

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 - SYM 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 Paran, 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)

Juillet 2019

Fiche signalétique (à actualiser)

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 : **Juillet 2019**

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 (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 : SYM Haut-Doubs Haute-Loue (Geneviève Magnon, Louis Collin, 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	XX	Nb de pages hors Annexes	169
Diffusion	Zabr / AE-RMC	Nb d'illustrations hors Annexes	124 figures et 23 tableaux
Nb de volumes	2	Nb d'Annexes	9

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

Table des matières synthétique

Fiche signalétique (à actualiser)	I
Table des matières synthétique	III
Résumé (à actualiser)	V
Acronymes, sigles et abréviations (à actualiser)	VII
Préambule (à actualiser)	IX
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	10
1. Présentation des sites d'étude (à finaliser)	11
2. Compléments bibliographiques	34
PARTIE II – Volet Hydrologie	41
1. Partage de données et suivis existants (à compléter)	42
2. Instrumentation et mesures pour le suivi hydrologique	43
3. Analyse statistique des données hydrologiques	48
4. Modélisation du rôle de soutien d'été	72
PARTIE III – Volets géophysique, pédologie, géochimie	87
1. Volet géophysique	88
2. Volet pédologie	96
3. Volet géochimie	110
PARTIE IV – Indicateurs du potentiel de soutien d'été	121
1. Indicateurs à l'échelle du site (à compléter)	121
2. Indicateurs à l'échelle du bassin versant (à compléter)	124
CONCLUSION (à compléter)	131
1. Bilan du travail de la phase 2 (à compléter)	131
2. Mise en œuvre et objectifs de la phase 3 (à compléter)	138
Références Bibliographiques (à actualiser)	141
Liste des figures et tableaux	157
Table des matières complète	163
Tables des matières des Annexes (à actualiser)	169

Résumé (à actualiser)

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

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

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

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

Acronymes, sigles et abréviations (à actualiser)

AE-RMC : Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse	MES : Matière en suspension
AE-SN : Agence de l'eau Seine Normandie	MNHN : Museum National d'Histoire Naturelle
AFB : Agence française pour la biodiversité	MNT : Modèle numérique de terrain
Afes : Association française pour l'étude des sols	MTES : Ministère de la transition écologique et solidaire
AM : Arrêté ministériel	NRCS : Natural resources conservation service
ANR : Agence nationale de la recherche	ONF : Office National Des Forêts
BO : Bulletin officiel	Ospar (Convention) : Protection du milieu marin de l'Atlantique du nord-est
BV : Bassin versant	P : précipitations
CAEi : Conseil aménagement espace ingénierie	PEE (modèle) : Zones humides potentielles, effectives, efficaces
Cen : Conservatoires d'espaces naturels	PER (modèle) : Pressions-État-Réponses
Corine (land cover) : Inventaire biophysique de l'occupation des terres	Piren Seine : Programme interdisciplinaire de recherche sur l'eau et l'environnement du bassin de la Seine
CPCS : Commission de pédologie et de cartographie des sols	PNR : Parc naturel régional
DCE : Directive cadre européenne sur l'eau	PNRZH : Programme national de recherche sur les zones humides
DEA : Denitrification enzyme activity	QMNA : Moyenne des débits journaliers du mois d'étiage
Deb : Direction de l'eau et de la biodiversité	Rhomo : Observatoire de l'évolution du bon état des zones humides sur le bassin Rhône Méditerranée
EPA : Environmental protection agency)	RMC : Rhône Méditerranée et Corse
ERC (principe) : Éviter, Réduire, Compenser	Sage : Schéma d'aménagement et de gestion des eaux
Eso : Eau souterraine	Sandre : Service d'administration national des données et référentiels sur l'eau
Esu : Eau de surface	Sdage : Schéma d'aménagement et de gestion des eaux
ET : Évapotranspiration	Seq : Système d'évaluation de la qualité
ETP : Évapotranspiration potentielle	SIG : Système d'information géographique
ETR : Évapotranspiration réelle	SNO : Service national d'observation
EU : European Union	SNPN : Société nationale de Protection de la Nature
Eunis : European nature information system	SPN : Service du patrimoine naturel
FCBN : Fédération des conservatoires botaniques nationaux	SWI : débit entrant de surface
Geppa : Groupe d'étude des problèmes de pédologie appliquée	SWO : débit sortant de surface
GES : Gaz à effet de serre	UHC : Unité hydraulique cohérente
Gewex : Global energy and water cycle exchanges)	UICN : Union internationale pour la conservation de la nature
GHZH : Groupe d'histoire des zones humides	UK : United Kingdom
Gis : Groupement d'intérêt scientifique	US : United States
GPS : Global positioning system	USA : United States of America
GWDTE : Groundwater dependent terrestrial ecosystems	VCN : Débits d'étiage annuels au pas de temps journalier
GWI : débit entrant souterrain	WetMec : Wetland water supply mechanisms
GWO : débit sortant souterrain	Zabr : Zone atelier bassin du Rhône
Habref : Référentiel national des habitats	ZH : Zones humides
HGM : Hydrogeomorphic approach	ZHTB : Zones humides de têtes de bassins versants
IBK : Indice Beven-Kirby	
IDPR : Indice de persistance des réseaux	
IGN : Institut géographique national	
INPN : Inventaire national du patrimoine naturel	
Lidar : Light detection and ranging	
Medde : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie	
MedWet : Zones humides méditerranéennes	
Meem : Ministère de l'environnement et de la mer	

Préambule (à actualiser)

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

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

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

À suivre...

+ REMERCIEMENTS A INTÉGRER

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

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

INTRODUCTION

Cette introduction est construite en deux parties. La première rappelle de manière synthétique les éléments contenus dans les fiches projets Zab/ 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 :

- 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, 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). 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 :

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 ?

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

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

Introduction

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 (questionnaires) 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 minérotrophe/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 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

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. Zab, AE-RMC, UMR 5600 EVS, Mines Saint-Etienne, 117p + annexes.

Introduction

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	<ul style="list-style-type: none"> - 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) 	<ul style="list-style-type: none"> - Propriétés hydrodynamiques (K / S) des parties inférieures de l'acrotelme (perméabilité intermédiaire entre 10^{-3} et 10^{-5} m.s⁻¹)
	Transitoires	<ul style="list-style-type: none"> - Forte ETP (libère de l'espace disponible pour le stockage en période sans précipitation) - Travaux de drainage (effet seulement à court terme) 	<ul style="list-style-type: none"> - Travaux de drainage (effet seulement à court terme)
	Conditionnels	<ul style="list-style-type: none"> - Si fort volume de l'acrotelme (l'épaisseur étant toujours faible, la compensation peut se faire par des grandes surfaces) 	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - Faible épaisseur de l'acrotelme (faible volume disponible pour le stockage) - Propriétés hydrodynamiques (S) du catotelme (faible capacité de stockage) 	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - Fréquence élevée de hauts niveaux piézométriques (peu d'espace de stockage disponible) - Travaux de drainage (effet à long terme) 	<ul style="list-style-type: none"> - Travaux de drainage (effet à long terme)
	Conditionnels	<ul style="list-style-type: none"> - Si présence d'écoulement préférentiel en conduits souterrains (écoulement souterrain rapide) 	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - forte diversité de milieux - forte potentialité biologique - présence d'eau permanente ou temporaire 	<ul style="list-style-type: none"> - différence zones humides / milieux humides - définitions différentes selon l'approche
Typologies de zones humides	<ul style="list-style-type: none"> - 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 	<ul style="list-style-type: none"> - types intermédiaires (milieux mixtes, mosaïques) - évolution/nouvelles des typologies - changement de type en fonction de l'évolution de la connaissance du milieu
Contexte	<ul style="list-style-type: none"> - 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...) 	<ul style="list-style-type: none"> - développement d'indicateurs contexte dépendant
Têtes de bassins versants	<ul style="list-style-type: none"> - milieux sensibles (notamment zones humides tourbeuses) et zones à forts enjeux - importance de l'échelle considérée 	<ul style="list-style-type: none"> - entités difficiles à cartographier
Étude des zones humides et du soutien d'étiage	<ul style="list-style-type: none"> - 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 	<ul style="list-style-type: none"> - à l'heure actuelle, à notre connaissance, il n'existe pas d'indicateur fiable du soutien d'étiage
Bilan hydrologique	<ul style="list-style-type: none"> - flux d'eau (dynamique) entrant et sortant de la zone humide - modalités d'alimentation (eau de surface, eau souterraine, pluie) / constitution d'un stock d'eau dans la zone humide en période humide - modalités de restitution (eau souterraine, eau de surface, évapotranspiration) / restitution du stock d'eau de la zone humide en période sèche - paramètres et variables d'importance : perméabilité, coefficient d'emmagasinement, teneur en eau libre, teneur en eau utile, volume de réserve, pente, gradient hydraulique, conditions aux limites... 	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - 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/rétractation) : 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 	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - 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 	<ul style="list-style-type: none"> - 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 doit 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.

