ioniques matérialisées par la pente des segments reliant les différentes données d'un même échantillon. Ces représentations graphiques suggèrent ainsi que les eaux du captage et du ruisseau de Fontfroide ont le même contexte hydrogéologique et que la traversée de la tourbière n'influence pas significativement la chimie des eaux du ruisseau. En revanche il apparaît sur l'échelle logarithmique des différences de concentration pour les eaux d'un point de prélèvement à l'autre pouvant atteindre un facteur 2 pour les concentrations en ions calcium par exemple. Ces variations de concentrations peuvent s'expliquer par exemple par des taux de dilution plus ou moins important par des eaux de pluie très peu minéralisées ou encore par des variations des temps d'interaction des masses d'eaux avec les formations traversées. Ces premiers résultats ne permettent pas de discriminer l'influence de chacun de ces contrôles sur de la chimie des eaux.

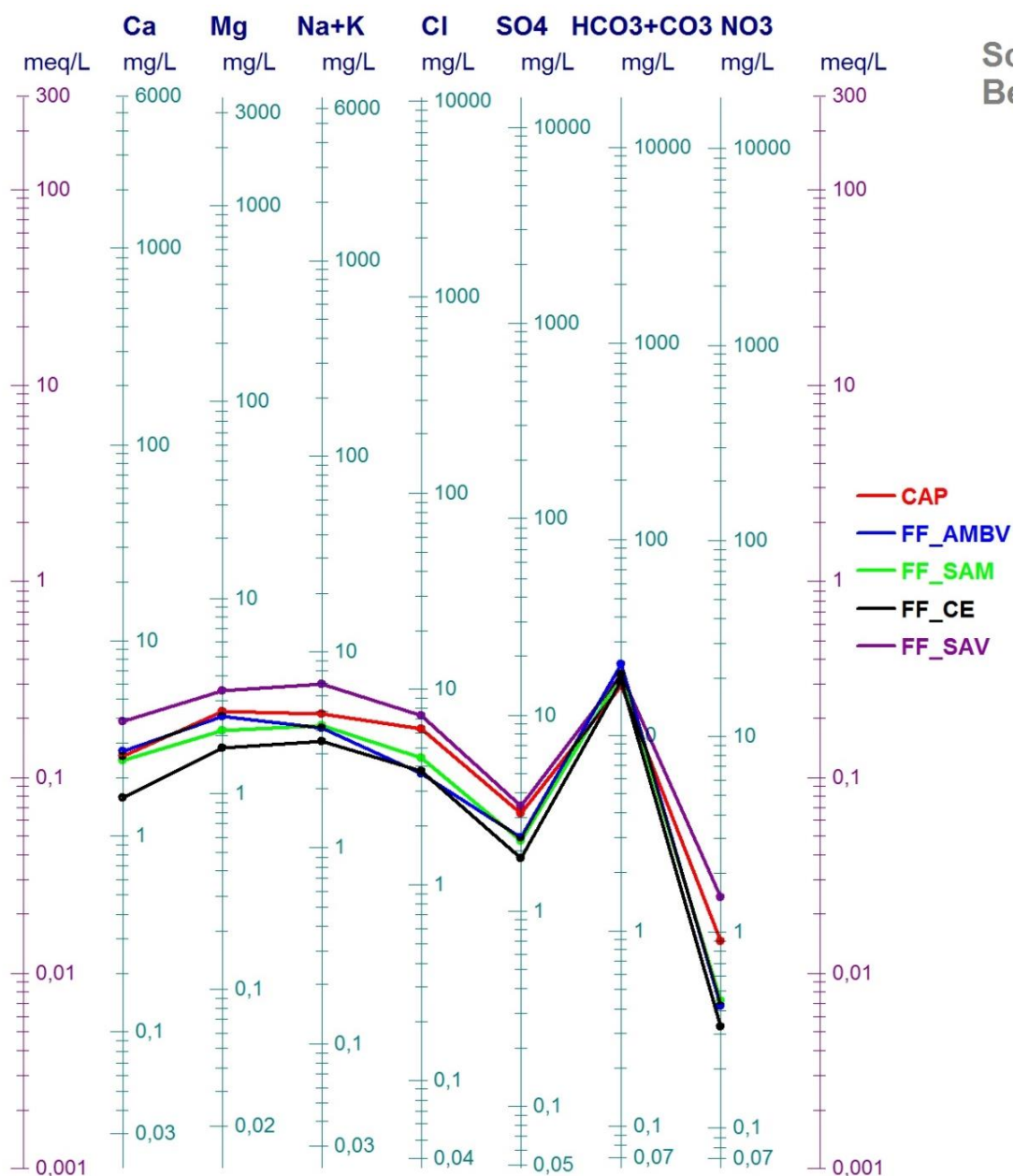


Figure 115 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff représentant les concentrations des eaux prélevées en différents points du ruisseau de Fontfroide et dans les eaux du captage. Les concentrations sont reportées en mg/L sur une échelle logarithmique, l'équivalence en meq/L peut être lue sur l'échelle de gauche.

PARTIE III - Volets géophysique, pédologie, géochimie

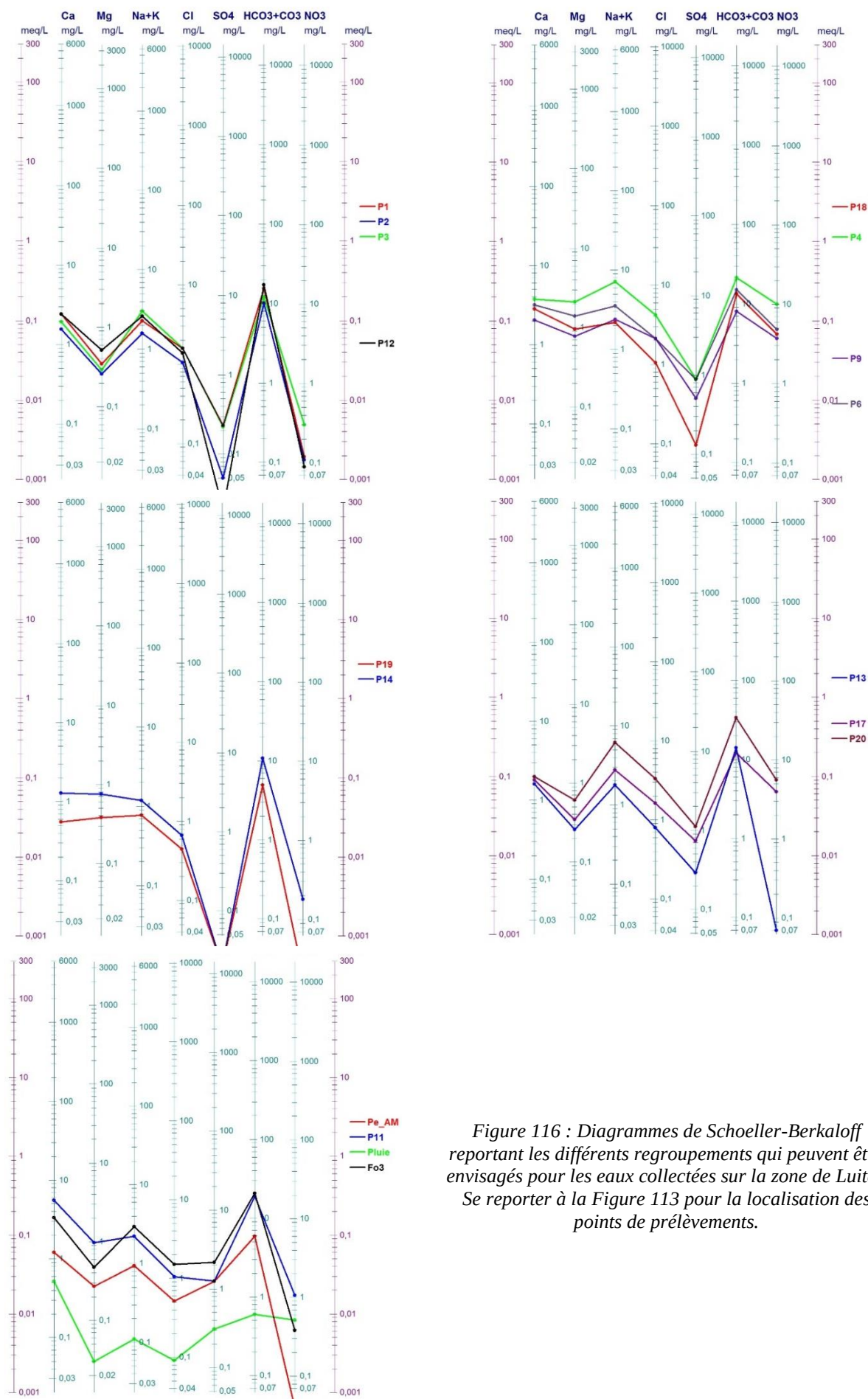


Figure 116 : Diagrammes de Schoeller-Berkaloff reportant les différents regroupements qui peuvent être envisagés pour les eaux collectées sur la zone de Luitel. Se reporter à la Figure 113 pour la localisation des points de prélèvements.

Les eaux collectées dans les autres points d'échantillonnage de la zone d'étude affichent des contextes hydrogéologiques différents, mais plusieurs regroupements peuvent être envisagés (Figure 116) :

- Les eaux des piézomètres de la tourbière du Luitel (P1, P2, P3) et du piézomètre P12 qui se situe dans le quart sud-ouest de la tourbière du col et dans une moindre mesure les eaux du fossé Fo3 situé sur la bordure ouest de la tourbière du Luitel qui présente des caractéristiques similaires.
- Les eaux des piézomètres P4, P6, P9, P18 qui se situent au nord de la tourbière du col de part et d'autre du ruisseau de Fontfroide, à moins de 30 mètres. Ces eaux décrivent une tendance similaire à la tendance précédente mais avec des rapports d'abondance moins marqués et des concentrations en nitrates plus élevées d'un facteur supérieur à 10 par rapport aux concentrations observées pour le groupe précédent. Les eaux du piézomètre 7 situé au sud de la tourbière de Luitel semblent suivre une tendance intermédiaire aux deux précédentes.
- Les eaux des piézomètres P14 et P19 qui se situent dans la partie sud-est de la tourbière du col. Ces eaux présentent des concentrations homogènes pour les différentes espèces cationiques et présentes de très faibles concentrations en sulfates et nitrates.
- Les eaux des piézomètres P13, P17, P20 qui dessinent un transect est-ouest en partie centrale de la tourbière du col.
- Les eaux du ruisseau Pezanti prélevées en amont de la tourbière du col, les eaux du fossé 3 prélevées dans la tourbière du col et les eaux du piézomètre 11 situé dans la partie sud-ouest de la tourbière du col décrivent des rapports d'éléments similaires à ceux de l'eau de pluie tout en présentant des concentrations plus élevées.
- Les caractéristiques chimiques des eaux des piézomètres P15 et du fossé Fo1 tous deux situés sur la bordure est de la tourbière du col, les eaux du piézomètre 8 situé sur la bordure nord-est de la tourbière du col et les eaux du Pezanti à l'aval de la tourbière du col ne peuvent être raccrochées à aucune des tendances ci-dessus et ne présentent pas de similitude de faciès entre elles.

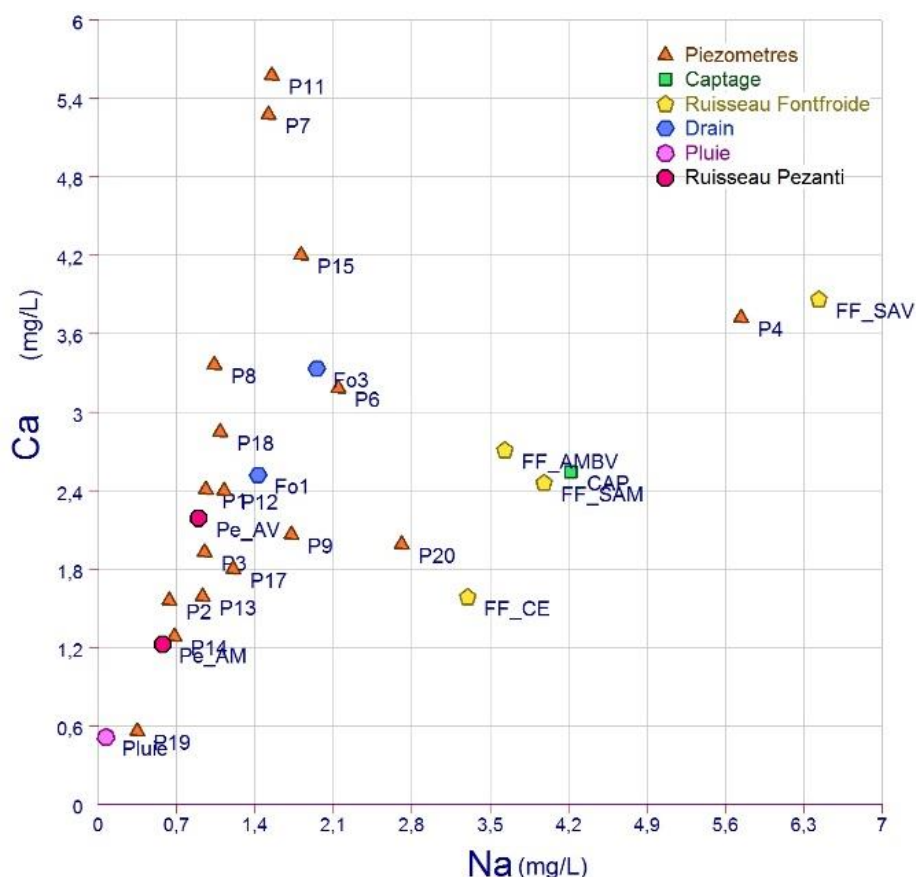


Figure 117 : Diagramme binaire $Ca=f(Na)$. Les concentrations sont exprimées en mg/L

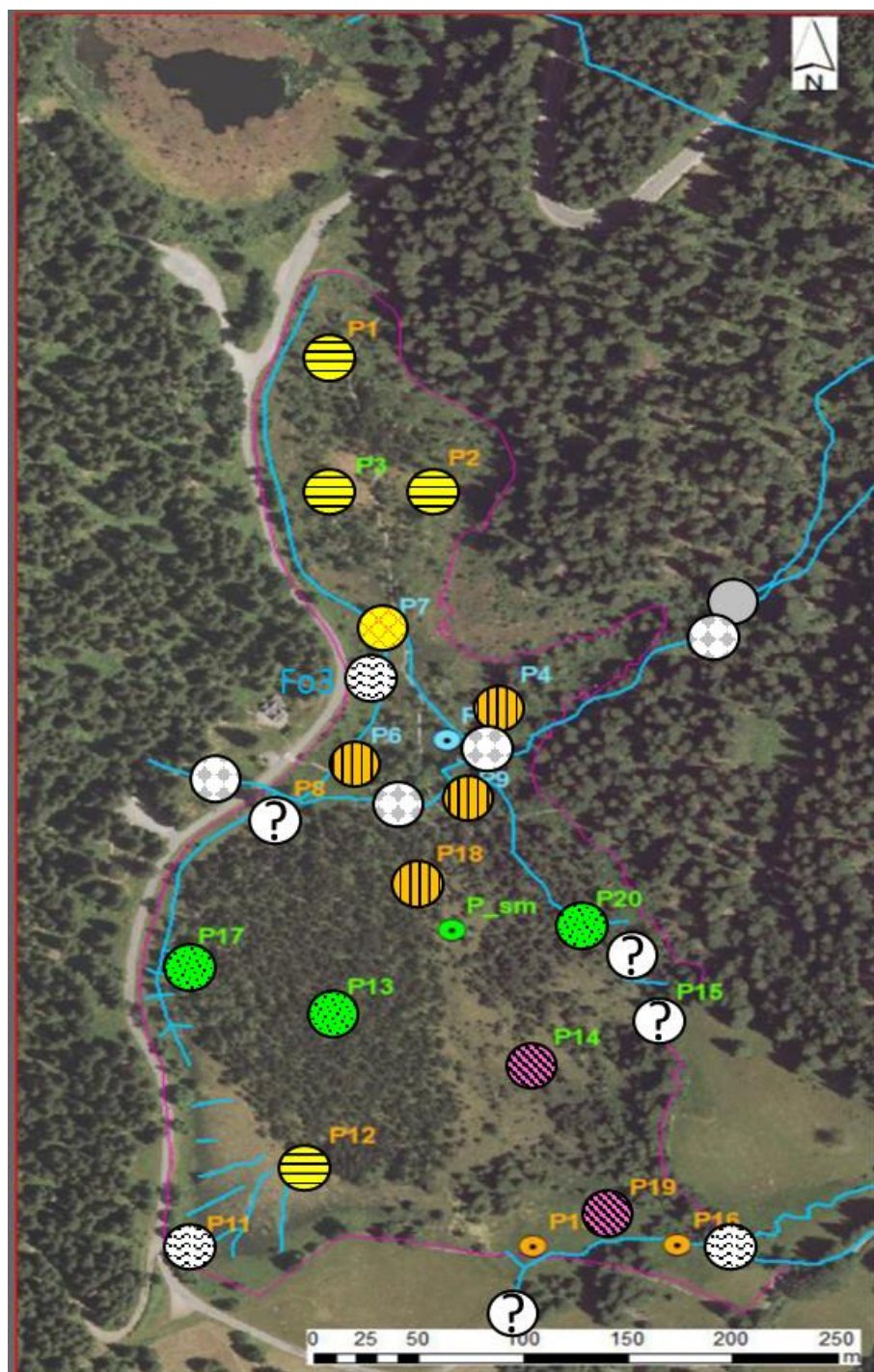


Figure 118 : Représentation des différents groupes hydrogéochimiques définis à partir des diagrammes de Schoeller-Berkaloff

Ces observations suggèrent une zonation hydrogéologique du secteur d'étude qui sera à affiner avec des campagnes de prélèvements supplémentaires.

Différentes familles d'eau sont donc recensées sur le secteur d'étude témoignant de la diversité des influences sur les eaux des écoulements de surface et des eaux profondes.

Le diagramme binaire $Na=f(SO_4)$ montre deux tendances (Figure 117), une première décrite par les eaux du ruisseau Pezanti, les fossés et le piézomètre 8 qui suggère un mélange entre des eaux de pluie et des eaux plus riches en Na et SO_4 , ce deuxième pôle ne peut être défini à partir des données disponibles. La deuxième tendance implique la grande majorité des eaux des piézomètres, et les eaux du ruisseau Fontfroide. Il suggère également un mélange entre un pôle proche de l'eau de pluie et un

deuxième pôle non identifié qui a une contribution plus importante sur les eaux de Fontfroide en aval de la zone humide. Le même type de tendance est visible sur les diagrammes $K=f(Cl)$ et $Ca=f(Na)$.

L'ensemble de ces observations suggère que les eaux des deux ruisseaux ne traversent pas les mêmes milieux, il est nécessaire pour aller plus loin dans la discussion de caractériser précisément les propriétés géochimiques des milieux traversés (Figure 118)

3.1.5.3. Les isotopes de l'eau

Les compositions isotopiques des eaux collectées sur le secteur d'étude indiquent une origine météorique (Figure 119). Les données se distribuent autour de la droite des eaux météoriques mondiales dans une gamme de valeurs comprises respectivement entre -11 et -9‰ et -80 et -60‰/SMOW pour le $\delta^{18}O$ et le δD . Le suivi des précipitations sur l'année 2019 et 2020 permettra de replacer ces données par rapport aux précipitations locales. Une première donnée pour les précipitations de septembre à novembre 2019 fournit des $\delta^{18}O$ et δD très négatifs par rapports à ceux mesurés dans les eaux de ruissellement et les eaux des piézomètres (Figure 119).

Il est à noter que les eaux du ruisseau de Fontfroide et les eaux du captage possèdent les valeurs les plus négatives obtenues (Figure 120). Les valeurs pour ces échantillons sont très homogènes et suggèrent une période de recharge et/ou une altitude de recharge du captage et des sources alimentant le ruisseau différente(s) de celles des autres points de prélèvements. Les valeurs les moins négatives sont observées au niveau du piézomètre 18 qui se trouve en partie interne de la tourbière du col. Entre ces deux extrêmes se placent les eaux collectées dans les piézomètres de la tourbière de Luitel et de la tourbière du col. Ces données suggèrent que les eaux collectées au sein des tourbières sont d'origine différentes en termes temporel/et ou géographique ; des périodes ou saisons plus chaudes et/ou des recharges à plus basse altitude sont possibles pour les eaux des piézomètres en comparaison avec les eaux des ruisseaux.