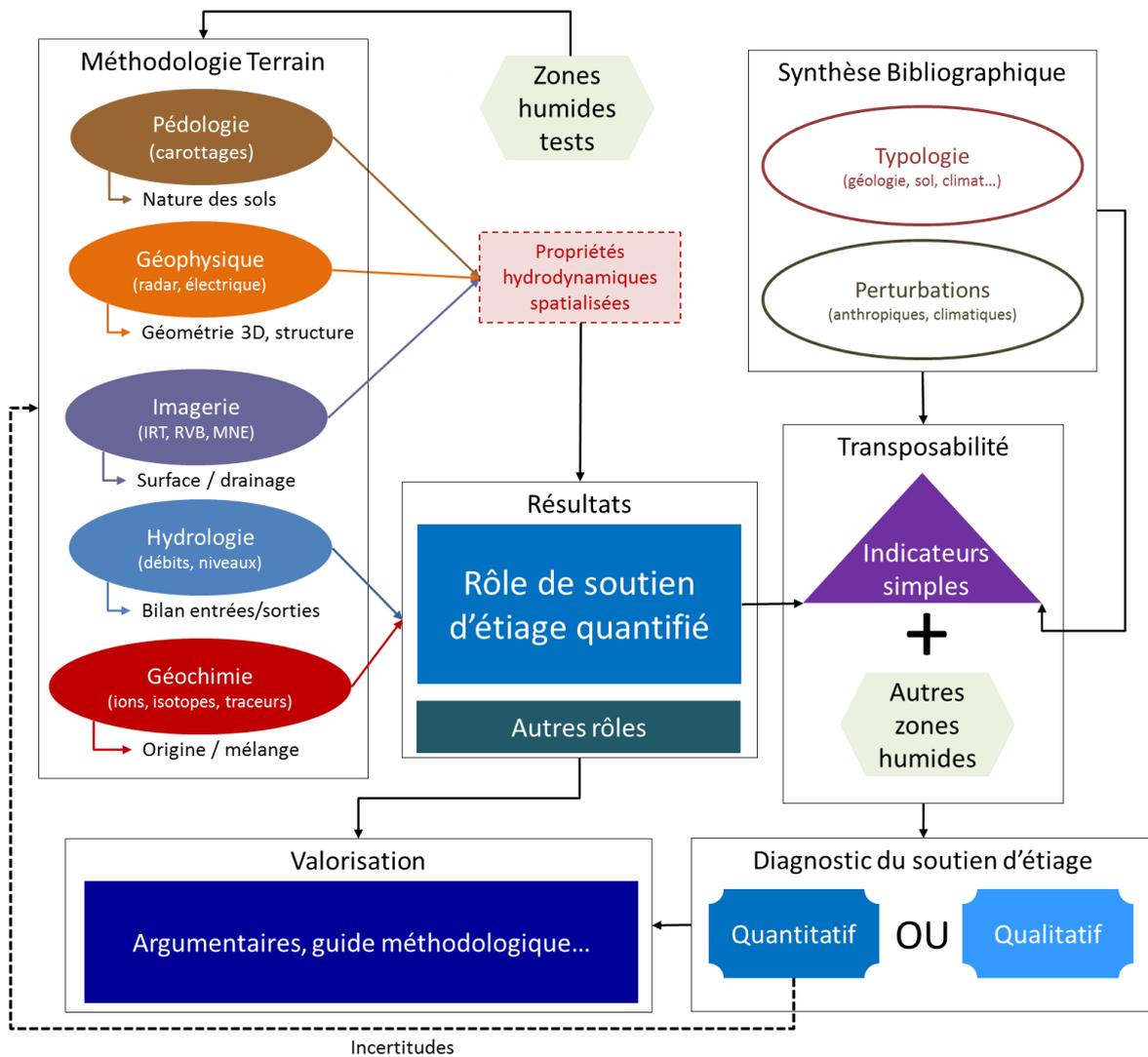


Figure 1 : Articulation interdisciplinaire du projet ZHTB (Phase 1, 2 et 3)

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

- 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 Frasné 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 suivantes :

- 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 est 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 hydrologique 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 clés 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	p11
1.1. Tourbière de Luitel	p12
1.2. Tourbière de Frasne	p26
2. Compléments bibliographiques	p34
2.1. Point sur l'ETP	p34
2.2. Réseaux de neurones	p35

1. Présentation des sites d'étude (à finaliser)

La formation 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 métamorphique et calcaire, commence à la même période : la fonte des glaciers. La disparition des glaciers marque le point de départ de la formation des complexes tourbeux des 2 sites.

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, 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.

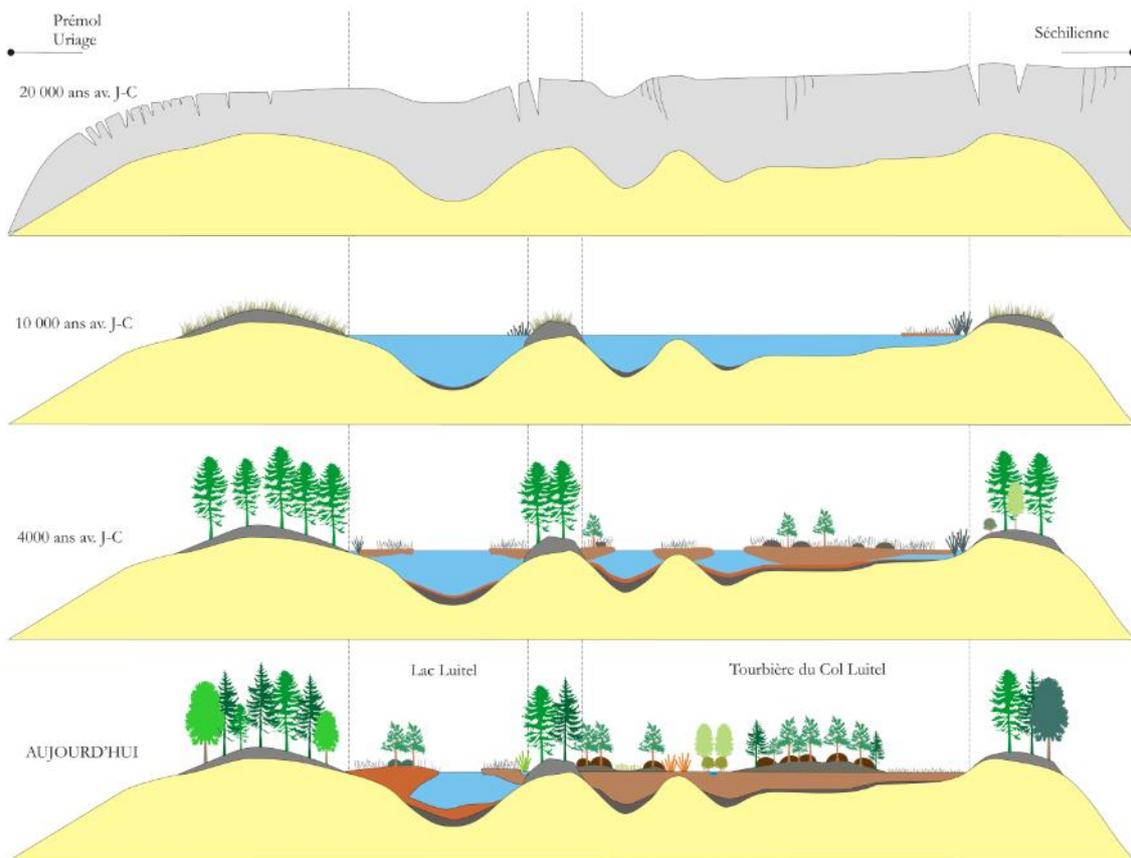


Figure 2 : Histoire de la formation du complexe tourbeux du Luitel depuis la fonte des glaciers (Desplanque, 2011)

1.1. Tourbière de Luitel

1.1.1. Présentation rapide du site de Luitel

Ce site est constitué principalement de tourbières acides à sphaignes :

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

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

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

Le Tableau 3 présente les principaux éléments de synthèse décrivant le site de Luitel.

Localisation	20 km au sud-est de Grenoble (Isère)
Altitude	1 250 m
Age	12 000 ans
Surface	10 ha
Épaisseur	1 à 10 m
Type de milieu	tourbière bombée, tourbière boisée, radeaux flottants et milieux annexes
Géologie	métamorphique, glaciaire
Flux entrant	pluie (principalement), apports de versant, eau souterraine (par le fond ? latéral ?)
Flux sortant	cours d'eau et ETP, eau souterraine (recharge ?)
Faïlles	pertes
Aménagements/usage	fossés de drainage, prés communs
Données disponibles et instrumentation	Météo depuis 2006 Piézomètres : relevé estival depuis 2002 ; 6 capteurs de pression depuis 2013 Jaugeage exutoire : depuis 2013 LIDAR ...
Autres	Soutien logistique / scientifique Accès facile

Tableau 3 : Présentation rapide du site de Luitel : éléments de synthèse

1.1.2. Situation géographique et typologie

1.1.2.1. Situation géographique

La tourbière de Luitel fait partie de la réserve naturelle du Luitel (Figure 3 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), 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 borde 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 de la tourbière ne s'écoule pas dans la tourbière, la route construite jouant le rôle d'une digue.

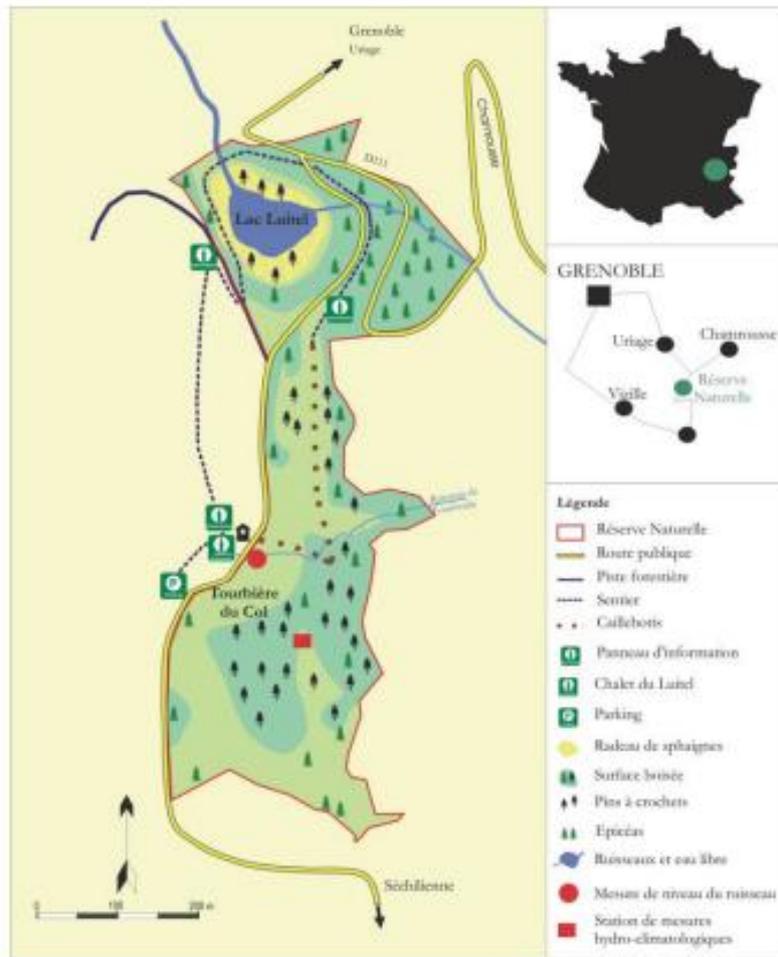


Figure 3 : Localisation et emprise de la réserve naturelle du Luitel (Laurent et al., 2012)

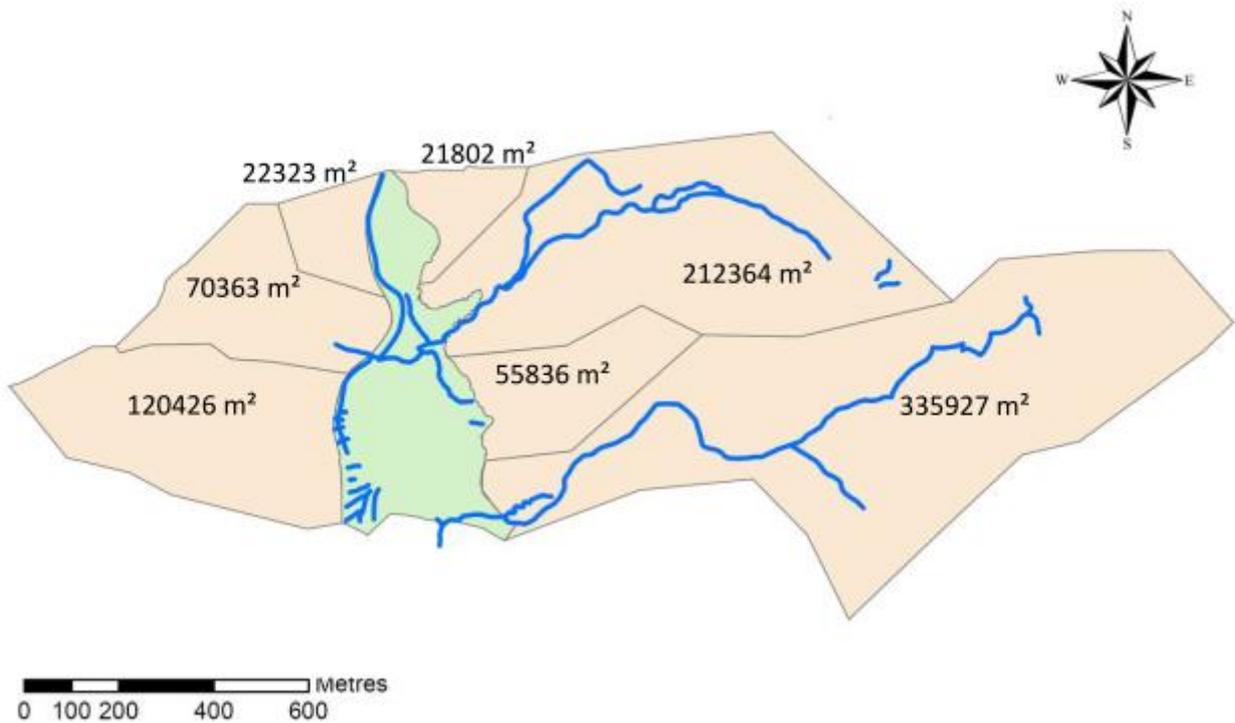


Figure 4 : La tourbière du col et les sous-bassins versants (Pascoletti, 2018)

1.1.2.2. Typologie

La tourbière du Col du Luitel est définie comme une tourbière limnogène ombrotrophe bombée et partiellement minérotrophe. Pour ce qui est de sa formation (Figure 2), la tourbière du Col du Luitel est limnogène : elle s'est constituée par atterrissement progressif des pièces d'eau à partir de radeaux flottants. Ce processus est plurimillénaire. 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. J.-C., 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. J.-C., des sphaignes se développent et forment les radeaux flottants qui progressent vers le centre du lac. La matière 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 effet continué de croître après avoir comblé la cuvette lacustre et ainsi provoqué 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. Ces secteurs ne sont approvisionnés que par des eaux de pluie. 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 minéralisée. Sur la tourbière du Col du Luitel, ce sont ainsi les zones environnant 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) préfigure la repartition des zones minérotrophes des zones ombrotrophes sur la zone d'étude.

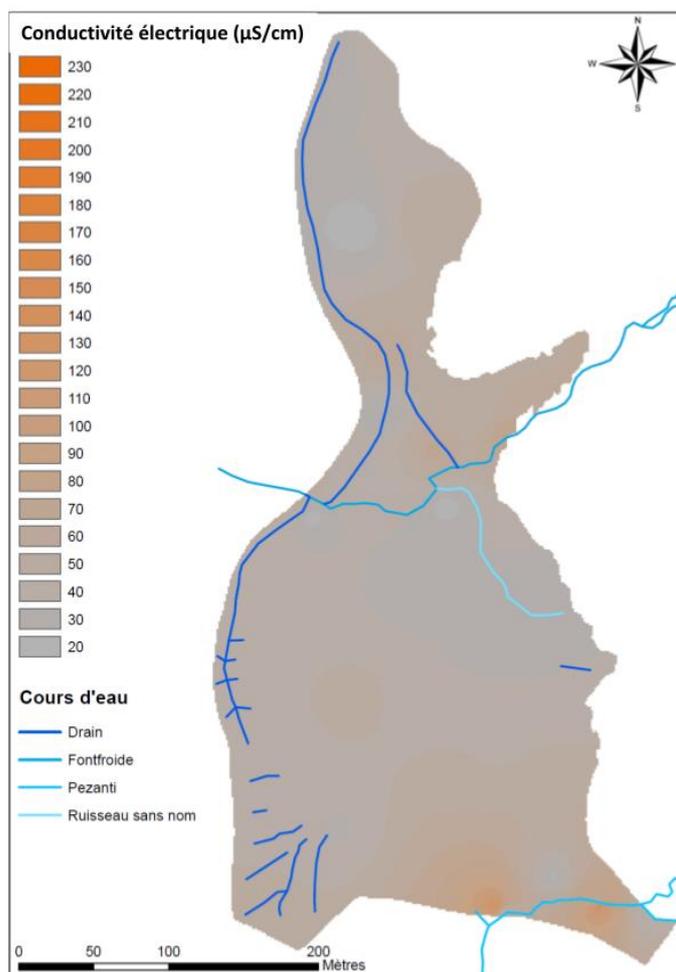


Figure 5 : Carte conductivités électriques (Pascoletti, 2018)

1.1.3. Géologie

1.1.3.1. 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 les rameaux externes, sur le versant Ouest, et interne, sur le 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 modernes, ils constituent la tourbière, la tourbe étant considérée d'un point de vue géologique comme un dépôt sédimentaire carboné.