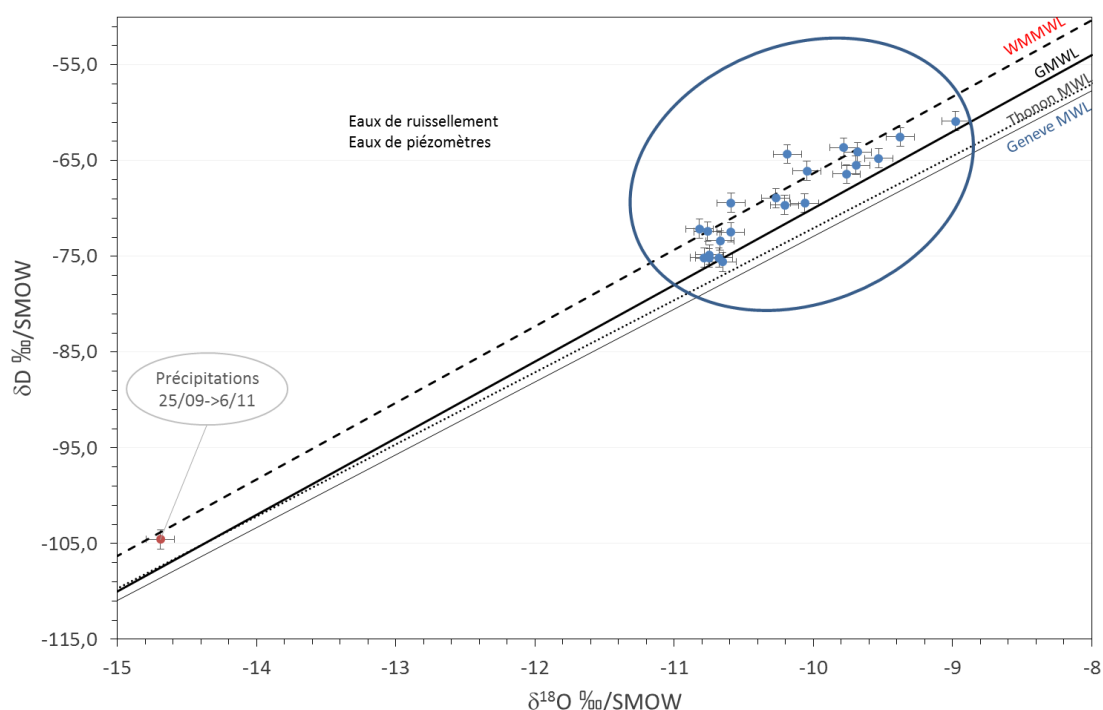


Figure 119 : Diagramme δD vs $\delta^{18}O$ reportant les données acquises sur les eaux collectées sur la zone du Luitel. La droite des eaux météoriques mondiales (WMMWL, trait plein épais noir), les droites des eaux météoriques locales de Thonon (trait pointillés, Thonon MWL, IAEA) et de Genève (, trait plein fin, Genève MWL, Halder et al., 2013), la droite des eaux météoriques de la partie occidentale du bassin méditerranéen (tirets, Celle et al., 2000) sont reportées à titres informatif.

Les regroupements d'échantillons définis au paragraphe traitant des ions majeurs (Partie III – 3.1.4.2. Les ions majeurs, p117) en appui sur les propriétés chimiques des eaux ne se retrouvent pas systématiquement avec les paramètres $\delta^{18}\text{O}$ et δD . Ceci préfigure un système hydrogéologique complexe faisant intervenir probablement des masses d'eau de pluie de périodes différentes, ayant suivi des chemins variés au sein des formations géologiques, des influences variées au niveau des tourbières du secteur et des processus de mélange potentiels.

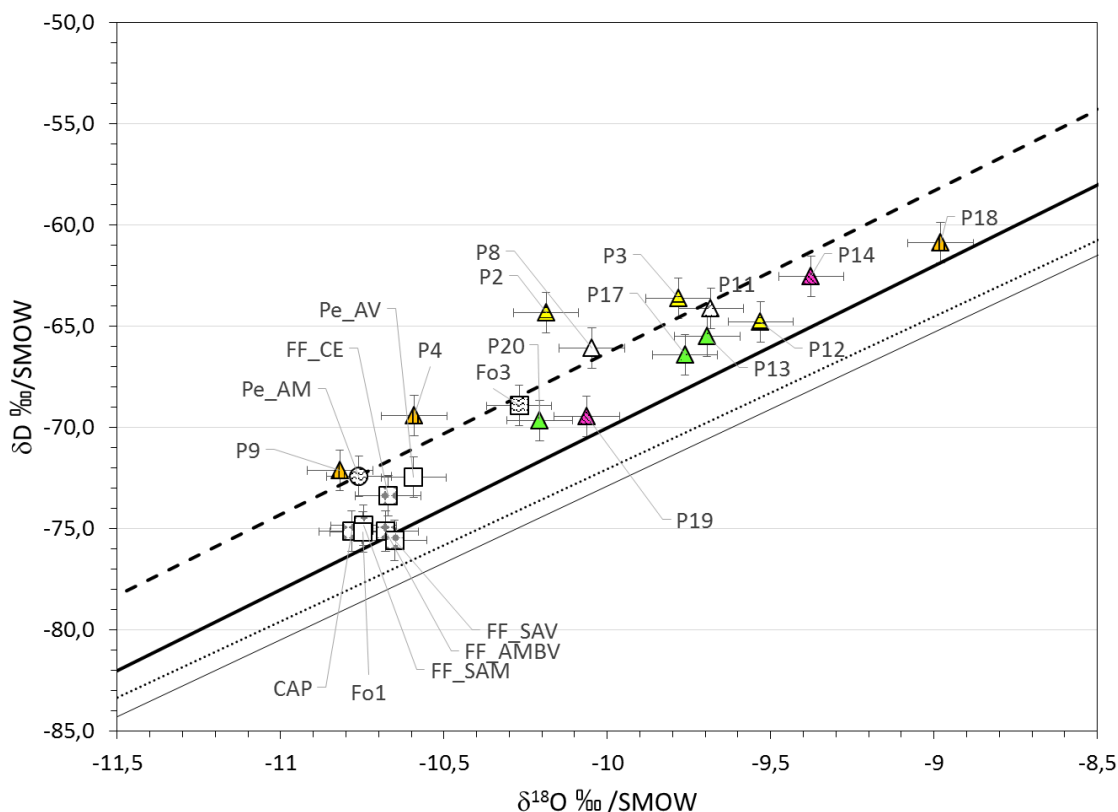


Figure 120 : Diagramme δD et $\delta^{18}\text{O}$ reportant le détail des données obtenues sur les eaux de ruissellement et souterraines du Luitel. Les symboles carrés représentent les cours d'eau, les drains et le captage, les triangles les eaux des piézomètres. Le remplissage des symboles est celui adopté sur la figure 7 définissant des similitudes de faciès chimiques. Pour la signification des libellés de point se reporter à la Figure 113.

3.1.6. Conclusion et perspectives

Le premier jeu de données obtenues sur les eaux du Luitel montre des contrastes géochimiques et isotopiques suggérant un fonctionnement hydrogéologique relativement complexe. Ce jeu de données est cependant insuffisant pour conclure sur l'origine et le chemin des eaux, sur les relations entre la tourbière et les eaux de surface. Des campagnes supplémentaires²³ de prélèvement ainsi qu'un suivi isotopique des eaux de précipitation seront menés en phase 3 du programme. Afin de mieux comprendre la chimie des eaux de ruissellement et des eaux des tourbières, nous étendrons les campagnes suivantes à quelques points de prélèvement d'eau et de reconnaissance géologique sur la partie amont du bassin versant. L'étape suivante de l'étude de la zone de Luitel sera de discuter des périodes/saisons et des zones de recharge des masses d'eau étudiées, pour cela les isotopes stables de l'eau seront à nouveau utilisés et d'autres outils isotopiques (ex : isotopes du strontium) et/ou traceurs élémentaires (éléments traces) seront mis en œuvre. Ces derniers traceurs seront définis après l'étape de reconnaissance géologique à partir du terrain et des données déjà disponibles dans la littérature sur les formations de Chamrousse.

²³ Une campagne de prélèvements en basses-eaux a été effectuée au Luitel les 22 et 23 juillet 2019.

3.2. Tourbière de Frasne

Une campagne de prélèvement d'eau pour analyse géochimique a été effectuée à Frasne les 18 et 19 juillet 2019 en de l'analyse des ions majeurs et des isotopes de l'eau (comme au Luitel). Lors de cette campagne, à l'échelle de la tourbière de Frasne, des eaux ont été prélevées en période de basses-eaux dans 12 piézomètres, 2 fosses à tourbes, 3 fosses d'excavation liées aux travaux de réaménagement, 7 ruisseaux et 1 petit lac. Les analyses sont en cours. Une autre campagne de prélèvement est prévue en 2020.

PARTIE IV

—

Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage

La question du rôle de soutien d'étiage des zones humides aux cours d'eau a été explorée de manière théorique en phase 1 du projet ZHTB. Ce travail a permis de lister une première série d'éléments clefs pour la caractérisation du potentiel de soutien d'étiage des zones humides (Tableau 1 et Tableau 2). La phase 2, quant à elle, nous a permis, à l'aide d'une approche terrain, de réaliser une première quantification du soutien d'étiage sur le site de Luitel.

Les enseignements importants des phases 1 et 2 du projet ZHTB sur la problématique du rôle de soutien d'étiage des zones humides sont les suivants :

- à l'échelle du site, le rôle de soutien d'étiage semble faible voire très faible, tant du point de vue de l'état de l'art que de la quantification réalisée au Luitel. Il semble donc pertinent de s'intéresser à la question, non seulement à l'échelle du site, mais aussi à l'échelle du bassin versant, où l'on peut faire l'hypothèse que le potentiel de soutien d'étiage cumulé des zones humides impliquées sera quantitativement plus important, voire significatif.
- le bilan hydrologique, nécessaire à l'estimation du soutien d'étiage, doit intégrer la zone humide étudiée dans son hydrosystème et tenir compte de la zone contributive (aire d'alimentation).
- le bilan hydrologique doit aussi intégrer la complexité des zones humides dont la fonction hydrologique est très souvent compartimentée en plusieurs réservoirs.

Au terme de la phase 3, il conviendra de construire des indicateurs de potentiel de soutien d'étiage des zones humides. Ils seront fondés : 1) sur les paramètres clefs identifiés dans l'état de l'art ; 2) le retour d'expérience des travaux engagés dans le cadre du projet ZHTB sur les sites de Luitel, Frasne et de la Haute-Vallée de l'Aude et 3) le retour d'expérience de projets conduits en parallèle du projet ZHTB (ex : SoHUMID – Partie II §1.3 Autres projets en lien, p45). Ces indicateurs devront être le plus simples possibles afin d'être facilement mis en œuvre par les gestionnaires des zones humides.

À plus long terme, il serait pertinent d'élargir la question du soutien d'étiage des zones humides à celle de soutien au débit des cours d'eau. Cela impliquera de s'intéresser aux périodes non-estivales du cycle hydrologique.

1. Indicateurs à l'échelle du site

En France, les principales avancées concernant la mise en œuvre d'indicateur du potentiel de soutien d'étiage des zones humides sont issues des travaux de Gayet et al. (2016). Ces travaux²⁴ et ²⁵ visent à élaborer une méthode nationale pour l'évaluation des fonctions des zones humides, dont les fonctions hydrologiques. Cette méthode est fondée sur une série d'indicateurs dont certains sont implémentés sous le logiciel QGIS²⁶.

²⁴ <https://inpn.mnhn.fr/docs-web/docs/download/247392>

²⁵ <http://www.zones-humides.org/guide-de-la-m%C3%A9thode-nationale-d%C3%A9valuation-des-fonctions-des-zones-humides>

²⁶ Voir Guillaume Gayet (UMS PatriNat AFB - CNRS - MNHN) et Antoine Lemot (Cerema Centre-Est)

<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/newsletters/signature/signature-ndeg-67-decembre-2018/extension-qgis-methode-nationale-evaluation-fonctions-zones>

PARTIE IV – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage

	Indicateurs de soutien d'étiage à l'échelle du site (complexe tourbeux)					
	Indicateurs	Unités	Valeurs attendues	Favorable Soutien d'étiage	Défavorable Soutien d'étiage	Remarques
Typologie	Sdage ? Eunis ? autres ?	code		Types à définir ¹	Types à définir	Réduire à une typologie des têtes de bassins
Climat	Pluviométrie	mm	800 à 1200	Importante	Faible	Hors saison estivale
	ETP	mm	500 à 700	Faible ?	Importante ?	Si important : espace disponible dans ZH pour recharge par pluie mais forte perte en eau dans ZH en période de stress hydrique
Hydro-système	Cours d'eau entrant	l/s			À l'étiage ²	Recharge potentielle de la ZH par ESU
	Cours d'eau traversant	l/s				Ralentissement écoulements ESU (sinuosité) - Recharge tourbière ?
	Lien avec eau libre (ex : lac)					Forte évaporation mais stock disponible
	Lien avec eau souterraine	l/s		Recharge ESO	-	Recharge ZH par ESO
	Drains et fossés			Court terme ?	Long terme	Ralentissement ruissellements (pluie) - Recharge ZH ?
	ZH annexes			Présence	Absence	Ralentissement écoulements ESO
Stockage	Surface	m ²	10 à 200 ha	Grande	Faible	-
	Volume	m ³		Grand	Faible	-
	Structure (épaisseur acrotelme)	m	0,1 à 2	Forte	Faible	
	Propriété hydrodynamiques (S) - partie sup. acrotelme	%	0 à 50	Forte	Faible	Si K et pente forts : vidange rapide du stock
	Propriété hydrodynamiques (macroporosité, capacité d'infiltration) - acrotelme	m/s	10 ⁻¹ à 10 ⁻⁴	Forte	Faible	
	Propriété hydrodynamiques (S) - catotelme	%	0 à 30	Forte	Faible	Si K et pente fort, vidange rapide du stock
	Hydrogramme (piézo)	jours	1 à 30	Faibles variations	Fortes variations	Temps de réponse et effet mémoire forts
	Pente du substratum	‰	1 à 10	<5% ?	Forte	Ralentissement écoulements ZH
	Conduits souterrains			Absence	Présence	Accélération écoulements ZH
	Côte de l'exutoire	m NGF				Si haute, ralentissement écoulements ESO ?
Restitution	Exutoire(s) : cours d'eau et/ou nappe	m NGF		Présence	Absence	Détermination du niveau de surverse
	Propriété hydrodynamiques - partie inf. de l'acrotelme	m/s %	10 ⁻¹ à 10 ⁻⁴ 0 à 50	K intermédiaire	Fort	
	Volume (surface/épaisseur) de la zone hydrologiquement dynamique (acrotelme ?)	m ³		Grand	Faible	
	Propriété hydrodynamiques - catotelme	m/s %	10 ⁻⁴ à 10 ⁻⁹ 0 à 30	K intermédiaire	K très faibles	Eau non mobilisable
	Hydrogramme (piézo)	m	0 à 1	Fort battement	Faible battement	
	Côte de l'exutoire (surverse)	m NGF				Si haute, ralentissement écoulements ESO ?
	Pente du substratum	‰	1 à 10	<5‰ ?	Forte ou très faible	
Végétation	Couvert végétal			Fort (Total ²)	Faible	Ralentissement des écoulements ESU (rugosité), mais peu augmenter l'ETP
	Type de végétation			Forêt et fourré ²	Autre ²	
Morphologie	Microtopographie de surface			Faible	Forte	Ralentissement des écoulements ESU, recharge tourbière ?
	Pente de surface	%	0 à 5	Faible	Forte (>5‰)	Ralentissement des écoulements ESU, recharge tourbière ?
	Pente du substratum	‰	1 à 10	<5‰ ?		
...	À compléter...					

Tableau 14 : Exemples d'indicateurs de soutien d'étiages de zones humides à l'échelle du site

¹ : le Forum marais atlantique (2014) propose les types Sdage suivants comme favorable au soutien d'étiage : Plaines alluviales, Zones humides de bas-fond en tête de bassin, Marais et landes humides de plaine et de plateau, Étangs et plans d'eau.

² : source Forum Marais Atlantique (2014)

Toutefois, si les auteurs (Gayet et al., 2016) définissent la notion de soutien d'étiage des cours d'eau par les zones humides comme « *la capacité d'une zone humide à restituer les eaux souterraines retenues dans le sous-sol vers le lit mineur du cours d'eau en période de basses eaux* ». Ils n'ont pour l'instant pas développé d'indicateurs sur cette fonction car « *des difficultés ont été rencontrées pour identifier des paramètres qui documenteraient la réalisation de cette sous-fonction vu les impératifs pour concevoir la méthode*. Barnaud et Fustec (2007) mentionnent que *la capacité de soutien à l'étiage des zones humides est le plus souvent positivement corrélée à la recharge des nappes mais que l'évaluation de ces fonctions est très délicate vu la diversité des systèmes de stockage associés*. Cette sous-fonction n'est donc pas évaluée dans cette version de la méthode ». Une version 2 de ce travail est prévue début 2020. Elle intégrera une série d'indicateurs de soutien d'étiage des zones humides dont nous tiendrons compte dans le projet ZHTB. Le Forum Marais Atlantiques (2014) propose une série réduite d'indicateurs (voir rapport phase 1 du projet ZHTB). Ces indicateurs reposent sur l'idée que : des sorties d'eau doivent se faire de la zone humide vers un cours d'eau, l'écoulement doit être suffisamment ralenti avant le transfert de la zone humide au cours d'eau, la superficie de la zone humide doit être importante.

L'élaboration des indicateurs de potentiel de soutien d'étiage des zones humides à l'échelle du site dans le cadre du projet ZHTB reposera principalement sur les travaux effectués sur les sites de Frasné et Luitel. D'un côté, la tourbière Luitel dispose d'un ratio taille/connaissance très favorable. Les nombreuses données existantes ou en cours d'acquisition et les nombreuses études passées ou en cours en font un site bien connu et bien documenté. La tourbière de Frasné, quant à elle, est bien plus grande. Son ratio taille/connaissance est donc nettement moins favorable (même si les données et travaux sont nombreux).

À partir de ces 2 cas, il pourrait être intéressant et envisageable de proposer une déclinaison d'indicateurs adaptés à différents états de connaissance (données, études) en fonction de la taille du site.

De plus, il serait intéressant que ces indicateurs puissent faire la distinction entre : 1) soutien d'étiage *sensu stricto* (stockage/déstockage de l'eau de pluie contenue dans la tourbière) ; 2) soutien d'étiage au sens large (ralentissement des écoulements souterrains et/ou superficiels).

Pour terminer, étant donné que le potentiel de soutien d'étiage des zones humides est faible voire très faible, il conviendra de s'interroger durant la phase 3 de la pertinence de construire des indicateurs de soutien d'étiage pour les zones humides de tête de bassin versant. Les résultats du projet ZHTB pourraient tout aussi bien être valorisés par la construction d'indicateurs de fonctionnement hydrologique des zones humides de tête de bassin versant.

En attendant, Tableau 14 propose, à titre d'exemple, une série d'indicateurs de soutien d'étiage envisageables. Ce tableau intègre des éléments des travaux réalisés par Gayet et al. (2016) et Forum Marais Atlantiques (2014). Ce tableau reste bien sûr à compléter.

De prime abord, ce tableau montre que le nombre d'indicateurs de soutien d'étiage potentiel est relativement grand. L'enjeu pour la phase 3 va consister à : 1) hiérarchiser l'importance de ces indicateurs ; 2) quantifier leur importance. Il s'agira aussi de déterminer s'il existe des indicateurs antagonistes : 1) selon que l'on s'intéresse au stockage ou à la restitution ; 2) en fonction de l'espace et du temps.