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

1.1.3.2. 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 (Desplanques 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 sur lequel elle repose.

Les résultats montrent que l'assise de la tourbière du Col du Luitel est composée de deux cuvettes séparées par une remontée de substrat. 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 turfigenèse 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).

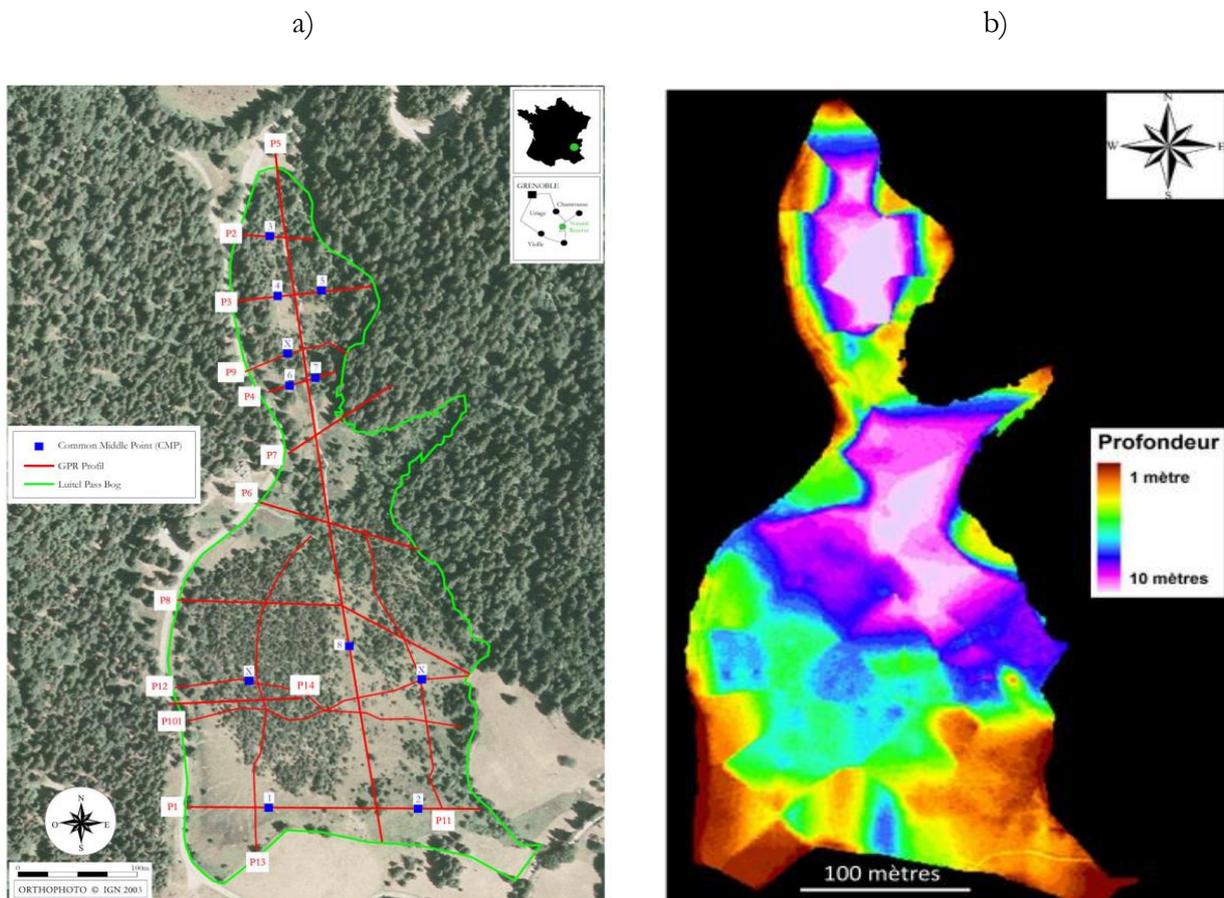


Figure 7. a) Carte des profils d'acquisitions géoradar (Garambois, 2008) b) Cartographie du socle minéral de la tourbière du Col du Luitel (Ravatin, 2017)

1.1.3.3. 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.

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)

1.1.4. Climatologie

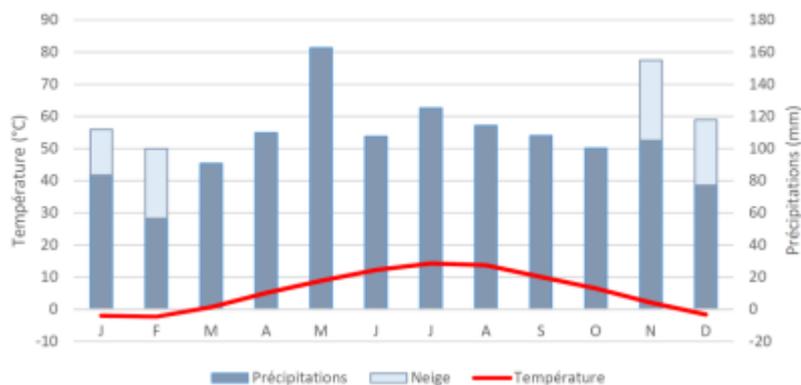


Figure 9. Diagramme ombrothermique du Luitel 2007 – 2016 (Ravatin, 2017)

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

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

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).

1.1.5. Hydrologie

La tourbière de Luitel est traversée par trois ruisseaux (Fontfroide, la source Pezanti et le « ruisseau 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, Fontfroide rencontre 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 la résurgence de Fontfroide se trouvait 650 m plus au Sud (« source Manquat »). Ce phénomène de pertes confirme donc l'hypothèse d'une faille passant à proximité de la tourbière émise par Sarrot-Reynaud (1972). 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 constituée de fossés de drainage. Ceux-ci ont une influence directe sur le comportement hydrologique de la tourbière. Ils induisent une recharge rapide en période de montée des eaux, et une décharge rapide quand il cesse de pleuvoir (Manneville, 2016).

1.1.6. Habitats

La carte des habitats naturels de la tourbière du col (Figure 11) met en avant 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 spécifiquement 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*) (Desplanques 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.