Ce premier travail permet de brosser à grands traits les caractéristiques de la tourbière de tête de bassin versant idéale pour le soutien d'étiage ; c'est-à-dire une tourbière principalement alimentée par de l'eau de pluie, en capacité de stocker cette eau et de la restituer à un exutoire (de préférence unique) à moyen terme (1 à 3 mois) :

- 1) pas d'apport souterrain, pas de cours d'eau entrant mais un exutoire clairement identifié ;
- 2) pluviométrie abondante et faible ETP ;
- 3) grand volume de tourbière au-dessus de la cote de l'exutoire (zone hydrologiquement active) ;
- 4) conductivité hydraulique intermédiaire dans la zone hydrologiquement active associée à une faible pente du substratum et forte porosité efficace ;
- 5) conductivité hydraulique forte en surface pour faciliter l'infiltration de la pluie ;

PARTIE IV – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage

- 6) très faible pente de surface et présence de végétation susceptible de ralentir le ruissellement ;
- 7) présence de milieux humides annexes en connexion avec la tourbière

La caractérisation de la tourbière idéale pour le soutien d'étiage pourrait faire l'objet d'un problème d'optimisation et de modélisation visant à déterminer les combinaisons de critères la plus intéressantes et donc, les types de tourbières, les plus favorables au soutien d'étiage. Un jeu d'abaques sur les paramètres clefs pourrait permettre de cerner les valeurs de ces critères. Au final, il conviendrait de déterminer si, au vue des paramètres clefs et des valeurs associées, les types déterminés existent réellement ou si la tourbière idéale est purement théorique.

2. Indicateurs à l'échelle du bassin versant

Au départ, dans le projet ZHTB, il était prévu d'envisager la question du soutien d'étiage des zones humides à l'échelle du site. Toutefois, les premiers résultats montrent que ce potentiel est faible voire très faible. Il semble donc pertinent de s'intéresser à cette problématique à une autre échelle : celle du bassin versant et du réseau de zones humides. Ce chapitre présente donc : 1) la mise œuvre d'un dispositif visant à quantifier le soutien d'étiage des zones humides à l'échelle d'un bassin versant de la haute-vallée de l'Aude ; 2) une réflexion sur le développement d'indicateurs du potentiel de soutien d'étiage des zones humides à l'échelle du bassin versant qui sera développée en phase 3 du projet ZHTB.

2.1. Zones humides du haut bassin-versant de l'Aude

Ce projet financé par l'accord cadre AE-RMC/ONF et le CD Aude est complémentaire au projet ZHTB. Il vise à appréhender la question du soutien d'étiage des zones humides et leur rôle de régulation des crues à l'échelle du bassin versant. Le projet ZHTB quant à lui travaille à l'échelle du site. Un tel changement d'échelle (passage du site au bassin versant) est possible si l'on peut étudier de manière comparée la réponse hydrologique de bassins versants présentant : 1) de nombreuses zones humides ; 2) peu ou pas de zones humides.

Les éléments présentés ci-après sont issus du rapport phase 2 de ce projet (ONF, 2019)²⁷. Ce projet est planifié en 3 phases :

- Phase 1 : Caractérisation et présélection des sites à instrumenter (2017-2018)
- Phase 2 : Opérationnalisation de l'instrumentation (2018-2019)
- Phase 3 : Analyse – interprétation – valorisation de données issues des instruments (2019-2021)

Le travail conduit en phase 1 a permis de sélectionner les sites à instrumenter. Ces sites sont situés dans le massif du Madrès. Ce massif montagneux, sous influence méditerranéenne, est situé dans la haute vallée de l'Aude (1600 à 2469m). Son bassin versant est d'une superficie d'environ 1000 Ha. Il repose sur un socle granitique dit « pluton de Quérigut ». Il s'agit d'un massif très boisé (sapins, hêtres).

Sur ce massif, les zones humides, principalement de type soligène/minérotrophes, sont nombreuses. Ces tourbières de pentes sont de taille restreintes (< 3-4 ha), mais leur surface cumulée est importante.

L'instrumentation (piézomètres, station météo, seuils jaugés), dont la mise place a été terminée en juillet 2019, a pour objectifs :

- la réalisation des bilans hydrologiques à différentes échelles (bassin versant, sous bassins versants, zones humides) ;
- l'étude du phasage/déphasage amont-aval du signal de pluie sur les niveaux piézométriques dans les zones humides et les débits aux exutoires.

Le dispositif mis en œuvre et les données en cours d'acquisition devraient permettre d'apporter un éclairage intéressant concernant la capacité potentiel des bassins-versants étudiés à retarder la transmission du signal de pluie vers les exutoires, autrement dit à mieux caractériser :

- la capacité des zones humides du haut bassin-versant de l'Aude à différer le transfert du signal de pluie de l'amont vers l'aval (exutoire) tant à l'étiage que lors de forts épisodes pluvieux ;

²⁷ ONF (2019) Étude du fonctionnement hydrologique des zones humides de tête de bassin versant de l'Aude, rapport phase 2, 109p.

PARTIE IV – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage

- le rôle des eaux stockées et circulant dans l'arène granitique dans l'alimentation des zones humides et dans le soutien d'étiage.

Pour ce faire, deux couples de petits bassins versants ont été instrumentés (bassins du Pountarrou et du Pinata), chaque couple associant un sous-bassin avec une forte densité de zones humides et un autre avec une faible densité de zones humides (Tableau 15).

		Surface (ha)	Ratio surface (BV/ZH)	Dénivelée (altitudes max. et min.)	Gradient topographique (m)
Couple 1 : Bassin du Pountarrou	Bassin instrumenté	179	27,2	1888 - 1592	296
	Bassin « témoin »	50	2,1	1887 - 1714	173
Couple 2 Bassin du Pinata	Bassin instrumenté	180	20,1	1863 - 1467	396
	Bassin « témoin »	35	8,5	1831 - 1445	386

Tableau 15 : Caractéristiques des 2 couples de bassins versants

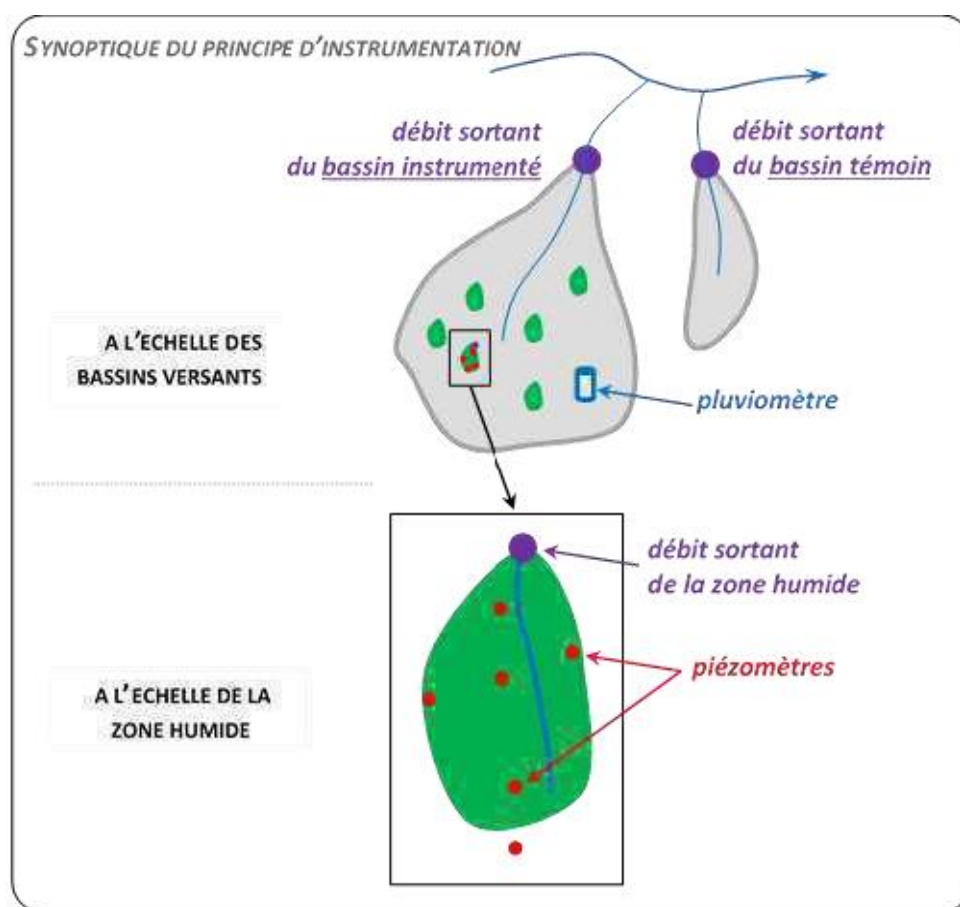


Figure 121 : Principe de l'instrumentation du bassin du Madrès

Le dispositif mis en œuvre repose sur les principes suivants (Figure 121 et Figure 122) :

- les 2 bassins « témoins » sont uniquement équipés d'une station de jaugeage (de type H-Flume) à l'aval permettant de quantifier les débits à l'exutoire. Ces données permettront de caractériser le comportement hydrologique de bassins versants peu pourvus en zones humides ;
- le bassin instrumenté du Pinata est équipé d'une station de jaugeage à l'aval et de piézomètres disposés dans les zones humides de l'amont vers l'aval. Ces données permettront de caractériser le comportement hydrologique d'un bassin versant où de nombreuses zones humides sont présentes et de statuer sur les temps de transfert du signal de pluie vers l'exutoire ;
- le bassin instrumenté du Pountarrou est lui aussi équipé d'une station de jaugeage à l'exutoire et de piézomètres dans les zones humides. Cette fois, au lieu d'implanter des piézomètres dans de nombreuses zones humides, comme c'est le cas pour le bassin du Pinata, le choix a été fait de

mieux instrumenter un nombre restreints de zones humides à l'aide de piézomètres et de stations de jaugeage. Ces données permettront non seulement de caractériser le comportement hydrologique d'un bassin versant mais aussi celui de zones humides.

- le bassin du Madrès est équipé d'une station de jaugeage à l'exutoire qui collecte les eaux des 2 couples étudiés, ainsi que des autres sous-bassins non équipés.

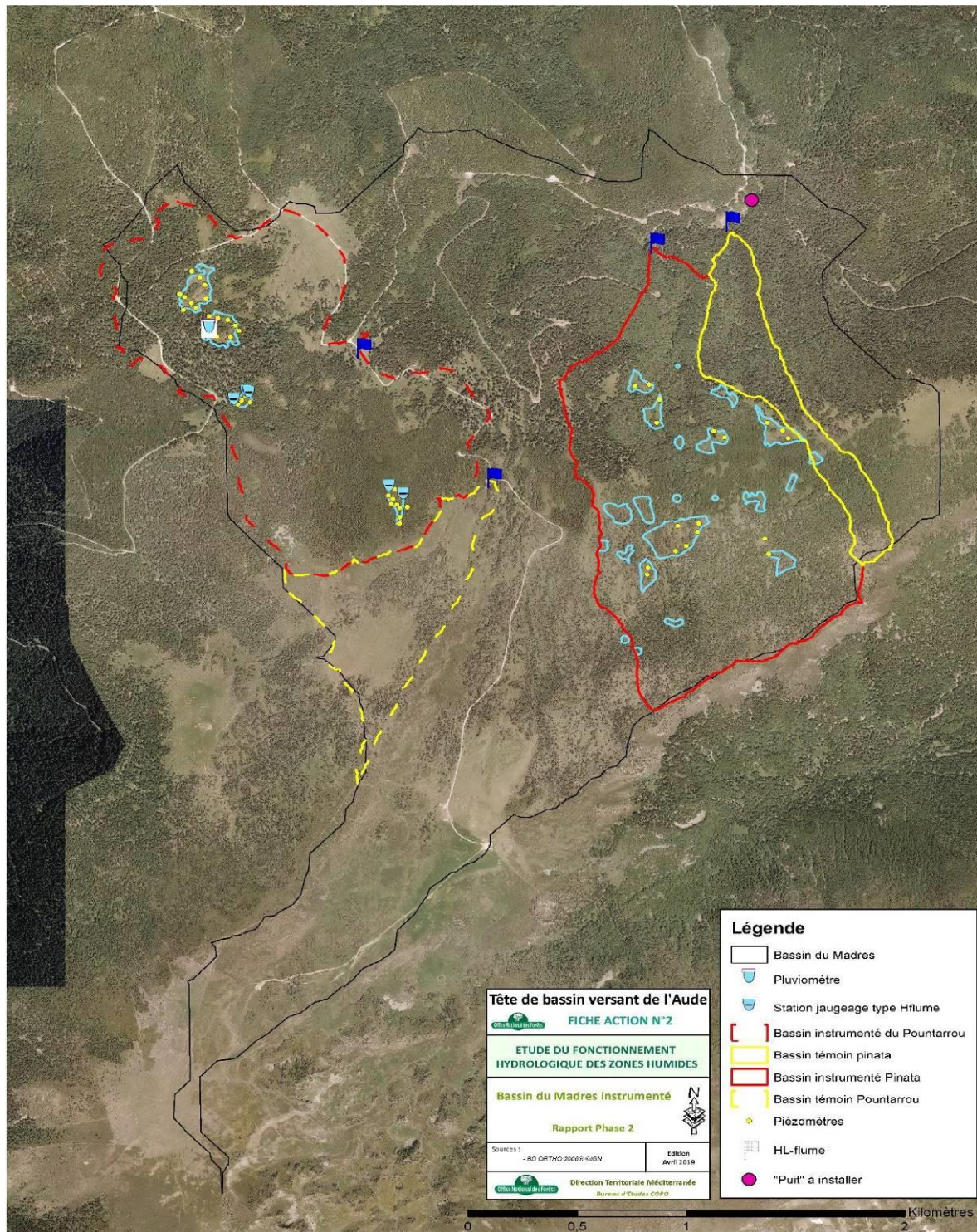


Figure 122 : Instrumentation du bassin du Madrès

L'instrumentation des 2 couples de bassins versant étant terminée depuis juillet 2019, l'acquisition de données est en cours. Une base donnée est en cours de construction par l'ONF. Un stage de master (ONF-Mines Saint-Etienne, Mines Alès) est prévu en 2020 pour un premier travail d'analyse statistique.

À terme, quand nous disposerons de plusieurs cycles hydrologiques (4 ou 5) des travaux de modélisation seront envisageables.

Ce site d'étude, du fait des nombreuses données disponibles et en cours d'acquisition, semble être un site très intéressant pour le développement d'indicateurs du potentiels de soutien d'étiage des zones humides à l'échelle du bassin versant (voir Partie IV - §2.2 Volet géomatique : indicateurs du potentiel de soutien d'étiage des zones humides à l'échelle du bassin versant, p134). De plus, si les résultats quantifiés du rôle de soutien d'étiage comparé pour les couples de bassin versant étudiés sont significatifs, il sera dès lors envisageable de développer une méthodologie de validation des indicateurs dont il serait intéressant d'envisager la transposabilité à d'autres sites (ex : Tourbière de Montselgues, Marais de vaux, Tourbière de Praubert...).

2.2.Volet géomatique : indicateurs du potentiel de soutien d'étiage des zones humides à l'échelle du bassin versant

Ce volet propose la recherche d'indicateurs du potentiel de soutien d'étiage, non plus à l'échelle du site, mais à l'échelle du bassin versant. Un tel changement d'échelle permettra de démarrer une réflexion sur la contribution collective des zones humides d'un bassin versant au soutien d'étiage et sur l'effet de perturbations potentielles. Ce type d'approche, compte-tenu de l'échelle de travail, est contraint par les données existantes (ex : inventaire des ZH).

Cette approche sera développée en phase 3 du projet ZHTB par un post-doc (UMR 5600 EVS Isthme – UJM). La démarche proposée repose sur l'expérience de l'équipe Isthme dans le développement de méthodologies d'analyses spatiales multi-critères, notamment une démarche méthodologique appliquée à la « Cartographie des zones humides à partir d'une approche topo-climatique »²⁸.

Pour le volet géomatique de la phase 3 du projet ZHTB, il ne s'agira plus de localiser les zones à potentialité humide, mais de mettre en place une typologie des zones humides indiquant un potentiel de soutien d'étiage. En amont, il est nécessaire :

- **d'identifier les variables environnementales qui pourraient influencer sur ce potentiel**

Ces variables environnementales devront être documentées par des données disponibles à l'échelle de bassin versant. À titre d'exemple, il pourra s'agir : des pentes, de la géomorphologie sous couverture, du couvert végétal, de variables décrivant les zones humides (type, surface, épaisseur...), pluviométrie, localisation des ZH sur le BV, organisation du réseau de ZH sur le BV, proximité d'un cours d'eau, ... (Tableau 16).

- **de mettre en place une classification des ZH sur la base de ces variables**

Ce type de classification ne reposera pas forcément sur des méthodes d'analyse multicritère. L'opportunité de mobiliser des méthodes d'apprentissage machine sera étudiée (ex : Librairie OpenCV, Artificial Neural Network Classification, Decision Tree Classification, Random Forest Classification, Support Vector Machine Classification...).

Dès est présent, il semble que le haut bassin de la vallée de l'Aude est un site très prometteur pour ce type d'expérimentation. À terme, il sera intéressant d'étudier les conditions de transfert de la méthodologie mise en œuvre sur ce site :

- au bassin versant de la réserve de Luitel (BV forestier à pente moyenne) ;
- au complexe tourbeux du plateau de Frasné ;
- ou encore aux bassins versants des tourbières de Montselgues (Ardèche), de Vaux (Ain) ou de Praubert (Haute-Savoie).

²⁸ <https://www.youtube.com/watch?v=E7kzBuaipxc>

La vidéo de ce lien présente la dernière version de la méthodologie [novembre 2018, "semaine de REV" (REVue de projets scientifiques et techniques au service de la gestion intégrée du bassin de la Loire et ses affluents) organisée par l'EP Loire].

Indicateurs de soutien d'étiage à l'échelle du bassin versant (complexes tourbeux)	
Typologie	Indicateurs
Climat	Pluviométrie ETP
Stockage	Géométrie : surface / volume Structure du sol : couches, interfaces Propriété hydrodynamiques du sol : S, K Côte de l'exutoire (surverse) Alimentation (eso / esu) Hydrogramme (piézomètres)
Restitution	Présence d'un ou plusieurs exutoires Hydrogramme (cours d'eau)
Zones humides (à l'échelle du BV)	Type de zones humides Nombre Ratio : surface BV / surface ZH Localisation des ZH sur le BV Organisation du réseau de ZH
Hydrologie	Proximité d'un cours d'eau Régime du cours d'eau Coefficient de ruissellement Temps de concentration Surface active Coefficient d'interception Forme du bassin versant Temps de réponse ...
Géologie	Géomorphologie sous couverture Type de substratum Pente du substratum
Autres	Pentes Couvert végétal
À compléter...	

Tableau 16 : Exemples d'indicateurs de soutien d'étiages de zones humides à l'échelle du bassin versant



Figure 123 : Lac tourbière de Luitel (décembre 2016)



Figure 124 : Tourbière vivante de Frasne (mars 2017)

CONCLUSION

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

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

1. Bilan du travail de la phase 2

1.1. Avancement et taux de réalisation

La plupart des tâches prévues dans la phase 2 ont été réalisées ou démarrées (Tableau 17). Elles seront terminées pour certaines en phase 3.

Tâches	Taux de réalisation	Remarques
Compléments bibliographiques (ETP, réseaux de neurones)	100%	-
Instrumentation des sites (Luitel et Frasne)	100%	-
Partage de données (Luitel et Frasne)	100%	-
Volet hydrologie	75%	Frasne en cours (modélisation RN et analyses statistiques)
Volet géophysique	50%	Frasne en cours (septembre 2019)
Volet pédologie	100%	-
Volet géochimie	50%	Frasne et Luitel (dernières campagnes à planifier 2020)
Première réflexion sur les indicateurs	100%	-
Livrables		
Rapport phase 1	100%	-
Rapport phase 2	100%	
Document de valorisation du travail bibliographique	0%	Fiche Zabir phase 2
MetaZabir	100%	

Tableau 17 : Taux de réalisation des tâches de la phase 1

Le projet ZHTB a été présenté à l'occasion de 3 communications orales :

- Journée eau et connaissance – Des savoirs et des outils nouveaux pour mieux gérer les eaux souterraines, AE-RMC, Lyon, décembre 2018.
- Semaine REV – Connaissance des ressources en eaux souterraines, EPL, Orléans, septembre 2019.
- Journée technique – Zones humides et changements globaux, Réseau des 'acteurs de l'eau en montagne, Asters, novembre 2019.