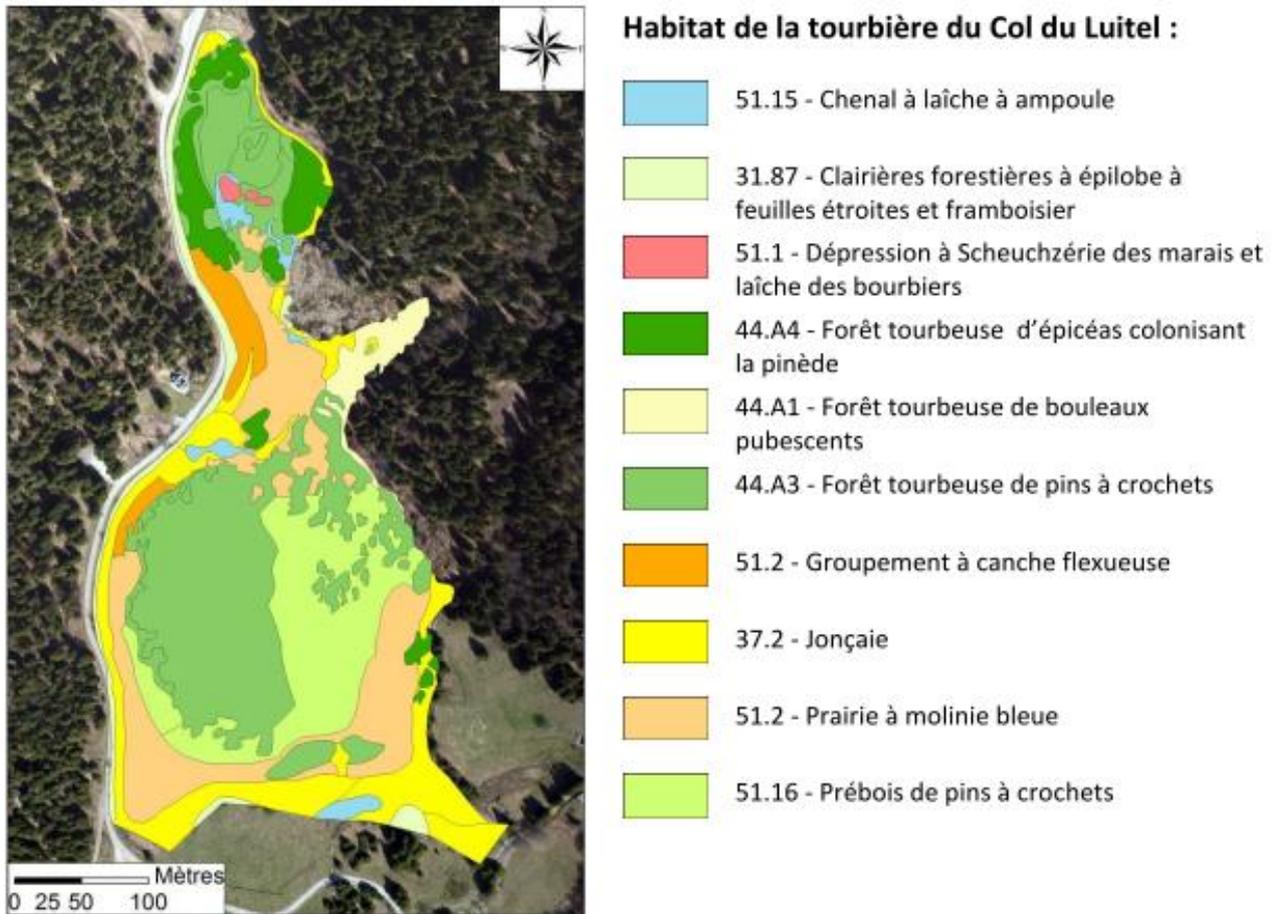


Figure 11. Habitats naturels de la tourbière du col basée sur la typologie CORINE-Biotopes. La dénomination spécifique de la légende diffère de celle de la typologie CORINE-Biotopes s'adapte ainsi à notre échelle de travail qui est relativement fine (Pascoletti, 2018).

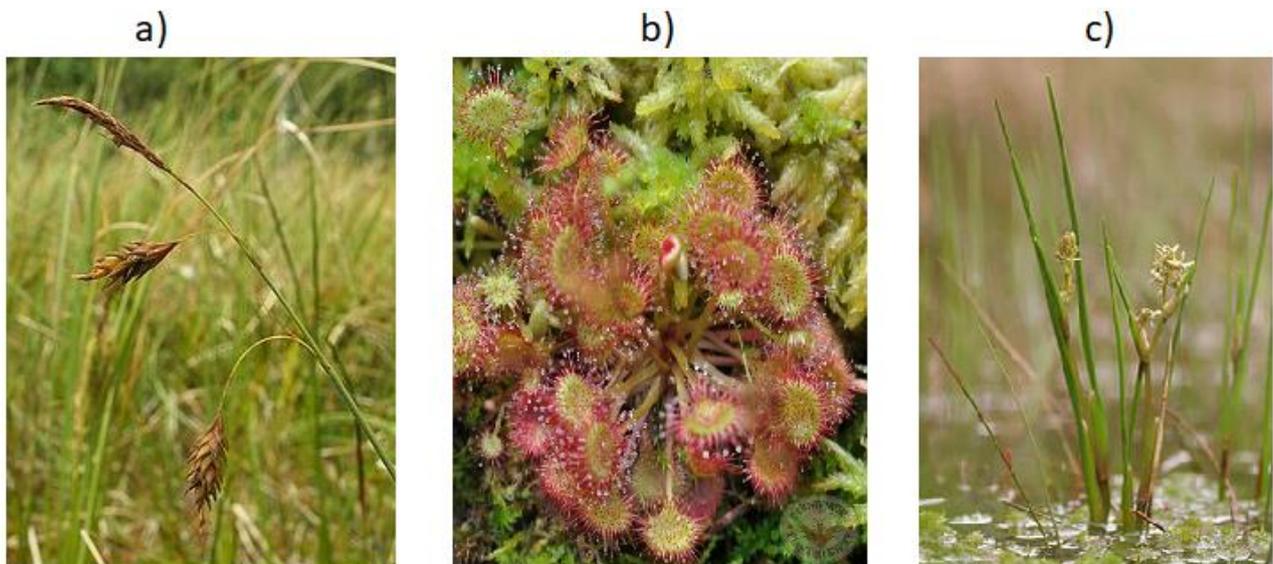


Figure 12. Espèces protégées sur la réserve de Luitel : a) *Carex limosa*, b) *Drosera rotundifolia*, c) *Scheuchzeria palustris*

1.1.7. 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. 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. Par ailleurs la pêche dans le Lac est interdite depuis 1991 et la réserve naturelle est classée en réserve de chasse.

Les activités socio-économiques actuelles tiennent donc plutôt à la vocation d'accueil du public et de pédagogie 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 (Desplanques, 2011).

1.1.8. Risques

Les zones humides de têtes de bassin versant telles que la tourbière du Col du Luitel sont des milieux sensibles, justifiant le statut 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 plusieurs années soumise aux activités pastorales. Celui-ci induit le piétinement, et donc un risque de tassement de la tourbe. Aussi, certaines fonctions et services qui lui sont liés (e.g. le soutien d'étiage) peuvent être altérées, 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 pollutions 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 (Desplanques, 2011).

Les épicéas 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 (Desplanques, 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 nappes, 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. Les fonctions des tourbières sont ainsi altérées, leurs capacités de stockage sont par exemple amoindries. Or, ces capacités conditionnent les capacités de soutien d'été. 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.

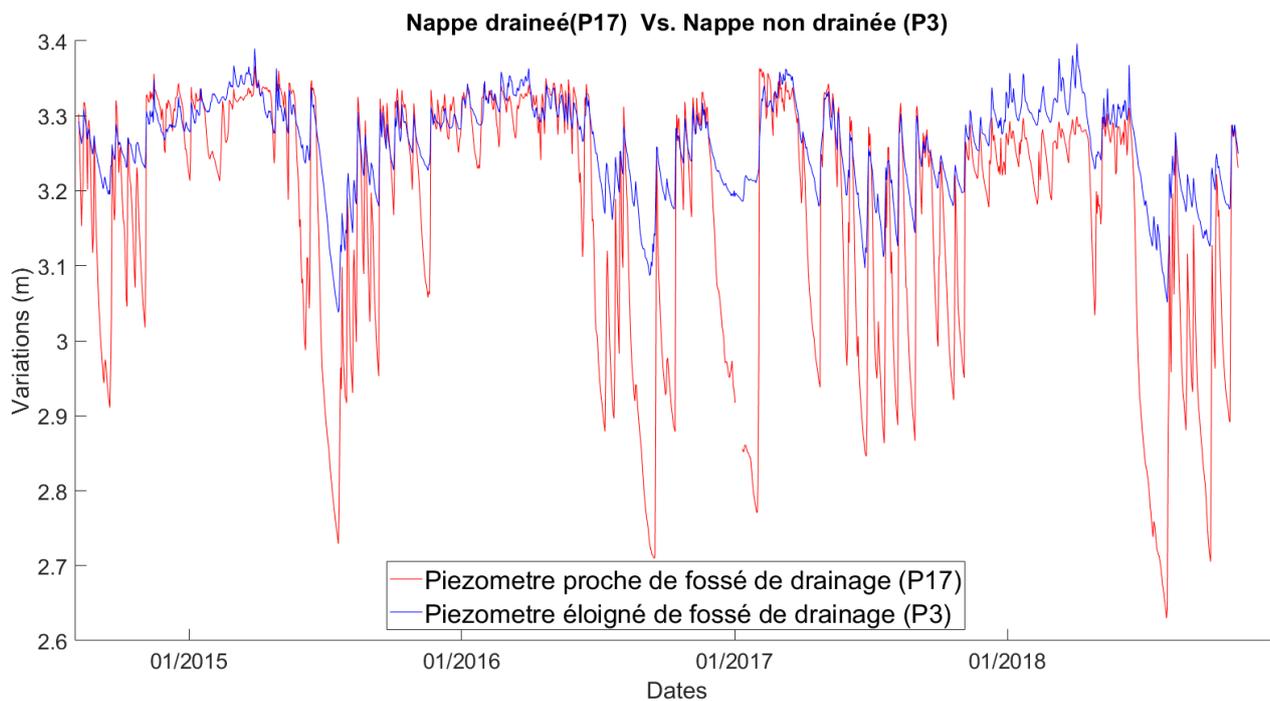


Figure 13. Comparaison du comportement de piézomètre proche de fossé de drainage (P17) avec piézomètre éloigné de fossé de drainage (P3)

- **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 météorologique ne permet pas de confirmer ou d'inférer ces tendances via des tests statistiques.