1.2. Bilan : volet hydrologique

1.2.1. Analyse statistiques des données hydrologiques (Luitel)

Ce travail d'analyse des données hydrologiques consiste à décrire les séries chronologiques disponibles, d'en identifier les composantes et de chercher ensuite à les mettre en relation avec les mécanismes de fonctionnement d'un système hydrologique. Les principales étapes appliquées en vue de l'analyse statistique des données sont les suivantes : 1) organisation des données (filtrage, complétion), 2) analyses simples ; 3) analyses croisées.

L'objectif général de l'analyse statistique est d'étudier l'ensemble des données avec les différentes méthodes statistiques à disposition afin de :

- Caractériser le comportement hydrologique général du site ;
- Révéler, si possible, des comportements spécifiques au site et non visibles en première approche ;
- Préparer les modélisations statistiques par réseaux de neurones (sélection des cibles de modélisation, sélection de variables)

L'analyse simple des données permet de mettre en avant les résultats suivants :

- Pluie – pas de corrélation entre les épisodes pluvieux, ni à court terme, ni à long terme (périodicité annuelle)
- Fontfroide (FF1) – système intégrateur (le signal de débit correspond à une intégration des moyennes et hautes fréquences du signal de pluie, l'effet mémoire est de 28 jours, il s'agit d'un système inertiel avec une périodicité annuelle)
- Piézomètre station météo (P20) – système intégrateur avec un effet mémoire de 143 jours et une périodicité annuelle
- ETP – effet mémoire de 67 jours et cyclicité annuelle

L'analyse croisée des données permet de mettre en avant les résultats suivants :

- Pluie/débits (FF1) – le temps de réponse est de 1 jour et l'effet mémoire de 12 jours. La tourbière de Luitel semble jouer un rôle de filtrage des entrées sur 21 jours. La réponse du système à une impulsion en entrée va être atténuée et répartie sur plus de 21 jours. Des ruptures correspondant aux périodes suivantes (346, 140, 90, 40, 21, 12 jours) ont été repérées. Il s'agit de transitions d'un comportement du système vers un autre.
- Pluie/piézomètres station météo (P20) – les pluies sont faiblement corrélées aux niveaux de ce piézomètre, le temps de réponse de est 1 jour et l'effet mémoire de 3 jours.

L'analyse du fonctionnement du système permet de proposer les éléments suivants :

- Débits et étiage (FF1) – l'analyse a permis de discriminer 4 fonctionnements différents du système hydrologique : 1) gros débits (débits supérieurs à Q₅) ; 2) majorité des débits (2 comportements pour des débits entre Q₅ et Q₉₀) ; 3) faibles débits (débits inférieurs à Q₉₀). Le Q₉₀ est défini comme le débit d'étiage (0.36 l.s⁻¹). Cette analyse met aussi en évidence une faible variation au cours de l'année du temps de réponse (1 jour) et une légère variation de l'effet mémoire (de 3 à 6 jours). Les précipitations printanières (les plus abondantes) sont plus rapidement assimilées que sur les autres périodes.
- Coefficient d'écoulement – la restitution de la pluie est plus grande et plus variable (mars à mai 2018) par le ruisseau de Fontfroide (FF1) que par le ruisseau du Lac. Ceci pourrait indiquer une restitution différée de la tourbière, en lien avec une très forte saturation. Durant les périodes d'étiages (été-automne), le coefficient d'écoulement de Fontfroide (FF1) diminue mais reste élevé (>0,50) contrairement au ruisseau du lac. Cette différence pourrait avoir comme cause un soutien d'étiage estival et automnal de la tourbière au ruisseau de Fontfroide.

- Nappe d'eau souterraine de la tourbière – l'effet mémoire est variable selon les piézomètres (de 39 jours au P17 à 86 jours pour P20, 77 jours pour le P14). Les plus petits temps de mémoires sont calculés pour les piézomètres situés près des fossés de drainage. Pour la relation pluie-hauteur piézométrique, les temps de réponse sont quasi-immédiats (1 jour), les effets mémoires sont similaires (~13 jours).
- Ruisseau de Fontfroide (comparaison amont aval) – la traversée de la tourbière contribue à une déminéralisation du cours d'eau. Le débit reste le plus élevé en amont. Sur certaines courtes périodes, il peut y avoir des inversions (plus de conductivité en aval, plus de débits en aval).
- Ruisseau du lac (RDL)/ruisseau de Fontfroide (FF1) – les différences entre données de débits, température et conductivités des deux cours d'eau peuvent être vraisemblablement attribuées à la traversée de la tourbière. Les deux cours d'eau ont le même temps de réponse (1 jour) et le même effet mémoire (12 jours). Toutefois, si l'analyse est saisonnalisée, il apparaît que l'effet mémoire (Pluie-débits RDL) chute drastiquement à 1 jour pendant le printemps (contre 3 pour le ruisseau de Fontfroide). Ainsi, la tourbière réagit plus lentement aux pluies printanières.

L'analyse statistique a aussi permis de mettre en avant un certain nombre de problèmes :

- détection d'anomalies sur les hauteurs d'eau du P20 ;
- difficultés à prendre en compte les précipitations sous forme de neige ;
- incertitude sur l'ETP ;
- écarts entre les données fournies par les sondes aval (FF1 et RDL : marques différentes) du ruisseau de Fontfroide (problème de calibration ?) ;
- incertitude sur la courbe de tarage (FF1) ;
- sonde aval de Fontfroide (FFAv) hors d'eau sur certaines périodes.

1.2.2. Modèles réservoirs (Luitel)

Ce premier travail de modélisation fondé sur un modèle conceptuel du bilan hydrologique de la tourbière de Luitel a permis une première quantification du potentiel de soutien d'été de la tourbière du Col lors de 3 cycle hydrologiques (3 étages). Au final, la valeur de débit de soutien d'été journalière maximale est de 0,38 l/s. Le débit moyen du soutien d'été des périodes d'été est compris entre 0,21 à 0,06 l/s. Pour les débits dans ces gammes de valeurs (inférieurs à 0,51/s), nous nous trouvons aux limites par rapport à la qualité des mesures réalisées au niveau des seuils jaugés.

Cela souligne la faible importance de l'apport de la tourbière au débit du cours d'eau en période sèche. Toutefois, il s'agit d'un petit « réservoir » puisque que l'emprise de la tourbière du Col est de l'ordre de 10 ha.

Au-delà de l'aspect quantitatif, ce travail a permis l'identification des principaux paramètres conditionnant le fonctionnement hydrologique de la tourbière du Col du Luitel, et notamment de conceptualiser son fonctionnement à partir de 3 réservoirs distincts.

Ce travail est bien évidemment perfectible :

- Sur un plan conceptuel, le modèle pourrait être amélioré. Il serait intéressant par exemple de composer chaque réservoir en deux sous-réservoirs : 1) d'intégrer un « réservoir d'eau utile » où l'ETP serait puisée (type « réserve utile » - RU) ; 2) un « réservoir d'eau libre » où les écoulements auraient lieu.
- Sur l'aspect bilan hydrologique et paramétrage les améliorations passent par : 1) une meilleure connaissance des paramètres hydrodynamiques et la géométrie des réservoirs (voire du phénomène de « respiration » de la tourbière) ; 2) une meilleure prise en compte de l'ETP en fonction de la couverture végétale ; 3) l'intégration au bilan des pertes et des apports souterrains.

Conclusion

À terme, lorsque ces informations seront disponibles, ce qui devrait être le cas pour la tourbière du Luitel dans le cadre de l'avancement des tâches des volets géophysique, pédologie et géochimie, il sera alors possible d'améliorer ce modèle et éventuellement de travailler sur des scénarios fondés sur des simulations de changement climatique (ex : diminution des précipitations en été et augmentation l'hiver, augmentation de l'ETP...).

1.2.3. Réseaux de neurones (Luitel)

Quand le fonctionnement d'un système hydrologique ne peut pas être décrit de façon explicite parce qu'il est trop complexe ou trop incertain, l'approche de modélisation statistique par réseaux de neurones présente l'avantage de ne pas faire d'hypothèse sur ce fonctionnement en proposant de relier entrées et sorties du système de la meilleure manière possible sur cette base. Cette approche bien semble adaptée aux complexes tourbeux pour lesquels la réalisation d'un bilan hydrologique est difficile. L'objectif du travail de modélisation par réseau de neurones entrepris au Luitel vise dans un premier temps à modéliser et simuler le débit du ruisseau de Fontfroide et du piézomètre 3 (P3). Les données utilisées pour ce travail sont les suivantes : 1) précipitations hybrides ; 2) évapotranspiration et évapotranspiration virtuelle ; 3) débits observés de Fontfroide (sonde IGE/ONF) ; 4) piézomètres (P3, P13, P14). La phase d'apprentissage du modèle couvre la période août 2014-décembre 2017 et la période test l'année 2018.

Les résultats obtenus pour la modélisation du débit de Fontfroide (débit journalier) sont de qualité moyenne mais sont riches d'enseignements :

- Le modèle reproduit en phase les pics de crues dans des proportions correctes, et simule bien les récessions de débits.
- Certaines périodes de hautes eaux, notamment avec la fonte de neige, sont mal simulées par le modèle
- Des débits négatifs sont simulés par le modèle, généralement après une certaine période de basses eaux. Ce dernier point montre qu'après une période d'évapotranspiration suffisamment longue, l'évapotranspiration potentielle que le modèle utilise ne saurait être convertie par le système hydrologique en évapotranspiration réelle, faute d'eau disponible. Ainsi, le modèle, par ce comportement a priori aberrant, indiquerait une période de stress particulièrement importante pour le système.

Ces conclusions partielles font actuellement l'objet de nouvelles analyses et de nouvelles modélisations afin de déterminer plus précisément quelles sont leur capacité à prévoir le soutien d'étiage.

Les résultats obtenus pour la modélisation du piézomètre 3 (P3) sont satisfaisants et montrent que le modèle reproduit avec précision les niveaux du piézomètre P3, notamment les récessions de niveaux piézométriques. Cependant, nous pouvons noter des périodes où le modèle a du mal à simuler les variations de débits. Comme pour les débits, les fontes sont souvent sous-estimées alors qu'en revanche, les étiages sont plutôt surestimés.

Il est difficile d'établir un parallèle entre les deux types de simulations (débit et hauteurs d'eau) mais on peut déjà noter que la reproduction des hauteurs est meilleure.

Pour la phase 3 du projet, les perspectives sont les suivantes :

- Poursuivre l'optimisation de la modélisation afin d'obtenir de nouvelles informations sur le fonctionnement du système ;
- Tenter de nouveaux traitements du piézomètre de la station météorologique, pour pouvoir bénéficier de 10 ans de données exploitables (un modèle statistique doit, a priori, s'améliorer avec une augmentation de la population qui est utilisée pour le construire) ;

- Changer le découpage de la base de données pour un découpage trimestriel basé sur le régime moyen sur 10 ans.

Un travail similaire est engagé parallèlement sur la tourbière de Frasne.

1.2.4. Éléments complémentaires concernant le volet hydrologique

Pour ajuster ce bilan hydrologique il pourrait être nécessaire :

- de prendre en compte le point de flétrissement de la tourbe pour ajuster l'ETP. Le point de flétrissement des sols tourbeux et de la tourbe varie entre 35 et 50% (taux d'humidité). À titre de comparaison, le point de flétrissement est estimé à 5% dans le sable, 12% dans les limons et 27% dans l'argile ;
- de prendre en compte la structuration des pluies et l'humidité antérieure du système au moment des précipitations ;
- de prendre en compte les impacts des activités humaines passées (notamment fossés de drainage, exploitation de tourbes, pâturage, incendies...) et actuelles (notamment restauration hydraulique) ;
- de prendre en compte le type de végétation présente (le comportement des zones à sphaignes est différent des zones sans sphaigne ;
- de s'intéresser à la contribution des zones périphériques des tourbières ;
- de connaître spatialement l'épaisseur maximale de la zone non-saturée ;
- de préciser le ruissellement du BV de Luitel (actuellement coefficient issue de la littérature).

1.3. Bilan : Volet géophysique (Luitel et Frasne)

Ce volet est étroitement lié avec le volet pédologie (Conclusion - §Bilan : volet pédologique (Luitel) – articulation avec le volet géophysique, p144). Les travaux engagés sur le volet géophysique ont permis de valider la méthode sur les 2 sites du projet ZHTB.

L'ensemble des profils a été acquis sur le site de Luitel. L'existence de travaux antérieurs et la petite taille du site devrait nous permettre à terme (phase 3) de disposer : 1) d'une géométrie 3D précise de la cuvette glaciaire sur laquelle repose la tourbière (notamment interface tourbière/versant) ; 2) d'une bonne idée de la structure interne de la tourbière (notamment interface acrotelme/catotelme).

Sur le site de Frasne, seuls des profils test ont pour l'instant été acquis. De nouvelles campagnes géophysiques sont prévues sur Frasne pour automne/hiver 2019/2020. L'absence de données existantes et la grandeur du site ne nous permettront sans doute pas d'obtenir le même niveau de précision qu'au Luitel. À Frasne, l'objectif premier vise à mieux connaître les limites et la géométrie de la tourbière (principales interfaces : tourbière/moraine voire tourbière/calcaire). Cette interprétation sera validée par des sondages à la perche. Si les données le permettent, une interprétation de la structure interne sera réalisée. Toutefois, il n'est pas prévu de volet pédologique sur ce site pour valider et calibrer les profils géophysiques.

Sur les 2 sites, les données acquises et les premiers résultats concernant la morphologie et la géométrie des tourbières sont prometteurs. L'articulation avec le volet pédologie sera prépondérante sur le Luitel

D'un point de vue méthodologique, ces deux sites présentent l'intérêt de proposer 2 configurations différentes :

- 1) au Luitel petite surface et bonnes connaissances escomptées (géométrie + interfaces) ;
- 2) à Frasne grande surface et connaissances lacunaires.

En termes de transfert de connaissance, ces 2 configurations permettront de proposer 2 méthodes pour la quantification du soutien d'étiage des tourbières.

1.4. Bilan : volet pédologique (Luitel) – articulation avec le volet géophysique

Les investigations menées sur la tourbière de Luitel dans le cadre du volet pédologique ont permis d'avoir une meilleure connaissance de la stratigraphie de la tourbière dans l'acrotelme (sur le premier mètre environ). Les analyses conduites sur les carottes (susceptibilité magnétique, taux de fibre, teneur en matière organique, granulométrie, densité) ont permis de mieux connaître la nature de la tourbe et des milieux paratourbeux, et de se faire une première idée de leurs propriétés hydrodynamiques (porosité totale, porosité efficace, conductivité hydraulique).

Le croisement de ces données avec la couverture végétale a permis une première spatialisation des hétérogénéités verticales des sols sur les 50 premiers centimètres à l'échelle de la tourbière. Les grands types identifiés sont les suivants :

- en surface, les strates affleurantes sont principalement composées de tourbe fibrique (conductivité hydraulique : 10^{-1} m/s ; porosité efficace : 30%) ;
- dans la majeure partie des secteurs (pinède à sphaigne, prairie à molinie) des « horizons assainis » plus fortement minéralisés (ou KTH – effet du piétinement et du drainage) sont présents dès 15 à 30 cm de profondeur (au-dessus de ces horizons minéralisés on note une reprise de la turfigenèse) ;
- à cette profondeur, sur les autres secteurs on observe des tourbes fibriques, des tourbes humifiées (conductivité hydraulique : 10^{-5} m/s ; porosité efficace de 10 à 15 % pour des tourbes sapriques à mésiques) ;
- à 50 cm de profondeur, la vaste zone dans la pinède au sud et la zone nord montrent des tourbes présentant de bonnes potentialités de stockage théorique de l'eau (faible densité apparente, forte porosité et humidité).

Au final, le volet pédologique met en avant 3 gros secteurs contribuant potentiellement au soutien d'étiage (Pinède nord, pinède à sphaignes, prébois de pins à crochets). Toutefois, les zones périphériques, même si elles semblent moins propices au stockage d'eau, jouent un rôle dans le fonctionnement de l'hydro-complexe et les transferts d'eau. Leur rôle semble notamment important pour la réception des eaux de ruissellements issus des versants.

Lors de la phase 2 du projet, sur la tourbière de Luitel, les données pédologiques et géophysiques ont fait l'objet d'un premier essai d'interprétation croisée qui semble prometteur. Ce travail se poursuivra en phase 3 pour bien mieux cerner spatialement la géométrie 3D et les interfaces. Les tâches prévues sont les suivantes :

- traitement de l'ensemble des profils géophysique de 2018 ;
- calage les profils 2007 avec ceux de 2018 pour obtenir une géométrie 3D fiable et améliorer la caractérisation des limites de la tourbière ;
- sondages et carottages complémentaires, puis analyse dont détermination des propriétés hydrodynamiques, pour préciser la sectorisation spatiale ;
- couplages (calibration/validation) des sondages et des carottages pédologiques (déjà réalisés en 2018 et ceux prévus en 2019) aux profils GPR afin de proposer une structure caractérisée pour une meilleure compréhension de l'hydrologie du système ;
- représentation 3D de la structure interne de la tourbière du col

En parallèle, l'analyse d'une grande carotte (6 m environ de la surface au gyttja) déjà prélevée en 2018 est prévue. Les analyses porteront sur les macrorestes, les pollens, le carbone total et le C¹⁴. L'analyse de cette carotte devrait permettre de reconstituer l'histoire (notamment hydrologique) de la partie sud de la tourbière du Col. Deux carottes d'une dizaine de mètres ont déjà été prélevées dans le cadre d'études antérieures dans la zone nord de la tourbière du Col et dans le lac.

À terme, l'articulation des ces 2 volets (pédologique et géophysique) devrait permettre de préciser le bilan hydrologique (au moins au Luitel) en :

- intégrant la question du point de flétrissement / ETP ;
- spatialisant les propriétés hydrodynamiques du complexe tourbeux, incluant les zones périphériques ;
- délimitant des zones contributrices au soutien d'étiage et aux transferts d'eau.

À terme, si la géométrie de la tourbière de Luitel est bien connue, cela devrait donc améliorer grandement le modèle réservoir existant. Nous pourrions alors grandement améliorer la connaissance du réservoir du Luitel : 1) essai de spatialisation des propriétés hydrodynamiques ; 2) meilleure estimation des volumes de tourbes, d'eau libre et d'eau liée ; 3) niveaux d'écoulements d'eau préférentiels...

De plus, il serait dès lors possible d'envisager une modélisation à base physique (ex : Modflox, Feflow).

1.5. Volet géochimie (Luitel)

L'objectif du volet géochimie vise, si les contrastes chimiques des eaux analysées sont suffisants, à mieux cerner l'origine des eaux alimentant les complexes tourbeux des deux sites d'étude et si possible faire la partition des différentes contributions. Dans un premier temps, il est nécessaire de caractériser les propriétés géochimiques des eaux des sites de Luitel et de Frasne afin d'identifier le potentiel d'une étude géochimique plus approfondie pour le traçage de l'origine des eaux alimentant la zone humide et les relations hydrogéologiques entre les eaux de surface et les eaux souterraines. En d'autres termes, les premières campagnes de prélèvements au Luitel (juin 2018 – moyennes-eaux) et à Frasne (juillet 2019 – basses-eaux) visent à confirmer la présence de contrastes chimiques et isotopiques entre les différentes masses d'eau accessibles sur site (ruisseaux, fossés/draines et piézomètres).

Deux types de traceurs géochimiques sont utilisés afin de mieux comprendre l'origine et le chemin des eaux au sein des deux zones humides et dans leur environnement immédiat : 1) ceux dépendants des interactions eau-atmosphère ($\delta^{18}\text{O}$ et δD) et 2) ceux dépendant des interactions eau-roche (éléments majeurs). De plus, des collecteurs d'eau de pluie permettent le suivi des précipitations afin de définir les propriétés chimiques et isotopiques des précipitations susceptibles d'alimenter les eaux souterraines et de ruissellement de la zone d'étude.

Pour l'instant, seules les eaux prélevées en juin 2018 au Luitel ont été analysées. Une première interprétation des données sur les ions majeurs ne permet pas de discriminer l'influence de chacun des contrôles sur la chimie des eaux. Toutefois, les informations suivantes peuvent être mises en avant :

- globalement les eaux analysées ont un faciès bicarbonaté calcique à magnésien. Toutefois, les eaux de pluie et des piézomètres 7 et 8 ont un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien ; et les eaux du piézomètre P20 ont un faciès bicarbonaté sodique et potassique.
- les eaux du captage et du ruisseau de Fontfroide ont le même contexte hydrogéologique. La traversée de la tourbière n'influence pas significativement la chimie des eaux de ce ruisseau.
- les eaux alimentant les ruisseaux de Fontfroide et de Pezanti ne traversent pas les mêmes milieux.

Les variations de concentrations observées peuvent s'expliquer par exemple par des taux de dilution plus ou moins important par des eaux de pluie très peu minéralisées ou encore par des variations des temps d'interaction des masses d'eaux avec les formations traversées. Il est possible de discriminer plusieurs dans lesquels les eaux présentent une chimie similaire, même si à l'heure actuelle certains points restent hors tendance :

- secteur nord et quart sud-ouest ;

Conclusion

- secteur de part et d'autre de Fontfroide ;
- secteur central (transect est-ouest en travers de la tourbière bombée)
- secteur sud-est (prébois)

Pour les isotopes, les premières interprétations permettent de mettre en avant les informations suivantes :

- Les résultats d'analyse sur le ruisseau de Fontfroide et le captage sont très homogènes et suggèrent une période de recharge et/ou une altitude de recharge du captage et des sources alimentant le ruisseau différente(s) de celles des autres points de prélèvements.
- les eaux collectées au sein du complexe tourbeux sont d'origine différentes en termes temporel/et ou géographique (des périodes ou saisons plus chaudes et/ou des recharge à plus basse altitude sont possibles pour les eaux des piézomètres en comparaison avec les eaux des ruisseaux).

D'une manière générale, l'interprétation des premières analyses au Luitel préfigure un système hydrogéologique complexe faisant intervenir probablement des masses d'eau de pluie de périodes différentes, ayant suivi des chemins variés au sein des formations géologiques, des influences variées au niveau du complexe tourbeux et des processus de mélange potentiels. Le jeu de données actuel est cependant insuffisant pour conclure sur l'origine et le chemin des eaux, sur les relations entre la tourbière et les eaux de surface.

Des campagnes supplémentaires de prélèvement ainsi qu'un suivi isotopique des eaux de précipitation sont programmées. Afin de mieux comprendre la chimie des eaux de ruissellement et des eaux des tourbières, quelques points de prélèvement d'eau et de reconnaissance géologique sur la partie amont du bassin versant.

L'étape suivante de l'étude de la zone de Luitel sera de discuter des périodes/saisons et des zones de recharge des masses d'eau étudiées, pour cela les isotopes stables de l'eau seront à nouveau utilisés et d'autres outils isotopiques (ex : isotopes du strontium) et/ou traceurs élémentaires (éléments traces) seront mis en œuvre. Ces derniers traceurs seront définis après l'étape de reconnaissance géologique à partir du terrain et des données déjà disponibles dans la littérature sur les formations de Chamrousse.

1.6. Bilan général

Pour rappel, la phase 1 du projet ZHTB avait mis en avant les points suivants :

1. la typologie des zones humides repose sur de très nombreux types (dont fonctionnels). Les zones humides présentent la plupart du temps une structuration en mosaïque correspondant à des types différents. En conséquence, la fonction hydrologique des ZH est compartimentée en plusieurs « réservoirs » aux propriétés différentes dans l'espace et dans le temps.
2. le stockage et restitution d'eau par les zones humides semblent globalement faible voire très faible. Le « rôle d'éponge » dont donc être mis en question (soutien d'été, ralentissement des crues). En conséquence, si le travail à l'échelle du site (zone humide) reste pertinent, il convient de développer une approche à l'échelle de sous-bassins versants (réseaux de zone humides).
3. les interactions des zones humides avec l'hydrosystème les environnant (bassin versant, eaux souterraines, cours d'eau, climat) sont prépondérantes pour comprendre leur fonctionnement. En conséquence, réaliser le bilan hydrologique d'une zone humide est une affaire complexe qui nécessite l'intégration de la zone humide dans son hydrosystème.

Les travaux mis en œuvre sur les tourbières de Luitel et de Frasné en phase 2 confirment ces 3 points mis en avant par l'analyse bibliographique réalisée en phase 1.

1.6.1. Bilan au Luitel

Le site de Luitel, même s'il est de petite taille n'échappe pas à ce constat. En conséquence, le fonctionnement hydrologique cette tourbière doit être appréhendée comme celui d'un complexe tourbeux (en mosaïque d'habitats) intégré dans son hydrosystème. Les eaux stockées (temporairement) et transitant dans un tel complexe ont des origines différentes dans l'espace et dans le temps.

• Réponse du système et effet mémoire

L'analyse des données hydrologiques montre que le fonctionnement de la tourbière de Luitel est structuré par des cycles annuels. Les analyses simples montrent des effets mémoires faibles pour les débits (28 jours), intermédiaires pour l'ETP (67 jour) et plus fort pour les niveaux de nappes (39 à 86 jours selon les piézomètres). Sans surprise, les réserves d'eau potentielles se font dans le compartiment souterrain de l'hydrosystème ; certains secteurs de la réserve ayant un potentiel de réserve plus important. Ce potentiel reste à relativiser en fonction de la porosité efficace qui peut être faible si l'eau est fortement liée à la tourbe.

Ce système montre une réponse rapide aux événements pluvieux (1 jour) que ce soit pour les débits ou les niveaux d'eau souterraine. L'effet mémoire des débits et des hauteurs d'eau souterraines par rapport au signal de pluie est sensiblement le même (respectivement 12 et 13 jours). En somme, l'effet d'une pluie sur ces signaux est relativement court.

• Comportements hydrologiques et sectorisation

L'analyse des débits de Fontfroide montre plusieurs comportements et changement de comportements au cours d'un cycle annuel (5 types de comportements non expliqués à l'heure actuelle). On observe des variations temporelles et spatiales dans les comportements. Par exemple : 1) les pluies de printemps semblent plus rapidement assimilées par le système au regard d'autres périodes ; 2) l'effet mémoire des piézomètres proches des fossés est plus faible, ils ont donc un potentiel de stockage dans le temps plus faible ; 3) il existe des périodes de forts stress hydrique liées à l'absence de précipitations et à une ETP forte.

Les travaux de modélisation ont conduit à structurer le fonctionnement hydrologique du Luitel a priori à l'aide de : 1) 3 réservoirs (nord-œil de la tourbière, sud-ouest-tourbière bombée-boisée et sud-est-prébois) ; 2) 3 types d'écoulement (ruissellement-très rapide, circulation dans la tourbière-rapide et

Conclusion

circulation dans la tourbière-lente). L'analyse pédologique du site a permis de confirmer la pertinence de ces 3 réservoirs et de ces 3 types d'écoulements. L'analyse des histosols des 3 réservoirs montre globalement un potentiel intéressant pour le stockage et le transfert d'eau. Ce type d'analyse met aussi en évidence des zones périphériques paratourbeuses qui peuvent potentiellement jouer un rôle important dans le stockage d'eau, le transfert d'eau et la réception des eaux de versant. L'analyse stratigraphique des histosols montre qu'il existe des horizons superficiels (30cm) très fibriques avec des propriétés hydrodynamiques estimées (fortes conductivités hydrauliques et porosités efficaces) permettant une circulation potentiellement rapide de l'eau. Sous ces horizons la conductivité décroît laissant supposer des circulations d'eau plus lentes.

Les analyses géochimiques montrent que les eaux de Fontfroide sont issues du versant (recharge en altitude) et qu'elles sont différentes des eaux souterraines prélevées dans les piézomètres et des eaux superficielles prélevées dans les fossés et les autres ruisseaux, notamment Pezanti qui traverse la tourbière au sud (les eaux de Fontfroide et Pezanti n'ont donc pas traversés les mêmes milieux avant d'arriver dans la tourbière). Sur la période considérée (à la date du prélèvement), en moyennes-eaux, la traversée de la tourbière n'influence pas la chimie des eaux de Fontfroide contrairement à ce qui a été mis en évidence par l'analyse différentielle des chroniques de conductivités. De plus, la géochimie permet de distinguer, non plus 3 ou 4 secteurs, mais 5 secteurs : 1) nord-œil de la tourbière et sud-ouest ; 2) Fontfroide ; 3) centre-transect est-ouest traversant la tourbière boisée jusqu'au Prébois ; 4) Prébois ; 5) Pezanti.

Les premières investigations réalisées au Luitel montrent donc bien qu'il est nécessaire de considérer la tourbière comme un complexe tourbeux en interaction avec l'hydrosystème local. Ce premier travail a permis de mettre en évidence plusieurs « réservoirs » en interaction dans le temps et dans l'espace et des comportements hydrologiques différents. En effet, les eaux contenues dans le complexe tourbeux ont des origines temporelles et spatiales différentes soulignant potentiellement des influences différentes, des délais dans les transferts et des mélanges potentiels.

• Étiage, soutien d'étiage et changement d'échelle

L'analyse comparative du ruisseau de Fontfroide et du Ruisseau du Lac montre des comportements différents. Il s'avère que le ruisseau de Fontfroide qui traverse une tourbière, au contraire du Ruisseau du Lac, montre : 1) une restitution de l'eau de pluie plus fortement différée ; 2) un coefficient de d'écoulement plus élevé en été. Ces premiers éléments vont dans le sens d'un rôle de soutien d'étiage de la tourbière de Luitel. De plus, à l'aide des premières chroniques de données disponibles, on observe une déminéralisation amont-aval de l'eau de Fontfroide et des débits amont supérieurs au débit l'aval.

Si des indices du rôle de soutien d'étiage de la tourbière de Luitel existent, il faut toutefois relativiser son importance. Le débit d'étiage calculé est de l'ordre de 0,38 l/s. En regard, le soutien d'étiage modélisé est compris entre 0,21 à 0,06 l/s (302,4 à 86,4 l/jour) selon les périodes. La contribution du système au débit d'étiage est donc relativement faible. Toutefois, les volumes en jeu restent faibles et il n'est pas possible à l'heure actuelle de déterminer s'il s'agit d'une restitution d'eau stockée dans la tourbière ou de restitution différée d'eau souterraine de versant.

Ces premiers résultats, s'ils sont décevants quant au potentiel de soutien d'étiage d'une zone humide en terme de volume, rendent prometteur les actions engagées avec l'ONF sur la haute-vallée de l'Aude. La différence de comportement d'un ruisseau traversant une tourbière par rapport à un autre n'en traversant pas, observée entre Fontfroide et le Ruisseau du lac, rend très intéressante la comparaison de la réponse de petits bassins versants ; certains dépourvus ou presque de zones humides, d'autres pourvus d'un réseau de zones humides. À cette échelle, les volumes contribuant à l'étiage ou la durée des contributions pourraient être potentiellement plus importants.

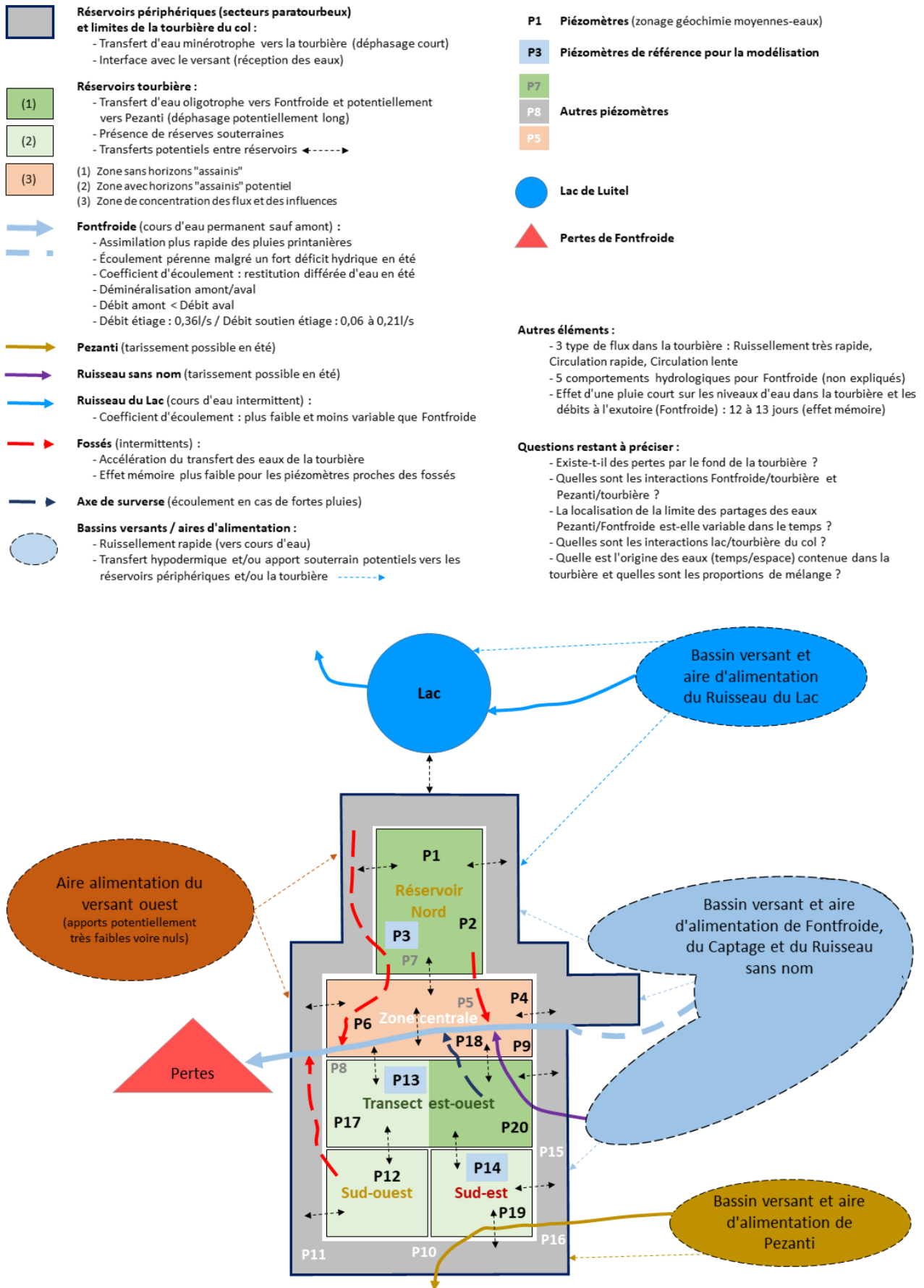


Figure 125 : Fonctionnement hydrologique du complexe tourbeux de Luitel : schéma conceptuel

Conclusion

Le Tableau 18 présente les tâches effectuées au Luitel en phase 2 du projet ZHTB.

Pour la phase 3, il est prévu de continuer les suivis (relevés des sondes et entretien des seuils). Concernant les différents volets de l'étude, il est prévu :

- volet hydrologie : poursuite des travaux de modélisation et d'analyse statistique
- articulation volets géophysique/pédologie : stage master 2, T. Jolly (2019) – Géométrie et structure 3D de la tourbière du Luitel
- volet pédologie : analyse de la grande carotte (6m) – pollen, macrorestes, carbone total, C¹⁴.
- volet géochimie : stage de master LMV (commun à Frasne) – analyse des eaux de pluie, prélèvements pour analyse ions majeurs, isotopes de l'eau voire des éléments traces et autres isotopes (à déterminer).

Autorisation d'étude :
Autorisation préfectorale (2018-2019)
Renouvellement de l'Autorisation préfectorale (2019-2021)
Partage de données :
Bibliographiques, météorologiques, hydrologiques, hydrogéologiques, géophysiques, pédologiques, écologiques
Instrumentation :
Installation de 2 seuils jaugés / 2 sondes CTD (04/2018)
Installation de 1 sonde barométrique (04/2018)
Installation de 5 sondes de pression : complément du suivi en piézomètre existant (11/2018)
Suivis hydrologiques :
Relevé des sondes (11/2018)
Relevé des sondes (04/2019)
Relevé des sondes (automne 2019)
Nivellement des piézomètres / suivi volume tourbière (06/2018)
Nivellement des piézomètres / suivi volume tourbière (04/2019)
Campagnes de terrain :
Géophysique : GPR – interfaces acrotelme/catotelme et tourbière/versant (03/2018)
Pédologie : carottages et sondages (04/2018)
Pédologie : sondages complémentaires et grande carotte de 6m (06/2018)
Pédologie : carottages et sondages complémentaires (04/2019)
Géochimie : ions majeurs, isotopes de l'eau (06/2018) – moyennes-eaux
Géochimie : ions majeurs, isotopes de l'eau (07/2019) – basses-eaux
Stages de master et post-doc
Caractérisation pédologique : stage master 1 EVS-ISTHME, T. Jolly (09/2018)
Essai de modélisation soutien d'étiage : stage master EVS-EMSE, Y. Pascoletti (09/2018)
Analyse statistique des données hydrologiques et modélisation pour réseaux de neurones : Post-doc EMA, S. Pinel (06/2019)

Tableau 18 : Bilan des tâches effectuées au Luitel en phase 2 du projet ZHTB

1.6.2. Bilan Frasne

Le travail est moins avancé sur Frasne que sur le Luitel. Comme pour ce dernier, le fonctionnement de la tourbière de Frasne doit être appréhendé comme celui d'un complexe tourbeux intégré dans son hydrosystème. Les eaux stockées (temporairement) et transitant dans un tel complexe ont des origines vraisemblablement différentes dans l'espace et dans le temps, et des interactions complexes. Toutefois,

la taille plus importante de ce complexe tourbeux et le domaine karstique sur lequel il repose tente à augmenter la complexité du site.

Les travaux actuellement en cours devraient nous aider à mieux appréhender le fonctionnement de ce site en phase 3 du projet ZHTB. Les liens tissés avec les activités du SNO tourbières (Guillaume Bertrand) sur la tourbière de Frasne permettront d'articuler le projet ZHTB avec d'autres travaux en hydrologie et en géochimie (projet Critical Peat ; thèse de doctorat d'Alexandre Lhosmot ; stages master). De plus, les travaux en lien avec le projet SoHUMID (Chrystelle Auterives) devraient permettre de mieux considérer les apports d'eau souterraine, voire karstique, à la tourbière de Frasne.

Le Tableau 19 présente les tâches effectuées à Frasne en phase 2 du projet ZHTB.

Autorisation d'étude :
Intégration au plan de gestion
Partage de données :
Bibliographiques, météorologiques, hydrologiques, hydrogéologiques, géophysiques, pédologiques, écologiques
Instrumentation :
Installation de 2 sondes CTD : complément du réseau de suivi existant / cours d'eau tributaires de l'exutoire (06/2018)
Installation de 1 sondes CTD : complément du réseau de suivi existant / la doline du Creux au Lard (06/2018)
Installation de 1 sonde barométrique (06/2018)
Installation de 1 CTD : complément du réseau de suivi existant / exutoire (06/2019)
Suivis hydrologiques :
Relevé des sondes (11/2018)
Relevé des sondes (05/2019)
Relevé des sondes (automne 2019)
Campagnes de terrain :
Géophysique : GPR – géométrie (06/2018) – test 1 / zones sèches
Géophysique : GPR – géométrie (02/2019) – test 2 / zones inondées
Géophysique : GPR – géométrie (09/2019)
Géochimie : ions majeurs, isotopes de l'eau (07/2019) – basses-eaux
Stages de master et post-doc
Analyse statistiques des données hydrologiques et modélisation par réseaux de neurones : Post-doc EMA, S. Pinel et Stage de master EMA, H. Caldarak (06/2019)

Tableau 19 : Bilan des tâches effectuées à Frasne en phase 2 du projet ZHTB

Pour la phase 3, il est prévu de continuer les suivis (relevés des sondes et entretien des seuils). Concernant les différents volets de l'étude, il est prévu :

- volet hydrologie : poursuite des travaux de modélisation et d'analyse statistique
- volet géophysique : analyse des données géophysiques (au besoin nouvelle campagne en hiver 2020), stage de Master
- volet géochimie : stage de master LMV (commun à Luitel) – analyse des eaux de pluie, prélèvements pour analyse ions majeurs, isotopes de l'eau voire des éléments traces et autres isotopes (à déterminer).