1.1.9. Suivi de la tourbière

1.1.9.1. 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 4. 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).

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.

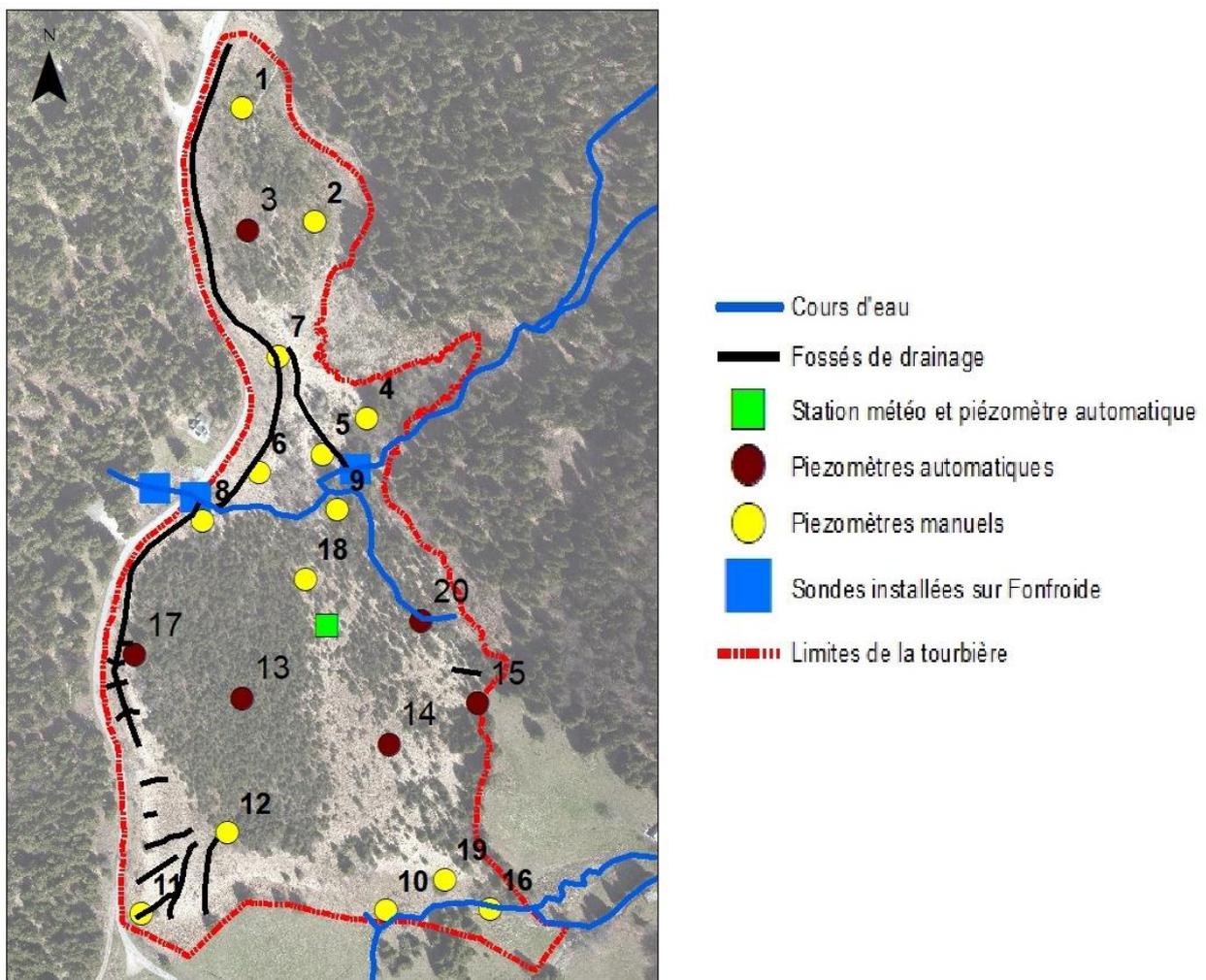


Figure 14. Instrumentation de la tourbière du Col du Luitel

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

1.1.9.2. 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). Chaque piézomètre est constitué de deux tubes de PVC crépinés sur 30 cm tous les 1 m (Tableau 5 et Figure 15).

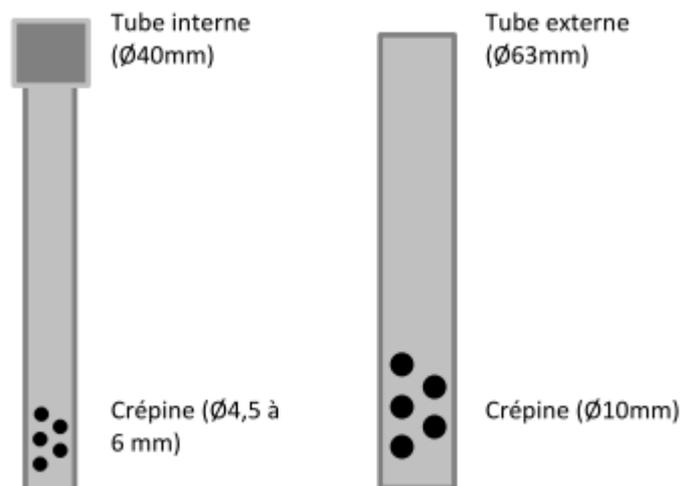


Figure 15. Représentation schématique d'un piézomètre (Pascoletti, 2018)

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

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	oct-30
7	125	5	120	10/30-95/115
8	69	20	49	oct-30
9	400	13	387	10/30-120/140-220/240-320/340
10	100	40	60	oct-30
11	100	27	73	oct-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	oct-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 5. Caractéristiques des piézomètres (adapté de Hustache, 2004)

1.1.9.3. 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 6).

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 6. 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*⁶. 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

⁶ <https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/precision.php>

1.2. Tourbière de Frasne

1.2.1. Présentation rapide du site de Frasne

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

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

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

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

Le Tableau 7 présente les principaux éléments de synthèse décrivant le site de Frasne.

Localisation	60 km au sud de Besançon (Doubs)
Altitude	850 m
Age	7 000 ans au moins
Surface	230 ha
Épaisseur	1 à 7 m
Types de milieu	tourbière bombée, tourbière de pente, bas-marais, tourbière boisées et milieux annexes
Géologie	calcaire (karst), glaciaire
Flux entrant	pluie (principalement), eau souterraine (par le fond ? latéral ?)
Flux sortant	cours d'eau et ETP, eau souterraine (recharge ?)
Doline	capacitif (émissif ?)
Aménagements/usage	fossés (drainage, exploitation de tourbe), fossés comblés
Données disponibles et instrumentation	Météo depuis 2008 Piézomètres : 24 manuels (2004, 2014) ; 12 automatiques (2014) Jaugeage exutoire : depuis 2014 LIDAR ...
Autre	Soutien logistique / scientifique Accès facile

Tableau 7 : Présentation rapide du site de Frasne : éléments de synthèse

1.2.2. 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 une vaste dépression de 89 ha en amont du bassin du Dugeon sur les communes de Frasne et Bouverans. La zone d'étude proprement dite est localisée au sud du complexe tourbeux du Forbonnet, l'une des trois zones d'intérêt qui composent la réserve naturelle régionale de Frasne-Bouverans.

La combe tourbeuse (50 000 m²) constitue un milieu 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 de plusieurs mètres de profondeur aurait été émissive à l'origine (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).