Conclusion

1.6.3. Bilan des stages et post-doc (phase 2 et planification phase 3)

Luitel :
Caractérisation pédologique : stage master EVS-ISTHME, T. Jolly (09/2018)
Essai de modélisation soutien d'étiage : stage master EVS-EMSE, Y. Pascoletti (09/2018)
Analyse statistique des données hydrologiques et modélisation par réseaux de neurones : Post-doc EMA, S. Pinel (06/2019)
Frasne :
Analyse statistique des données hydrologiques et modélisation par réseaux de neurones : Stage de master EMA, H. Caldirak (06/2019)
Report :
Stage master : volet géophysique - reporté en phase 3
Stage master : volet géochimie - reporté en phase 3

Tableau 20 : Bilan des stages et post-doc de la phase 2 du projet ZHTB

Luitel
Stage master, T. Jolly (2019) articulation volets géophysique/pédologie – Géométrie et structure 3D de la tourbière du Luitel (en cours)
Stage master volet hydrologie (EMSE) – modélisation ou géomatique (prévu en 2020)
Stage master volet hydrologie (EMA) – analyse de données et modélisation (prévu en 2020)
Stage de master volet géochimie (LMV) – analyse de données, commun à Frasne (prévu en 2020)
Frasne
Stage de master volet géochimie (LMV) – analyse de données, commun à Luitel (prévu en 2020)
Stage de master volet géophysique (LEHNA) – analyse de données (prévu en 2020)
Indicateurs
Post-doc Géomatique (EVS-ISTME) (prévu en avril 2020)
Projet en lien
Stage de master ZH BV Aude (ONF-EMA-EMSE) – analyse de données (2020)

Tableau 21 : Stages et post-doc prévus pour la phase 3 du projet ZHTB

2. Mise en œuvre et objectifs de la phase 3

2.1. Conduite des objectifs à terme

La phase 3 du projet ZHTB contribuera à la réalisation des objectifs (ambitieux) à terme fixés au début du projet ZHTB. Pour rappel, 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.
- **Création d'indicateurs du soutien d'étiage :**
 - liés à des paramètres et variables clefs ;
 - simples d'acquisition et d'interprétation ;
 - utilisables sous SIG si possible (analyse spatiale) ;
 - liés à des enjeux et besoins de gestion.
- **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

2.2. Objectifs de la phase 3

Les objectifs fixés pour la phase 3 du projet ZHTB sont les suivants :

- **Objectifs principaux :**
 - analyse des données existantes sur les sites d'études, interprétation du fonctionnement hydrologique, mise en évidence du rôle de soutien d'étiage et préconisations de gestion ;
 - suite de l'acquisition d'information sur les 2 sites principaux et exploitation des données au cours des cycles hydrologiques correspondants ;
 - poursuite des travaux de modélisation ;
 - analyse et synthèse des données acquises en phases 2 et 3.
- **Spatialisation du fonctionnement des zones humides :**
 - critères (indicateurs) de soutien d'étiage à l'échelle du site et à l'échelle de bassins versants ;
 - enrichissement du concept d'espace de bon fonctionnement des zones humides.
- **Autres sites à intégrer en phase 3 :**
 - autres sites complémentaires (transférabilité des indicateurs) ;
 - zones humides de l'Aude (lien accord cadre AE-RMC-ONF).
- **Restitution et valorisation**

Références Bibliographiques – Phase 2

Générales

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

Forum des Marais Atlantiques (2013) Boîte à Outils "Zones Humides", Agence de l'eau Seine-Normandie, 272 p.

<http://www.forum-marais-atl.com/boite-outils-zones-humides.html> ou www.aesn.fr

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.

Jolly T. (2018) Caractérisation du fonctionnement hydrogéomorphologique de la tourbière de la Réserve Naturelle Nationale du Lac Luitel. Essai méthodologique pour contribuer à la détermination du rôle des tourbières de têtes de bassins versants dans le soutien d'étiage. Rapport de stage de Master 1 Géographie Gestion de l'environnement parcours GRAINE. Université de Saint-Etienne, Mines Saint-Etienne, UMR 560 EVS, ZABR, AERMC, 174p.

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

ONF (2019) Étude du fonctionnement hydrologique des zones humides de tête de bassin versant de l'Aude, rapport phase 2, 109p.

Paran F., Arthaud F., Novel M., Graillot D., Bornette G., Piscart C., Marmonier P., Lavastre V., Travi Y., Cadilhac L. (2015) Caractérisation des échanges nappes/rivières en milieu alluvionnaire – Guide méthodologique. Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse – Eau et connaissance, 178p.

Paran F., Augeard B. (coordinateurs) (2017) Guide technique Interactions nappe/rivière : des outils pour comprendre et mesurer les échanges. Agence française pour la biodiversité, collection Guides et protocoles, 102p.

Paran, F., Ré-Bahuaud, J. et Graillot 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.

Pascoletti Y. (2018) Modélisation du fonctionnement hydrologique de la tourbière du col de Luitel (Isère). Rapport de stage de master 2 Géographie Mention Gestion de l'Environnement, Université de Saint-Etienne, Mines Saint-Etienne, UMR 560 EVS, ZABR, AERMC, 140p.

Ximenès M.C., Fouque C., Barnaud G. (2007) État 2000 et évolution 1990-2000 des zones humides

155

Références bibliographiques

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")

Tourbière de Luitel (Partie I - 1.1. Tourbière de Luitel, p13)

Barféty et al. (1972) Carte géologique détaillée de la France à 1/50.000°, feuille VIZILLE, 1^e édition (lever partiel) BRGM. Orléans.

Biju-Duval J. (2001) Observations réalisées sur des captages à l'occasion des traçages dans les ruisseaux de Rambert et de Fontfroide. 5p.

Cohard J.M., Betoux R. (2007) Caractérisation du fonctionnement hydrologique de la tourbière du Luitel, Rapport intermédiaire N°3 : Mesures d'évapotranspiration. LTHE Grenoble, 6p.

Desplanque C., Garambois S. (2010) Caractérisation de la paléotopographie de la tourbière ombrotrophe du Luitel au moyen de méthodes géophysiques. Ann. Sci. Rés. Bios. Trans. Vosges du Nord-Pfälzerwald, n° 15, pp. 305-3015.

Desplanque C. (2011) Plan de Gestion 2011-2020. Plan de Gestion. 113p.

Durand Y., Brun E., Merindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E. (1993) A meteorological estimation of relevant parameters for snow schemes used with atmospheric models. Annals of Glaciology, 18, 65-71

Garambois S. (2008) Tourbière ombrotrophe du Col Luitel, Caractérisation géologique et hydrologique 3D de la tourbière : apports du GPR. Compléments géophysiques. Rapport de synthèse. 21p.

Garambois S., Cloarec D. (2006) Acquisitions géophysiques au Lac Luitel. 14p.

Guédron S., Amouroux D., Sabatier P., Desplanque C., Develle A.L. (2016) A hundred year record of industrial and urban development in French Alps combining Hg accumulation rates and isotope composition in sediment archives from Lake Luitel. Chemical Geology, Elsevier, 431, pp.10--19.

Guiter et al. (2015) La Réserve Naturelle du Luitel, ou l'autobiographie de la Nature. 22p.

Hustache E. (2004) Étude hydrologique de la tourbière du Col, Réserve Naturelle Nationale Lac Luitel. 61p.

Landry J., Rochefort L. (2011) Le drainage des tourbières : impacts et techniques de remouillage. Groupe de recherche en écologie des tourbières, Université Laval, Québec, 2011. 53 p.

Laurent J.P. (2007) Tourbière ombrotrophe du col Luitel - Vers une caractérisation du fonctionnement hydrologique de la tourbière : mesure des teneurs en eau, suivi du niveau de la nappe et estimation des flux. Rapport de synthèse 2007. S.I., LTHE Grenoble, 13 p.

Manneville C. (2016) Étude préalable aux travaux d'effacement des drains dans la réserve naturelle nationale du lac Luitel. Soutenance de mémoire.

Nedjai R., Rovera G., 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.

Noilhan J., Planton S. (1989) A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. Mon. Weather Rev., 117, 536-5

Pascoletti Y. (2018) Modélisation du fonctionnement hydrologique de la tourbière du col de Luitel (Isère). Rapport de stage de master 2 Géographie Mention Gestion de l'Environnement, Université

de Saint-Etienne, Mines Saint-Etienne, UMR 560 EVS, ZABR, AERMC, 140p.

Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. (2007), Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633-1644.

Ravatin M. (2017) Analyse hydro-climatique d'une tourbière acide à sphaignes, Réserve Naturelle du Lac Luitel. 97p.

Sarrot-Reynaud J. (1972) Hydrologie du massif de Chamrousse, Grenoble, *Revue de Géographie Alpine*, Tome 60, pp 445-452.

Tourbière de Frasne (Partie I - 1.2. Tourbière de Frasne, p28)

Bailly G. (2005) Suivi floristique de la tourbière vivante de Frasne. État initial (année 2004). Phytolab ; Conservatoire botanique de Franche-Comté ; Communauté de communes du plateau de Frasne et du val du Drugeon, 2005, 15 p

Bedolla A., Grootjans A., Grosvernier P. (2013) Hydrologie et potentiel de restauration de quelques marais français et suisses. Note des visites de terrain d'experts réunis à l'occasion de la venue d'Ab Grootjans, Rapport de synthèse, SMMAHD.

Bichet V., Campy M. (2009) Montagnes du Jura : géologie et paysages. Néo-éditions, Talant. 304p.

Briot M. (2004) Restauration des capacités biogènes des tourbières : Étude hydrogéologique, hydrologique, et pédologique d'une zone sous influence d'un drain dans la Réserve Naturelle de Frasne (Doubs, France). Rapport de stage, SMMAHD.

Broquet P., Pigetvieux G., Soulliat A. (1978) Prospection géophysique de la région Frasne-Bonnevaux (Doubs). Université de Franche-Comté. Publications du Centre Universitaire d'Études Régionales. Institut d'Études Comtoises et Jurassiennes, n°2, 435p.

Bruckert S., Gaiffe M. (1980) Analyse des facteurs de formation et de distribution des sols en pays calcaire glaciaire ou karstique, Plaine de Frasne-Bonnevaux et montagne du Laveron-Jura central. *Annales scientifiques de l'université de Besançon, Biologie végétale*, 4ème série, fasc. 1. pp19-67.

Collin L. (2016) Établissement d'un modèle conceptuel du fonctionnement hydro-écologique de la tourbière de Frasne. Rapport de Master QuEST PTD, UFC, 88p.

Delarue F. (2010) Dynamique des matières organiques labiles et récalcitrantes dans la tourbière de Frasne (Jura) : impact des conditions hydriques et d'un réchauffement simulé in situ. Thèse de doctorat, Géochimie, Université d'Orléans.

Duraffourg M., Palacio P. (1981) Étude géologique, géophysique, géotechnique et hydrologique du synclinal de Frasne-Bonnevaux (Doubs). Faculté des Sciences et des Techniques de l'Université de Franche-Comté, 1981, 155 p.

Grandvoinnet D., Bruckert S., Campy M. (1988) Formation et organisation d'une tourbe acide du Jura. *Science du Sol* 26 (2): 55-6.

Grosvernier P. (2005) Expertise hydroécologique de la tourbière du Forbonnet (Commune de Frasne, F). Compte-rendu d'étude du cabinet Lin'ECO, SMMAHD.

Grosvernier P. (2011) Enjeux de conservation et potentialités de restauration de la tourbière du forbonnet (Commune de Frasne, France). Compte-rendu d'étude du cabinet Lin'ECO, SMMAHD.

Grosvernier P. (2014) Fermeture de fossés au Creux au Lard, tourbière du Forbonnet (Commune

Références bibliographiques

de Frasne, France). Compte-rendu d'étude du cabinet Lin'ECO, SMMAHD.

Magnon G., Terraz L. (2002) Document d'objectifs Natura 2000 -Bassin du Dugeon. (Rapport soumis à validation -comité de Pilotage du 5 janvier 2001). Syndicat mixte de la Vallée du Dugeon et du Plateau de Frasne. Direction régionale de l'Environnement de Franche-Comté, 2000, 95p

Manneville O., Vergne V., Villepoux O. (1999) *Le monde des tourbières et des marais*. Delachaux et Niestlé ed. Lausanne (Switzerland)-Paris, 320p.

ETP (Partie I - 2.1. Point sur l'ETP, p35)

Bragg, O.M., 2002, Hydrology of peat-forming wetlands in Scotland, *The Science of the Total Environment* 294 (2002) 111–129.

Djaman, K., Balde, A. B., Sow, A., Muller, B., et al., 2015, Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under Sahelian conditions in the Senegal River Valley, *Journal of Hydrology: Regional Studies* 3 (2015) 139–159

Raddatz, R.L., Papakyriakou, T.N., Swystun, K.A., Tenuta, M., 2009, Evapotranspiration from a wetland tundra sedge fen: Surface resistance of peat for land-surface schemes, *agricultural and forest meteorology* 149 (2009) 851–861

Réseaux de neurones (Partie I - 2.2. Modélisation par Réseaux de neurones, p37 et Partie II - 4.2. Réseaux de neurones, p85)

Andréassian V., Perrin C., Michel C., 2004, Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, 286(1-4), 19–35.

Araghinejad, S., Azmi, M., Kholghi, M., 2011, Application of artificial neural network ensembles in probabilistic hydrological forecasting, *Journal of Hydrology*, 407(2011), pp. 94-104.

Artigue, G., Johannet, A., Borrell, V., Pistre, S., 2012 : Flash flood forecasting in poorly gauged basins using neural networks: case study of the Gardon de Mialet basin (southern France), *Natural Hazards and Earth System Sciences* 12, pp. 3307-3324, doi : 10.5194/nhess-12-3307-2012.

Corzo, G., Solomatine, D., 2007, Knowledge-based modularization and global optimization of artificial neural network models in hydrological forecasting, *Neural Networks* 20 (2007) 528–536.

Cybenko, G., 1989, Approximation by superpositions of a sigmoidal function, *Mathematics of Control, Signals and Systems*, vol 2, pp. 303-314, 1989.

Funahashi, K., 1989, On the approximate realization of continuous mappings by neural networks, *Neural Networks*, vol 2, pp. 183-192.

Geman, S., Bienenstock, E., Doursat, R., 1992, Neural networks and the bias / variance dilemma, *Neural Computation*, vol 4, pp. 1-58.

Hornik, K., Stinchcombe, M., White, H., 1989, Multilayer feedforward networks are universal approximators, *Neural Networks*, vol 2, pp. 359-366.

Kong A Siou, L., Johannet, A., Borell Estupina, V., Pistre, S., 2012, Optimization of the generalization capability for rainfall-runoff modeling by neural networks: The case of the Lez aquifer (southern France), *Environmental Earth Sciences*, Volume 65, Number 8, Pages 2365-2375.

Kong A. Siou, L., Johannet, A., Pistre, S., Borrell, V., 2011, Complexity selection of a neural

network model for karst flood forecasting : The case of the Lez Basin (southern basin), *Journal of Hydrology*, Volume 403, Issues 3–4, 17 June 2011, Pages 367-380.

Kong-A-Siou, L., 2012, Modélisation des crues de bassins karstiques par réseaux de neurones. Cas du bassin du Lez (France), thèse de l'Université Montpellier II, 232p.

Nerrand, O., Roussel-Ragot, P., Personnaz, L., Dreyfus, G., Marcos, S., 1993, Neural Networks and Nonlinear Adaptive Filtering: Unifying Concepts and New Algorithms, *Neural Comp* 5(2), 165-199.

Sahoo, G.B., Ray, C., De Carlo, E.H., 2006, Use of neural network to predict flash flood and attendant water qualities of a mountainous stream on Oahu, Hawaii, *Journal of Hydrology* 317, 63-80.

Sjöberg, J., Zhang, Q., Ljung, L., 1995, Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview, *Automatica*, vol 31, pp. 1691-1724.

Stone, M., 1974, Cross-validatory choice and assessment of statistical predictions. *Journal of the Royal Statistical Society*, B36, pp. 111-147.

Toukourou, M.S., Johannet, A. Dreyfus, G., 2009, Flash flood forecasting by statistical learning in the absence of rainfall forecast: a case study, *Engineering Applications of Neural Networks Proceedings*, pp. 98-107.

Statistiques hydrologiques (Partie II - 3. Analyse statistique des données hydrologiques, p51)

Hausdorff, J.M., Purdon, P.L., Peng, C.K., Ladin, Z., Wei, J.Y., et al., 1996, Fractal dynamics of human gait: stability of long-range correlations in stride interval fluctuation. *J Appl Physiol* 80: 1448–1457.

Kong-A-Siou, L., 2011, Modélisation des crues de bassins karstiques par réseaux de neurones. Cas du bassin du Lez (France), thèse de l'Université Montpellier II.

Larocque, M., Mangin, A., Razack, M. & Banton, O., 1998, Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France). *Journal of Hydrology*, 205(3-4), pp.217-231.

Mangin, A., 1975, Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse Université de Dijon. Laboratoire souterrain du Centre national de la recherche scientifique.

Mangin, A., 1984, Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *Journal of Hydrology*, 67(1-4), pp.25-43.

Pascoletti Y. (2018) Modélisation du fonctionnement hydrologique de la tourbière du col de Luitel (Isère). Rapport de stage de master 2 Géographie Mention Gestion de l'Environnement, Université de Saint-Etienne, Mines Saint-Etienne, UMR 560 EVS, ZABR, AERMC, 140p.

Modèles réservoirs (Partie II - 4.1. Modèles réservoirs – modélisation du soutien d'été au Luitel, p75)

Acreman M.C. et Miller F. (2006) Hydrological impact assessment of wetlands. 31p.

AFES (2008) Référentiel Pédologique 2008, Baize D., Girard M.-C. (coord.), Editions Quae, Versailles. 432 p.

Agence de l'eau Adour-Garonne (2009) Évaluation économique des zones humides. 10p.

Références bibliographiques

- Agence de l'eau Loire-Bretagne (2002) Les fonctions des zones humides. 25p.
- Agence MTDA (2017) Évaluation environnementale du SAGE Drac-Romanche. 213p.
- André G., André M. (2008) Le Pin à crochets (*Pinus uncinata* Ramond ex DC. var. *rotundata* [Link Antoine]) des tourbières : preuves historiques de son indigénat dans le massif jurassien et dynamique des peuplements suite aux actions anthropozoogènes. Les Nouvelles Archives de la Flore jurassienne, 6, 2008 – S.B.F.C., C.B.N.F.C
- Bissardon M., Guibal L., Rameau J.C. (1997) Corine Biotopes. Version originale. Types d'habitats français. 175p.
- Desplanque C. (2011) Plan de Gestion 2011-2020. Plan de Gestion. 113p.
- 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.
- 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.
- Howie S.A., Hebda R.J. (2018) Bog surface oscillation (mire breathing): A useful measure in raised bog restoration. *Hydrological Processes*. ;32:1518–1530.
- Ingram H.A. (1978), Soil layers in mires : function and terminology. *Journal of Soil Science*, 29: 224-227.
- Jolly T. (2018) Caractérisation du fonctionnement hydrogéomorphologique de la tourbière de la Réserve Naturelle Nationale du Lac Luitel. Essai méthodologique pour contribuer à la détermination du rôle des tourbières de têtes de bassins versants dans le soutien d'été. Rapport de stage de Master 1 Géographie Gestion de l'environnement parcours GRAINE. Université de Saint-Etienne, Mines Saint-Etienne, UMR 560 EVS, ZABR, AERMC, 174p.
- Manneville O. (2001) La diversité des tourbières en France et leur prise en compte dans les politiques de conservation. 7p.
- Manneville O., Vergne V., Villepoux O. (2006) Le Monde des tourbières et des marais. 2eme ed. : Delachaux et Niestle, 320 p.
- Medde, GIS Sol (2013) Guide pour l'identification et la délimitation des sols de zones humides. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol. 63p.
- Porteret J. (2008) Fonctionnement hydrologique des têtes de bassin versant tourbeuses du Nord-Est du Massif Central. *Geography*. Université Jean Monnet - Saint-Etienne. French. 431p.
- Price J.S. (2001) L'hydrologie (Chapitre 5), dans *Ecologie des tourbières du Québec-Labrador* - Presses Université Laval, 621p.
- 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.
- SIE (2017) Glossaire sur l'eau et les milieux aquatiques. 682p.
- US EPA (2015) Connectivity of Streams and Wetlands to Downstream Waters: A Review and Synthesis of the Scientific Evidence (Final Report). U.S. Environmental Protection Agency, Washington,

DC, EPA/600/R-14/475F

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.

Von Bertalanffy L. (1993) Théorie générale des systèmes, Dunod, Paris.