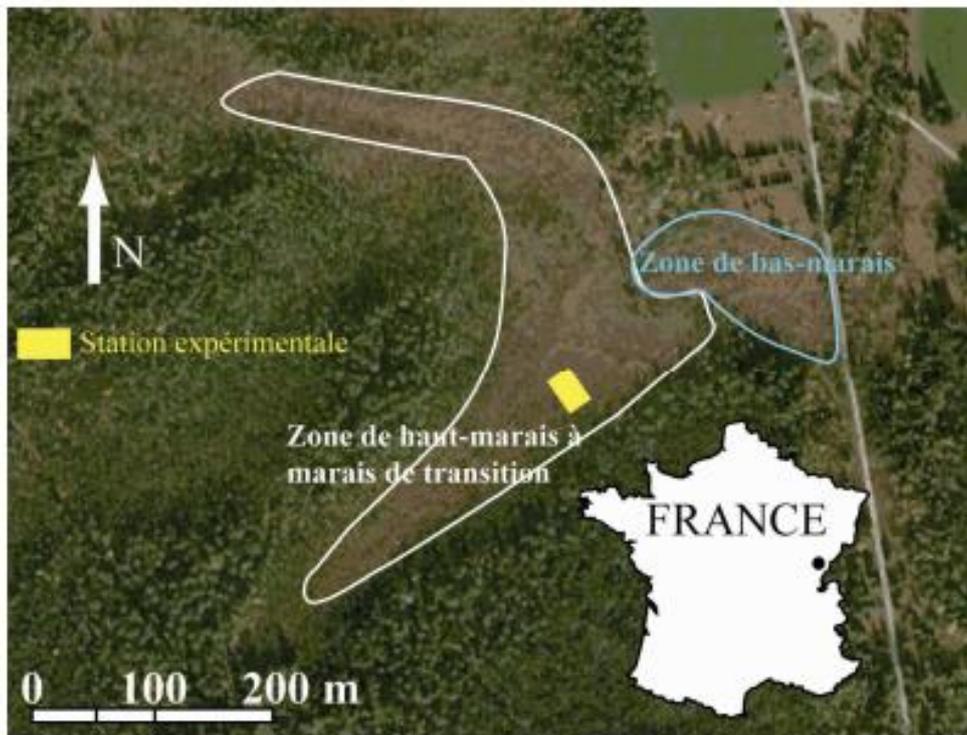


Figure 18. Localisation de la tourbière de Frasne

1.2.3. Géologie

1.2.3.1. Généralités

Le bassin du Dugeon se localise dans le synclinal de Bonnevaux-Frasne (Duraffourg et Palacio 1981). Les formations de ce synclinal remontent principalement à l'âge 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 permis la formation d'un paysage hétérogène tant au niveau du relief que de l'imperméabilité du sous-sol. La plaine ainsi abandonnée par le glacier était constituée 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 and Campy, 2009; S. Bruckert and 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).

1.2.3.2. 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 RNR de Frasn-Boueverans. 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 (Grosvernier, 2005). Le relief observé est celui d'une pente de 0,35% de la digue 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.

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. 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 19). 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.

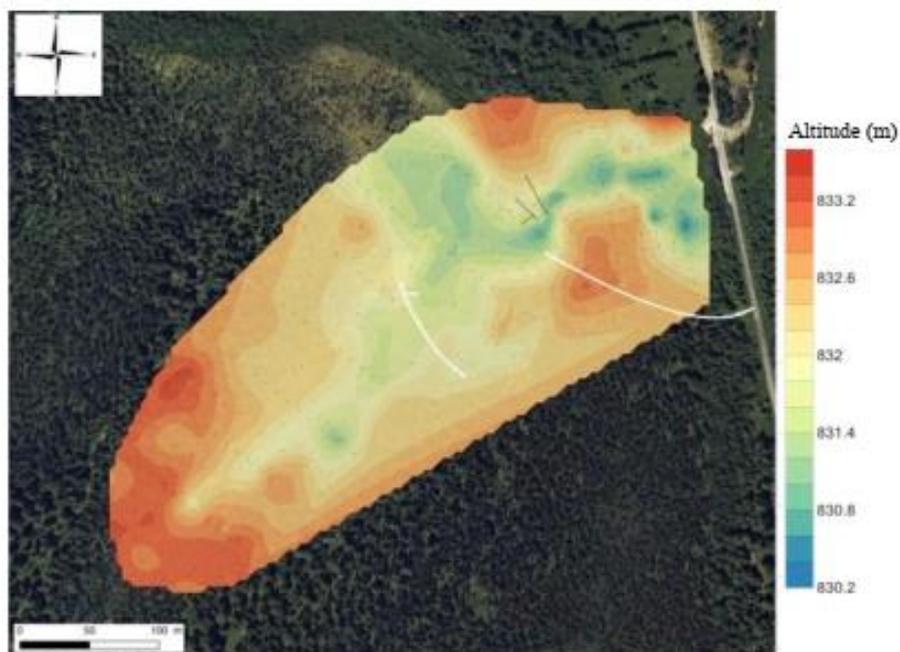
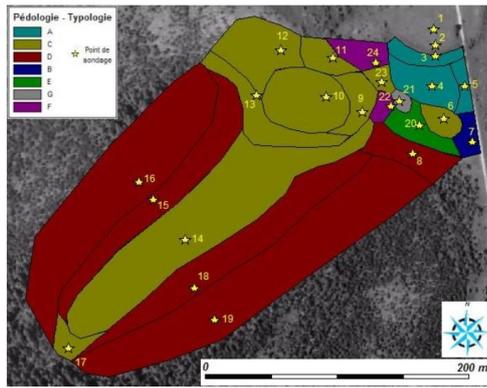


Figure 19. Cartographie de la topographie du socle minéral de la tourbière active de Frasn (interpolation par Natural Neighbors, logiciel Surfer 10). Les traits blancs symbolisent les passerelles : au centre celle du SNO tourbières et à l'est celle des visiteurs. (Collin, 2018)

1.2.3.3. 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 20).



	A	B	C	D	E	F	G
Sondages	3,4,5	7	6,9,10,11,12,13,14,17,23	8,15,16,18,19	20	22,24	21
Végétation	molinie - laïches	boureaux - laïches	sphaignes - (laïches ou pins à crochets)	épicéas - bryophytes - myrtilles	épicéas - bryophytes - myrtilles	boureaux - laïches - molinie	boureaux - molinie
Profondeur (cm)	70 - 160	110	160 - 270	220 - 500	50	70 - 170	40
Couleur	brune sombre	noire	blonde	brune sombre à noire	noire	brune sombre	brune grise
pH	5,2 - 5,5	6,5	4,2 - 4,9	3,8 - 4,8	5,7	4,9	7,3
Taux de fibres (%)	60 - 70	70	> 70	60 - 70	50	70	40
d'après Gobat et al., 1998	Histosol fibrique	Histosol fibrique	Histosol fibrique	Histosol fibrique	Histosol fibrique	Histosol fibrique	Histosol fibrique
d'après Duchaufour, 2001	Tourbe eutrophe	Tourbe eutrophe	Tourbe acide	Tourbe acide	Tourbe eutrophe	Tourbe eutrophe	Tourbe eutrophe
d'après Manneville et al., 1999	Tourbe noire	Tourbe noire	Tourbe blonde	Tourbe brune	Tourbe noire	Tourbe brune	Tourbe brune

Figure 20. Description pédologique du site d'étude (adapté de Briot, 2004)

1.2.4. 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 Cénébiaud, 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 Cénébiaud 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 21).

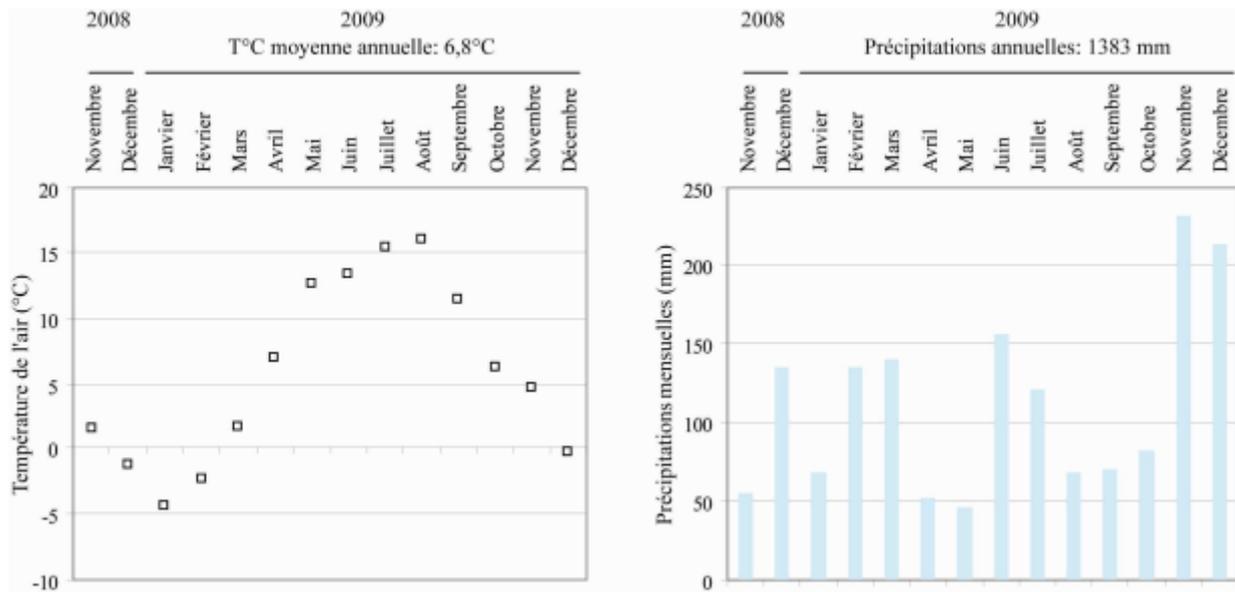


Figure 21. Diagramme ombrothermique, mesures des températures et des précipitations pour la période novembre 2008 – décembre 2009 (Delarue, 2010)

1.2.5. 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 vaste 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 du bassin versant de l'Ain : la source de l'Ain et la source de la papeterie. Le Creux au Lard est émissif 2% de l'année et il est possible qu'à l'origine, il l'ait été constamment (Grosvernier, 2014).