Géophysique (Partie III - 1. Volet géophysique, p92)

Bichet V. (2015) Campagne ERT au Creux au Lard. UMR CNRS Chrono-environnement. Juillet 2015.

Bossuet G (1997) Contribution des sondages électriques à l'étude des sites de tourbières. L'étang du Lautrey (Jura, France) [Contribution of the resistivity soundings to the survey of the peat bogs. L'étang du Lautrey (Jura, France)] Quaternaire, vol. 8, n°4, 1997. pp. 359-364

Comas X., Slater L., Reeve A.S. (2011) Pool patterning in a northern peatland: Geophysical evidence for the role of postglacial landforms. Journal of Hydrology 399, 173–184.

Dangeard M., Schneider S., Bodet L., Rivière A., Guérin R., Réjiba F., Hovhannissian G. (2017) Vers une interpolation hydrogéophysique des propriétés hydrodynamiques de la subsurface : apports du « time-lapse » sismique. PIREN-Seine phase VII - rapport 2017.

Desplanque C., Garambois S. (2010) Caractérisation de la paléotopographie de la tourbière du col au moyen de méthodes géophysiques. 11p.

Garambois S. (2008) Rapport de Synthèse .Tourbière ombrotrophe du col Luitel. Caractérisation géologique et hydrologique 3D de la tourbière : apports du GPR. Compléments géophysiques. 21P.

Garambois S., Cloarec D. (2006) Acquisitions géophysiques au Lac Luitel. 14p.

Holden J., Burt T.P. (2001) Piping and pipeflow in a deep peat catchment. Catena 48 pages 173-199.

Holden J., Burt T.P., Vilas M. (2002) Application of ground-penetrating radar to the identification of subsurface piping in blanket peat. Landforms 27, 235–249

Lowry C.S., D. Fratta, M.P. Anderson (2009) Ground penetrating radar and spring formation in a groundwater dominated peat wetland. Journal of Hydrology 373, 68–79.

Pédologie (Partie III – 2. Volet pédologie, p100)

Chambers F.M., Beilman D.W., Yu Z. (2010) Methods for determining peat humification and for quantifying peat bulk density, organic matter and carbon content for palaeostudies of climate and peatland carbon dynamics. Mires and Peat, Volume 7 (2010/11), Article 07, 1–10.

Cholet J., Magnon G. (2010) *Tourbière des montagnes françaises- Nouveaux éléments de connaissance de réflexion et de gestion*. Pôle-relais tourbière, Fédération des Conservatoires d'Espaces Naturels, en partenariat avec la communauté de communes Frasne-Drugeon

Cubizolle H. (2018) Les tourbières et la tourbe. Géographie, hydro-écologie, usages et gestion conservatoire. À paraître aux éditions Lavoisier Tech&Doc.

Dearing J.A., Hannam J.A., Anderson A.S., Wellington E.M.H.(2001) Magnetic,geochemical and

Références bibliographiques

DNA properties of highly magnetic soils in England Geophys. J.Int., 144: 183-196.

Desplanque C. (2011) *Plan de gestion 2011-2020*. Rapport. ONF. 113p.

Garambois S. (2008) Rapport de Synthèse .Tourbière ombrotrophe du col Luitel. Caractérisation géologique et hydrologique 3D de la tourbière : apports du GPR. Compléments géophysiques. 21P.

Grosvernier P., Staubli P. (2009) Régénération des hauts-marais. Bases et mesures techniques. S.I. : Office Fédéral de l'Environnement, 2009, 96 p.

Guiter F., Ponel P., Poher Y., Brisset E., Miramont C., De Beaulieu J.L. (2013) Etude multidisciplinaire des archives paléo environnementales de la Réserve Naturelle du Lac Luitel – Vers une histoire pluri millénaire de la biodiversité. Compte rendu final du programme scientifique IMBE-ISTERRE. 61 p.

Heiri F., Lotter A., Lemcke G. (2001) Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. Journal of Paleolimnology 25: 101–110.

Naudin A. (2012) Potentiel de la minéralogie magnétique en tant que marqueur des variations environnementales enregistrées par les dépôts tourbeux : Application au marais de la Trézence (17). Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle.

Pascoletti Y. (2018) Modélisation du fonctionnement hydrologique de la tourbière du col de Luitel (Isère). Rapport de stage de master 2 Géographie Mention Gestion de l'Environnement, Université de Saint-Etienne, Mines Saint-Etienne, UMR 560 EVS, ZABR, AERMC, 140p.

Salomon F. (2013) Géoarchéologie du delta du Tibre : Evolution géomorphologique holocène et contraintes hydro sédimentaires dans le système Ostie– Portus. Thèse, Université Lumière Lyon 2.

Wastiaux C (2008) Les tourbières sont-elles des éponges régularisant l'écoulement. Bulletin de la Société géographique de Liège. 50 p.

Géochimie (Partie III - 3. Volet géochimie, p114)

Barbieri M., Boschetti T., Petitta M., Marco T., 2005 - Stable isotope (2H, 18O and 87Sr/86Sr) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy). Appl. Geochem. 20, 2063-2081.

Celle H., Daniel M., Mudry J., Blavoux B., 2000. Signal pluie et traçage par les isotopes stables en Méditerranée occidentale. Exemple de la région avignonnaise (Sud-Est de la France). C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes 331 647-650.

Chapman J.B., Lewis B., Litus G., 2003 - Chemical and isotopic evaluation of water sources to the fens of southPark, Colorado. Environ. Geol. 43, 533-545.

Coplen T.B., Herczeg A.L., Barnes C., 2000 - Isotope engineering – using stable isotopes of the water molecule to solve practical problems. In: Cook, P.G., Herczeg, A.L. (Eds), Environmental Tracers in Subsurface Hydrology. Kluwer Academic Publishers, Boston, 79-110.

Guiter F., Ponel Ph., Poher Y., Brisset E., Miramont C., De Beaulieu J.-L., 2015. La réserve naturelle du Luitel, ou l'autobiographie de la nature. Les cahiers rnf n°5. Archives environnementales et évolution des écosystèmes. « Etudier le passé pour comprendre le présent et éclairer l'avenir ». p. 91-112. (<http://www.reserves-naturelles.org>).

Gurrieri J.T., Furniss G., 2004 - Estimation of groundwater exchange in alpine lakes using non-steady mass-balance methods. J. Hydrol. 297, 187-208.

Halder J., Decrouy L., Vennemann T.W., 2013. Mixing of Rhône River water in Lake Geneva (Switzerland-France) inferred from stable hydrogen and oxygen isotope profiles. *Journal of Hydrology* 477, 152-164.

Kendall C., Caldwell E.A., 1998 - Fundamentals of isotope geochemistry. In : Kendall C., McDonnell J.J. (Eds), *Isotope tracers in Catchment Hydrology*. Elsevier, Amsterdam, 51-86.

Maréchal J.C., Etcheverry D., 2003 - The use of ^3H and ^{18}O tracers to characterize water inflows in alpine tunnels. *Appl. Geochem.* 18, 339-351.

Rademacher L.K., Clark J.F., Hudson G.B., 2002 - Temporal changes in stable isotope composition of spring waters: implications for recent changes in climate and atmospheric circulation. *Geology* 30, 139-142.

Sarrot-Reynaud J., 1972. Hydrogéologie du massif de Chamrousse. Exemple de liaison entre l'hydrogéologie et la structure tectonique. In : *Revue de géographie alpine*. 1972, Tome 60 N°3. Pp.445-452

Références Bibliographiques – Phase 1

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.
- 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.

Références bibliographiques

- 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.
- 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., Siegert 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.

Références bibliographiques

- 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, Byelorussie.
- 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 Sénégrière (Lozère). *Études de géographie physique* n°35 : 3-23.

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.

Références bibliographiques

- 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.

- 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., Urich 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.

Références bibliographiques

- 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, Landbouwniversiteit 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), p589-3600.
- 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 : Articulation interdisciplinaire du projet ZHTB (Phase 1, 2 et 3)	7
Figure 2 : Histoire simplifiée de la formation du complexe tourbeux du Luitel depuis la fonte des glaciers (Desplanque, 2011).....	12
Figure 3 : Localisation et emprise de la réserve naturelle du Luitel (Desplanque, 2011)	13
Figure 4 : La tourbière du col et les sous-bassins versants (Pascoletti, 2018)	14
Figure 5 : Carte des conductivités électriques (Pascoletti, 2018)	15
Figure 6. Géologie du Luitel (Barféty et al., 1972).....	16
Figure 7. a) Carte des profils d'acquisitions géophysiques (Garambois, 2008) b) Cartographie du socle minéral de la tourbière du Col du Luitel par interpolation des profils géophysiques (Ravatin, 2017)	17
Figure 8. a) Points de prélèvements de tourbe (Hustache, 2004), b) Tableau des caractéristiques de la tourbe selon les points de prélèvements (Hustache 2004).....	18
Figure 9. Diagramme ombrothermique du Luitel 2007 – 2016 (Ravatin, 2017)	18
Figure 10. Réseau hydrographique de la tourbière du Col du Luitel (Pascoletti, 2018).....	19
Figure 11. Habitats naturels de la tourbière du col basée sur la typologie CORINE-Biotopes. La dénomination spécifique de la légende diffère de celle de la typologie CORINE-Biotopes s'adapte ainsi à notre échelle de travail qui est relativement fine (Pascoletti, 2018).....	21
Figure 12. Espèces protégées sur la réserve de Luitel : a) <i>Carex limosa</i> , b) <i>Drosera rotundifolia</i> , c) <i>Scheuchzeria palustris</i>	21
Figure 13. Comparaison du comportement de piézomètre proche de fossé de drainage (P17) avec piézomètre éloigné de fossé de drainage (P3)	23
Figure 14. Instrumentation de la tourbière du Col du Luitel.....	24
Figure 15. Représentation schématique d'un piézomètre (Pascoletti, 2018).....	25
Figure 16. Courbe de tarage du ruisseau de Fontfroide (Laurent, 2007).....	26
Figure 17. Tableau trimestriel récapitulatif des données brutes disponibles et de leur disponibilité (rouge = pas de données, vert = disponible, jaune = données incomplètes)	27
Figure 18. Localisation de la tourbière de Frasne et de la zone instrumentée	28
Figure 19. (À gauche) Cartographie de la topographie du socle minéral de la tourbière active de Frasne (interpolation par Natural Neighbors, logiciel Surfer 10). Les traits blancs symbolisent les passerelles : au centre celle du SNO tourbières et à l'est celle des visiteurs. (Collin, 2016)	29
Figure 20. (À droite) Cartographie des épaisseurs de tourbe de la tourbière active de Frasne (Interpolation par Natural Neighbors, logiciel Surfer 10). (Collin, 2016).....	29
Figure 21. Description pédologique du site d'étude (adapté de Briot, 2004).....	30
Figure 22. Diagramme ombrothermique, mesures des températures et des précipitations (hors neige) pour la période novembre 2008 – décembre 2009 (Delarue, 2010)	30
Figure 23. Cartographie du réseau hydrologique de surface (Collin, 2016).....	31

Liste des figures et tableaux

Figure 24. Emplacement des piézomètres (Collin, 2016)	33
Figure 25. Localisation des sondes installées sur des cours d'eau (Collin, 2016).....	34
Figure 26. Tableau récapitulatif des données brutes disponibles et de leur disponibilité (rouge = pas de données, vert = disponible, orange = données manquantes)	34
Figure 27 : Représentation schématique du bilan théorique d'une tourbière	35
Figure 28 : représentation schématique d'un neurone formel. x est le vecteur des variables d'entrée, w la matrice des paramètres (coefficients synaptiques), $f()$ est la fonction d'activation et y la sortie	37
Figure 29 : représentation schématique du perceptron multicouche, ici à une couche de neurones cachés	38
Figure 30 : représentation schématique d'un réseau de neurones récurrent d'ordre r	38
Figure 31 : représentation schématique d'un approximateur universel.	40
Figure 32 : représentation schématique de la validation croisée ; soit un ensemble de données divisé en 7 sous-ensembles. 5 sont consacrés à la validation croisée (1 événement en validation V à chaque expérience et 4 événements en apprentissage A) donnant 5 scores dont on fait la moyenne et/ou la médiane pour obtenir le score de validation croisée S_v ; 1 est consacré à l'arrêt précoce (S) et un dernier est consacré à tester le modèle (T) sur un ensemble de données inconnu.	41
Figure 33 : Instrumentation hydrologique au Luitel.....	46
Figure 34 : Vue en plan des seuils jaugés installés au Luitel	47
Figure 35 : Données acquises avec les sondes au niveau des seuils amont et aval du ruisseau de Fontfroide	48
Figure 36 : Instrumentation sur la tourbière de Frasne	49
Figure 37 : Remplissage/vidage de la doline du Creux au lard.....	50
Figure 38. Organigramme des analyses statistiques	51
Figure 39. Exemple de courbe des débits classés (Kong a Siou, 2011)	52
Figure 40. Autocorrélogramme d'un signal de débit (Kong a Siou, 2011)	53
Figure 41. Exemple de corrélogramme croisé pluie-débit (d'après Kong a Siou et al., 2011)	54
Figure 42. Exemple de données relevées présentant a) un fort degré de bruit (données hauteur de neige), b) des incohérences (hauteurs piézométriques - station météorologique), c) des lacunes (données hauteur d'eau FF1).....	56
Figure 43 : apparition de la réalisation du critère de construction de pluies hybrides.	56
Figure 44. Traitement de l'évapotranspiration	57
Figure 45. Traitement des données de débits.....	57
Figure 46. Traitement des hauteurs du piézomètre de la station météorologique.....	58
Figure 47. Description statistique des pluies journalières	59
Figure 48. Description statistique des données d'évaporation journalières	59
Figure 49. Description statistique des débits journaliers de FF1 (en bleu) et RDL (en rouge) (septembre 2014- novembre 2018)	60
Figure 50. Comportement de la nappe en fonction des piézomètres (vert : battements de nappe faibles, orange : battements de nappe moyens, rouge : battements de nappe forts) (Pascoletti, 2018).....	61
Figure 51. Carte des niveaux piézométriques construite à partir des niveaux relevés le 25.06.2018 (Pascoletti, 2018).....	61

Figure 52. Description statistique des battements de nappe journaliers relevés par le piézomètre de la station météorologique	62
Figure 53. Autocorrélogramme du signal de pluie	63
Figure 54. Spectre des précipitations journalières a) échelle logarithmique b) échelle linéaire.	63
Figure 55. Autocorrélogramme du signal de débits issus de la sonde FF1	64
Figure 56. a) spectre des débits journaliers (échelle logarithmique) b) spectre des débits journaliers (échelle linéaire)	65
Figure 57. Autocorrélogramme du niveau piézométrique au piézomètre de la station météorologique	65
Figure 58. a) spectre du niveau piézométrique au piézomètre de la station météorologique (échelle logarithmique) b) spectre du niveau piézométrique au piézomètre de la station météorologique (échelle linéaire)	66
Figure 59. Autocorrélogramme du signal d'évapotranspiration	67
Figure 60. a) spectre des cumuls journaliers d'évapotranspiration (échelle logarithmique) b) spectre des cumuls journaliers d'évapotranspiration (échelle linéaire)	67
Figure 61. Corrélogramme croisé pluie-débits FF1 (les lignes horizontales en pointillés représentent les seuils de décorrélation théoriques), période novembre 2009- novembre 2018.	68
Figure 62. a) fonction de transfert en échelle logarithmique, b) fonction de transfert en échelles linéaire..	68
Figure 63. Corrélogramme croisé pluie-piézomètre de la station météorologique (les lignes horizontales en pointillés représentent les seuils de décorrélation théoriques), période juillet 2006- décembre 2018.	69
Figure 64. Graphe des fréquences des débits FF1 journaliers sur la période novembre 2009-décembre 2018	70
Figure 65. Répartitions des jours d'été sur la période novembre 2009- décembre 2018 : a) annuellement, b) mensuellement	70
Figure 66. Étude de la saisonnalité des temps de réponse et effet mémoire du ruisseau de Fontfroide	71
Figure 67. Analyse du coefficient d'écoulement pour les ruisseaux de Fontfroide et du lac : a) série temporelle ; b) Analyse de la saisonnalité	72
Figure 68. Analyse comparatives entre les sondes FF1 et FFAv : a) débits b) température, c) conductivité..	73
Figure 69. Analyse comparatives entre les sondes FFAm et FFAv : a) débits b) température, c) conductivité.	73
Figure 70. Comparaison entre la sonde FF1 et la sonde RDL a) débits, b) température, c) conductivité	74
Figure 71 : Trois réservoirs pour la modélisation des flux	77
Figure 72 : Schéma de synthèse du modèle conceptuel : flux et réservoirs	77
Figure 73 : Modèle complet réalisé avec le logiciel Vensim	78
Figure 74 : Modèle d'écoulement des fluides dans un réservoir poreux (Dewandel et al., 2002)	78
Figure 75 : Instrumentation de la tourbière du Col du Luitel	79
Figure 76 : Carte piézométrique de la tourbière du Col du Luitel (construite à partir des niveaux relevés le 25.06.2018)	79
Figure 77 : Débits participant au soutien d'été	80
Figure 78 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2014 :	81
Figure 79 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2015	81

Liste des figures et tableaux

Figure 80 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2016.....	82
Figure 81 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2016 (agrandissement de la partie encadrée de la figure précédente).....	82
Figure 82. Données utilisées pour modélisations à base de réseaux de neurones (Pluie avec neige est aussi dénommée pluie hybride dans le texte).....	85
Figure 83. Comparaison de l'évapotranspiration virtuelle avec l'évaporation mesurée, et l'évaporation fournie par le modèle SAFRAN-ISBA.....	85
Figure 84. Répartition des ensembles pour la modélisation (vert = apprentissage, bleu = arrêt, jaune = test)	86
Figure 85. Architecture du réseau choisi pour modéliser le débit de Fontfroide	87
Figure 86. Débits de Fontfroide : simulés versus observés	88
Figure 87. Architecture du réseau choisi pour modéliser le piézomètre P3	88
Figure 88. Niveaux piézométriques de P3 : simulés versus observés	89
Figure 89 : Principaux avantages et inconvénients des 2 principales méthodes géophysiques (ERT et GPR) mises en œuvre sur les tourbières	92
Figure 90 : Dispositif d'acquisition de données avec un GPR.....	93
Figure 91 : Topographie du fond (profils GPR 2007)	94
Figure 92 : Profils GPR 2007 et 2018	94
Figure 93 : Premiers résultats sur le profil P2 (GPR 2007) ou T1 (GPR 2018)	95
Figure 94 : Caractérisation des interfaces à l'aide des carottes pédologiques (profil P6 – GPR 2007 ou T6 – GPR 2018)	95
Figure 95 : Données géophysiques sur la tourbière de Frasne	96
Figure 96 : Prospection ERT du Creux au Lard (Bichet, 2015)	97
Figure 97 : Profils géophysiques prévus sur Frasne	97
Figure 98 : Profils test réalisés en janvier 2019.....	98
Figure 99 : Premiers résultats et validation à l'aide des sondages à la perche.....	98
Figure 100 : Paramètres hydrophysiques généraux pour une tourbière haute à sphaignes (Wastiaux, 2008)	101
Figure 101 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrologique supposé d'une tourbière de tête de bassin versant en contexte granitique (socle imperméable). Ce fonctionnement est aussi possible en contexte calcaire avec plancher argileux (ex : Tourbière de Frasne).	101
Figure 102 : Principe de fonctionnement du carottier Russe (Guiter et al. 2013)	103
Figure 103 : Matériels de prélèvement et de stockage du sédiment (25/04/2018)	103
Figure 104 : Zone sud de la tourbière du col – prairie à Molinies bleues (Cubizolle, 2018)	104
Figure 105 : Présentation des écosystèmes du Luitel (exemples)	106
Figure 106 : Stratigraphie des points de prélèvements au carottier Russe – Tourbière du col – RNN du Lac Luitel (voir stratigraphie ci-après)	107
Figure 107 : Collection de cartes des faciès édaphiques de la tourbière du col.	109
Figure 108 : Synthèse des « zones réservoirs » susceptibles d'assurer un étiage	111
Figure 109 : Hypothèses sur les secteurs contribuant au faible soutien d'étiage.....	111

Figure 110 : Coupe paléo stratigraphique simplifiée du transect P6-Point S4 – tourbière du col.....	113
Figure 111 : Extrait de la carte géologique au 1/50000 ^{ème} . La zone humide de Luitel est localisée par le triangle rouge	115
Figure 112 : Carte simplifiée de la réserve naturelle du Lac Luitel (Desplanque, 2001, publié dans Guiter et al. 2015).	115
Figure 113 : Localisation des point d'échantillonnage, les piézomètres de la zone humide sont notés PXX, les fossés/drains sont notés FoX, le ruisseau de Fontfroide est noté FF (AMBV= amont bassin versant, SAV=seuil aval, SAM : seuil amont, CE : centre) ; CAP=captage	115
Figure 114 : Digramme de Piper reportant les abondances relatives des espèces ioniques majeures : cations (triangle de gauche) et anions (triangles de droites)	118
Figure 115 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff représentant les concentrations des eaux prélevées en différents points du ruisseau de Fontfroide et dans les eaux du captage. Les concentrations sont reportées en mg/L sur une échelle logarithmique, l'équivalence en meq/L peut être lue sur l'échelle de gauche.....	119
Figure 116 : Diagrammes de Schoeller-Berkaloff reportant les différents regroupements qui peuvent être envisagés pour les eaux collectées sur la zone de Luitel. Se reporter à la Figure 113 pour la localisation des points de prélèvements.	120
Figure 117 : Diagramme binaire Ca=f(Na). Les concentrations sont exprimées en mg/L.....	121
Figure 118 : Représentation des différents groupes hydrogéochimiques définis à partir des diagrammes de Schoeller-Berkaloff	122
Figure 119 : Diagramme δD vs $\delta^{18}O$ reportant les données acquises sur les eaux collectées sur la zone du Luitel. La droite des eaux météoriques mondiales (WMMWL, trait plein épais noir), les droites des eaux météoriques locales de Thonon (trait pointillés, Thonon MWL, IAEA) et de Genève (, trait plein fin, Genève MWL, Halder et al., 2013), la droite des eaux météoriques de la partie occidentale du bassin méditerranéen (tirets, Celle et al., 2000) sont reportées à titres informatif.	123
Figure 120 : Diagramme δD et $\delta^{18}O$ reportant le détail des données obtenues sur les eaux de ruissellement et souterraines du Luitel. Les symboles carrés représentent les cours d'eau, les drains et le captage, les triangles les eaux des piézomètres. Le remplissage des symboles est celui adopté sur la figure 7 définissant des similitudes de faciès chimiques. Pour la signification des libellés de point se reporter à la Figure 113.....	124
Figure 121 : Principe de l'instrumentation du bassin du Madrès	132
Figure 122 : Instrumentation du bassin du Madrès	133
Figure 123 : Lac tourbière de Luitel (décembre 2016)	137
Figure 124 : Tourbière vivante de Frasne (mars 2017)	137
Figure 125 : Fonctionnement hydrologique du complexe tourbeux de Luitel : schéma conceptuel.....	149

Liste des tableaux

Tableau 1 : 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).....	4
Tableau 2 : Synthèse des travaux de la phase 1 : points clefs et points de vigilance	5
Tableau 3. Paramètres mesurés par la station et capteurs correspondant (Pascoletti, 2018)	24
Tableau 4. Caractéristiques des piézomètres (adapté de Hustache, 2004)	25
Tableau 5. Caractéristiques des sondes installées sur les cours d'eaux de la réserve de Luitel	26
Tableau 6. Principaux indicateurs statistiques de la série chronologique de pluie journalière (en mm) pour la période juillet 2006 à novembre 2018. Le cumul correspond à la moyenne des valeurs annuelles.	59
Tableau 7. Principaux indicateurs statistiques de la série chronologique de débit journalier (en l.s ⁻¹) pour la période 2014 à 2018. La moyenne, la médiane, le minimum et le maximum correspondent aux moyennes des valeurs annuelles.....	60
Tableau 8. Matrice de corrélation entre les hauteurs des piézomètres	62
Tableau 9. Tableau des indicateurs statistiques liés aux piézomètres suivis continuellement (PM et P20_Diver sont considérés comme défaillants, P20_Solinst présente une courte profondeur temporelle (octobre 2017- novembre 2018))	72
Tableau 10 : Comparaison des moyennes des débits de Fontfroide et de soutien d'étiage par période.....	81
Tableau 11 : Débits moyens annuels et module interannuel de Fontfroide.....	82
Tableau 12 : Justificatif du plan d'échantillonnage de la tourbière du col Luitel.....	102
Tableau 13 : Enregistrement des précipitations sur la zone humide du Luitel entre le 29 septembre et le 7 novembre 2018 (Date et hauteur de précipitation)	116
Tableau 14 : Exemples d'indicateurs de soutien d'étiages de zones humides à l'échelle du site.....	128
Tableau 15 : Caractéristiques des 2 couples de bassins versants	132
Tableau 16 : Exemples d'indicateurs de soutien d'étiages de zones humides à l'échelle du bassin versant	135
Tableau 17 : Taux de réalisation des tâches de la phase 1.....	139
Tableau 18 : Bilan des tâches effectuées au Luitel en phase 2 du projet ZHTB	150
Tableau 19 : Bilan des tâches effectuées à Frasne en phase 2 du projet ZHTB	151
Tableau 20 : Bilan des stages et post-doc de la phase 2 du projet ZHTB	152
Tableau 21 : Stages et post-doc prévus pour la phase 3 du projet ZHTB.....	152

Table des matières complète

Fiche signalétique.....	I
Table des matières synthétique	III
Résumé	V
Acronymes, sigles et abréviations.....	VII
Préambule.....	IX
Remerciements	XI
INTRODUCTION	1
1. Objectifs, planification, résultats clefs de la phase 1.....	1
1.1. <i>Problématique, finalités et objectifs</i>	1
1.2. <i>Phases de l'étude</i>	2
1.3. <i>Phase 1 : Sélection des compétences et des sites, état de l'art</i>	2
1.3.1. Présentation synthétique de la phase 1.....	2
1.3.2. Résultats et points clefs de la phase 1	3
1.4. <i>Phase 2 : Mesures et instrumentation</i>	6
1.4.1. Présentation synthétique de la phase 2.....	6
1.4.2. Points clefs pour la mise en œuvre de la phase 2	6
1.5. <i>Phase 3 : Analyse, interprétation du fonctionnement, mise en évidence du rôle de soutien d'étiage et préconisations en matière de gestion</i>	8
2. Organisation du rapport phase 2 (2017-2019)	9
PARTIE I – Présentation des sites d'étude et compléments bibliographiques.....	11
1. Présentation des sites d'étude	12
1.1. <i>Tourbière de Luitel</i>	13
1.1.1. Situation géographique et typologie.....	13
1.1.1.1. Situation géographique	13
1.1.1.2. Typologie	14
1.1.2. Géologie.....	15
1.1.2.1. Généralités	15
1.1.2.2. Géomorphologie	16
1.1.2.3. Pédologie.....	17
1.1.3. Climatologie.....	18
1.1.4. Hydrologie et hydrogéologie	19
1.1.5. Habitats	20
1.1.6. Socio-économie	21
1.1.7. Risques.....	22
1.1.8. Suivi de la tourbière	23
1.1.8.1. Données météorologiques	23
1.1.8.2. Données piézométriques	25
1.1.8.3. Données sur les cours d'eau.....	26
1.1.8.4. Disponibilité des données	26
1.2. <i>Tourbière de Frasne</i>	28
1.2.1. Situation géographique et typologie.....	28
1.2.2. Géologie.....	28

Table des matières complète

1.2.2.1. Généralités	28
1.2.2.2. Géomorphologie	29
1.2.2.3. Pédologie.....	30
1.2.3. Climatologie.....	30
1.2.4. Hydrologie	30
1.2.5. Habitats	31
1.2.6. Socio-économie	31
1.2.7. Risques.....	32
1.2.8. Suivi de la tourbière	32
2. Compléments bibliographiques sur un paramètre clef du bilan hydrologique (ETP) et la modélisation par réseaux de neurones	35
2.1. <i>Point sur l'ETP</i>	35
2.2. <i>Modélisation par Réseaux de neurones</i>	37
2.2.1. Généralités	37
2.2.1.1. Le neurone	37
2.2.1.2. Réseaux de neurones	37
2.2.1.2.1. Réseaux statiques.....	38
2.2.1.2.2. Réseaux dynamiques ou récurrents.....	38
2.2.1.2.3. Choix du type de réseau : bruit de sortie ou bruit d'état.....	39
2.2.2. Propriétés fondamentales des réseaux de neurones.....	39
2.2.2.1. L'approximation universelle	39
2.2.2.2. La parcimonie	40
2.2.3. Apprentissage des réseaux de neurones	40
2.2.3.1. Minimisation de la fonction de coût	40
2.2.3.2. Le surajustement.....	40
2.2.3.2.1. Estimation de l'erreur de généralisation : la validation croisée..	40
2.2.3.2.2. L'arrêt précoce	41
2.2.3.2.3. La sélection de variables	41
2.2.4. Applications à l'hydrologie.....	42
PARTIE II – Volet Hydrologie	43
1. Partage de données et suivis existants.....	44
1.1. <i>Tourbière de Luitel</i>	44
1.2. <i>Tourbière de Frasne</i>	44
1.3. <i>Autres projets en lien</i>	45
2. Instrumentation et mesures pour le suivi hydrologique	46
2.1. <i>Tourbière de Luitel</i>	46
2.2. <i>Tourbière de Frasne</i>	49
3. Analyse statistique des données hydrologiques	51
3.1. <i>Tourbière de Luitel</i>	51
3.1.1. Principe	51
3.1.2. Objectifs.....	51
3.1.3. Matériel et méthode(s)	51
3.1.3.1. Indicateurs statistiques hydrologique : le coefficient d'écoulement	51
3.1.3.2. Étude des débits classés.....	52
3.1.3.3. Analyse temporelle	52
3.1.3.3.1. Corrélogramme simple.....	52
3.1.3.3.2. Corrélogramme croisé.....	53
3.1.3.4. Analyse fréquentielle	54
3.1.3.4.1. Spectre simple.....	54
3.1.3.4.2. Fonction de transfert	55
3.1.3.5. Méthode de prétraitement des signaux.....	55
3.1.3.5.1. Introduction	55
3.1.3.5.2. Méthodes de filtrage et complétion de données.....	55
3.1.4. Présentation des premiers résultats	56

3.1.4.1.	Description des traitements faits sur les données brutes.....	56
3.1.4.2.	Description statistiques descriptives.....	58
3.1.4.2.1.	Pluie.....	58
3.1.4.2.2.	Évapotranspiration.....	58
3.1.4.2.3.	Débits	60
3.1.4.2.4.	Piézomètres.....	61
3.1.4.3.	Analyse simple.....	62
3.1.4.3.1.	Pluie.....	62
3.1.4.3.2.	Débits	64
3.1.4.3.3.	Piézomètres.....	65
3.1.4.3.4.	Évapotranspiration.....	66
3.1.4.4.	Analyses croisées.....	67
3.1.4.4.1.	Pluie-débits FF1	67
3.1.4.4.2.	Pluie-piézomètres	69
3.1.5.	Premières conclusions.....	69
3.1.5.1.	Débits/période d'étéages.....	69
3.1.5.2.	Saisonnalité des index d'analyse corrélatoire.....	70
3.1.5.3.	Coefficient d'écoulement	71
3.1.5.3.1.	Analyse comparative	71
3.1.5.3.2.	Saisonnalité	71
3.1.5.3.3.	Analyse de la nappe	72
3.1.6.	Comparaison entre sondes installées sur le ruisseau de Fontfroide	72
3.1.6.1.	Comparaison des sondes FF1 et FFAv	72
3.1.6.2.	Comparaison des FFAm et FFAv	73
3.1.6.3.	Comparaison des FF1 et RDL.....	74
3.2.	<i>Tourbière de Frasne</i>	74
4.	Modélisation du rôle de soutien d'étéage	75
4.1.	<i>Modèles réservoirs – modélisation du soutien d'étéage au Luitel</i>	75
4.1.1.	Fondements du modèle conceptuel pour la modélisation du soutien d'étéage	75
4.1.2.	Mise en œuvre et validation du modèle	76
4.1.3.	Résultats : une première quantification du soutien d'étéage au Luitel	80
4.1.4.	Discussion.....	82
4.1.5.	Conclusion	84
4.2.	<i>Réseaux de neurones</i>	85
4.2.1.	Objectifs.....	85
4.2.2.	Données	85
4.2.3.	Méthode de sélection des modèles	86
4.2.3.1.	Simulations effectuées	86
4.2.3.2.	Complexité et Architecture	86
4.2.3.3.	Sélection des ensembles d'apprentissage, d'arrêt précoce, test et validation croisée	86
4.2.4.	Présentation des modèles choisis	86
4.2.4.1.	Modélisation du ruisseau de Fontfroide	86
4.2.4.2.	Modélisation de piézomètres.....	88
4.2.5.	Perspectives pour la phase 3	89

PARTIE III – Volets géophysique, pédologie, géochimie91

1.	Volet géophysique	92
1.1.	<i>Éléments bibliographiques</i>	92
1.2.	<i>Matériel et méthode</i>	92
1.3.	<i>Tourbière de Luitel</i>	94
1.3.1.	Protocole d'acquisition de données géophysique.....	94
1.3.2.	Premiers résultats	95
1.4.	<i>Tourbière de Frasne</i>	95
1.4.1.	Protocole d'acquisition de données géophysique.....	96

Table des matières complète

1.4.2. Premiers résultats	98
1.5. Conclusion et perspectives	99
2. Volet pédologie	100
2.1. Notions clefs : fonctionnement hydrogéomorphologique des tourbières de têtes de bassins	100
2.2. Matériel et méthode	102
2.2.1. Mesures in situ et échantillonnages.....	102
2.2.2. Analyses en laboratoires : mesures physiques	104
2.2.3. Vue en plan et vue en coupe de la stratigraphie de la tourbière du col	105
2.3. Résultats	105
2.3.1. Texture et stratigraphie	105
2.3.2. Les faciès pédologiques à partir des groupements végétaux simplifiés	106
2.4. Discussion	110
2.4.1. Interprétation des résultats	110
2.4.2. La question du soutien d'étéage	110
2.5. Conclusion et perspective	112
3. Volet géochimie	114
3.1. Tourbière de Luitel	114
3.1.1. Contexte	114
3.1.2. Campagne d'échantillonnage	114
3.1.3. Les traceurs géochimiques utilisés	116
3.1.3.1. Éléments majeurs	116
3.1.3.2. Les isotopes de l'eau	116
3.1.4. Les méthodes analytiques	117
3.1.4.1. Les mesures de terrain	117
3.1.4.2. Les ions majeurs	117
3.1.4.3. Les isotopes de l'eau	117
3.1.5. Discussion autour des résultats	117
3.1.5.1. pH et conductivité.	117
3.1.5.2. Concentrations en éléments majeurs	118
3.1.5.3. Les isotopes de l'eau	123
3.1.6. Conclusion et perspectives.....	124
3.2. Tourbière de Frasne.....	125
PARTIE IV – Indicateurs du potentiel de soutien d'étéage.....	127
1. Indicateurs à l'échelle du site	127
2. Indicateurs à l'échelle du bassin versant	131
2.1. Zones humides du haut bassin-versant de l'Aude.....	131
2.2. Volet géomatique : indicateurs du potentiel de soutien d'étéage des zones humides à l'échelle du bassin versant	134
CONCLUSION.....	139
1. Bilan du travail de la phase 2	139
1.1. Avancement et taux de réalisation	139
1.2. Bilan : volet hydrologique	140
1.2.1. Analyse statistiques des données hydrologiques (Luitel).....	140
1.2.2. Modèles réservoirs (Luitel)	141
1.2.3. Réseaux de neurones (Luitel).....	142
1.2.4. Éléments complémentaires concernant le volet hydrologique	143
1.3. Bilan : Volet géophysique (Luitel et Frasne)	143
1.4. Bilan : volet pédologique (Luitel) – articulation avec le volet géophysique.....	144
1.5. Volet géochimie (Luitel).....	145
1.6. Bilan général	147
1.6.1. Bilan au Luitel	147

1.6.2. Bilan Frasne	150
1.6.3. Bilan des stages et post-doc (phase 2 et planification phase 3).....	152
2. Mise en œuvre et objectifs de la phase 3	153
2.1. Conduite des objectifs à terme.....	153
2.2. Objectifs de la phase 3.....	153
Références Bibliographiques – Phase 2	155
Générales	155
Tourbière de Luitel (Partie I - 1.1. Tourbière de Luitel, p13)	156
Tourbière de Frasne (Partie I - 1.2. Tourbière de Frasne, p28).....	157
ETP (Partie I - 2.1. Point sur l'ETP, p35).....	158
Réseaux de neurones (Partie I - 2.2. Modélisation par Réseaux de neurones, p37 et Partie II - 4.2. Réseaux de neurones, p85).....	158
Statistiques hydrologiques (Partie II - 3. Analyse statistique des données hydrologiques, p51)...	159
Modèles réservoirs (Partie II - 4.1. Modèles réservoirs – modélisation du soutien d'été au Luitel, p75)	159
Géophysique (Partie III - 1. Volet géophysique, p92)	161
Pédologie (Partie III – 2. Volet pédologie, p100).....	161
Géochimie (Partie III - 3. Volet géochimie, p114)	162
Références Bibliographiques – Phase 1	165
Contexte, définitions et typologies.....	165
Bilan et rôle hydrologique.....	168
Liste des figures et tableaux	177
Liste des figures	177
Liste des tableaux.....	182
Table des matières complète.....	183
Tables des matières des Annexes	189

Tables des matières des Annexes

Annexe 1 : Fiches projets	1
A1.1. Fiche action recherche valorisation n°51 – Phase 1 (2016-2017)	1
A1.2. Fiche action recherche valorisation n°56 – Phase 2 (2017-2018)	6
A1.3. Fiche action recherche valorisation n°68 – Phase 3 (2019-2021)	11
Annexe 2 : Fiches de synthèse Zabré	21
A2.1. Fiche de synthèse Zabré - Phase 1 (2016-2017)	22
A2.2. Fiche de synthèse Zabré - Phase 2 (2017-2019)	24
Annexe 3 : Compte-rendu de terrains et de réunions	26
A3.1. Réunion de démarrage phase 1 : 3 mars 2016	26
A3.2. Réunion technique CEN Savoie : 19 avril 2016	31
A3.3. Comité technique - 14 avril 2017	34
A3.4. Réunion-Visite de terrain- tourbière de Montselgues : 12 juillet 2016	38
A3.5. Réunion-Visite de terrain – Tourbière de Luitel : 12 décembre 2016	43
A3.6. Réunion-Visite de terrain – Plateau de Gavot : 7 mars 2017	57
A3.7. Réunion-Visite de terrain – Marais de Vaux : 23 mars 2017	72
A3.8. Réunion-Visite de terrain- Tourbière de Frasné : 29 mars 2017	86
A3.9. Réunion-Visite de terrain- Tourbière de Luitel : 26 octobre 2017	103
A3.10. Réunion-Visite de terrain- Tourbière de Frasné : 9 novembre 2017	120
Annexe 4 : Critères de sélection des sites de zones humides	140
Annexe 5 : Personnes impliquées ou contactées (ZHTB phases 1, 2 et 3)	141
A5.1. Comité de pilotage	141
A5.2. Sites d'études	141
A5.3. Autres sites complémentaires potentiels	142
A5.4. Chercheurs de l'équipe projet	142
A5.5. Site zones humides de la haute-vallée de l'Aude	143
A5.6. Post-doc et stagiaires	143
Annexe 6 : Comité de pilotage	144
A6.1. Comité de pilotage phase 1 _ Juin 2017	144
A6.2. Comité de pilotage phase 2 – Février 2019	155
Annexe 7 : Poster du projet	164
A7.1. Poster du projet	164
A7.2 : Présentation type phase 1	165
7.3 : Présentation type phase 2	173
Annexe 8 : Typologies de zones humides	184
A8.1. Typologie de zones humides applicables aux Sdage et aux Sage	184
A8.2. Classification des zones humides de Ramsar	185
A8.3. Système hiérarchique de description des habitats de zones humides MedWet	186
A8.4. Comparaison des classifications de zones humides	187
Annexe 9 : Solutions analytiques et séparation des contributions	188
Annexe 10 : Sujet de stage de master EMSE phase 3	190