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

Le ruisseau des Oyettes parcourt le site d'étude d'ouest en est et contourne par le nord la tourbière vivante (Figure 22). 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.

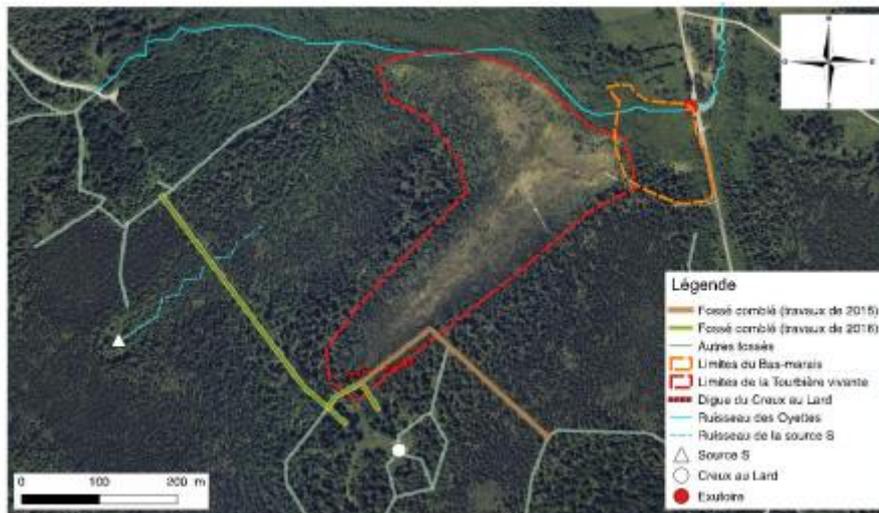


Figure 22. Cartographie du réseau hydrologique de surface (Collin, 2018)

1.2.6. Habitats

La réserve naturelle de Frasne 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 Frasnes 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 (e.g. *Carex limosa*, *Drosera* spp., *Scheuchzeria palustris*, *Andromeda polifolia*). Dans l'ensemble, les habitats 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*) constituent 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).

1.2.7. Socio-économie

Site majeur ouvert au public depuis l'été 2009, les tourbières de Frasne ont été aménagées dans le respect de l'environnement, un sentier dont une partie sur ponton permettant d'évoluer dans ce véritable joyau de la nature. 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 l'ONF et du Point Information Tourisme sont réalisées régulièrement lors de la période estivale.

1.2.8. Risques

- **Naturellement**

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

- **Activité anthropique 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 prive aujourd'hui 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).

Plusieurs projets de travaux ont été réalisés pour restaurer les conditions hydrologiques avant drainage de la combe tourbeuse. Ces travaux consistent principalement au comblement des drains mis en place pour l'amélioration de la sylviculture dans les années 1850. 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 aujourd'hui retrouver son comportement hydrologique avant drainage.

D'une manière générale, l'important réseau de drainage contribue à assécher la tourbière et peut 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.

- **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.

1.2.9. 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.

- **Piézométrie**

Le site d'étude est équipé de nombreux piézomètres (Figure 23). 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 (HOBO). Les autres sont relevés manuellement deux fois par

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

semaine. 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).

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 semaine.

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.

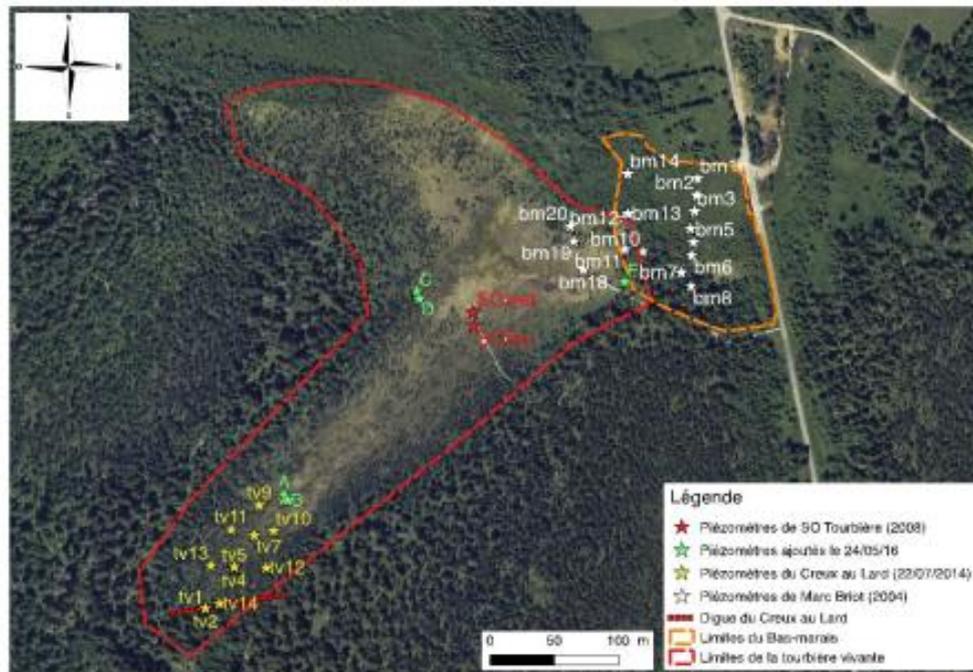


Figure 23. Emplacement des piézomètres (Collin, 2018)

• 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 24). 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.



Figure 24. Localisation des sondes installées sur des cours d'eau (Collin, 2018)

2. Compléments bibliographiques

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

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 26). Pour que la tourbière se maintienne, le bilan doit être soit équilibré, soit excédentaire.

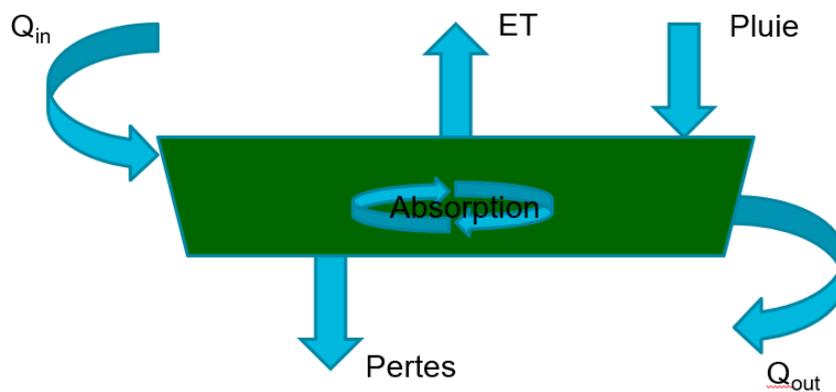


Figure 26 : Représentation schématique du bilan théorique d'une tourbière

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 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 (2011), 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. 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 27).

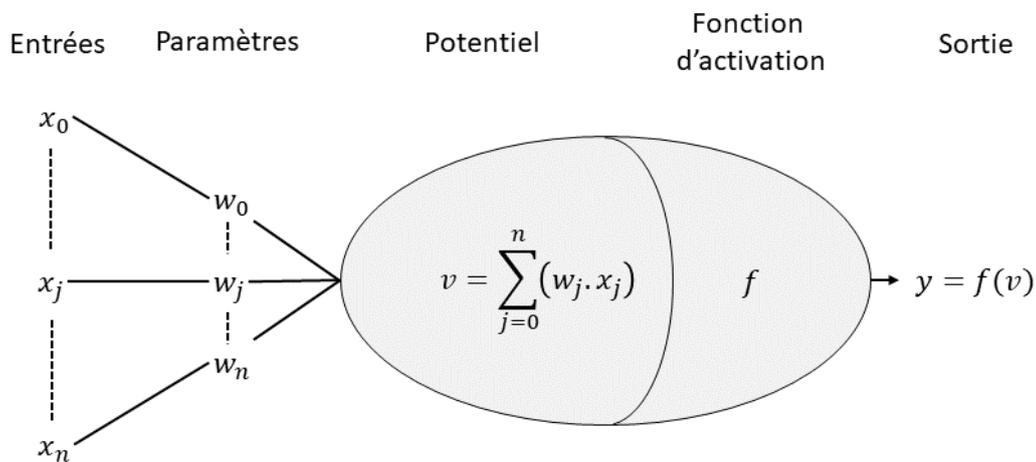


Figure 27 : représentation schématique d'un neurone formel. x est le vecteur des variables d'entrée, w la matrice des paramètres (coefficients synaptiques), $f()$ est la fonction d'activation et y la sortie

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.

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

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 28 : il s'agit du perceptron multicouche.

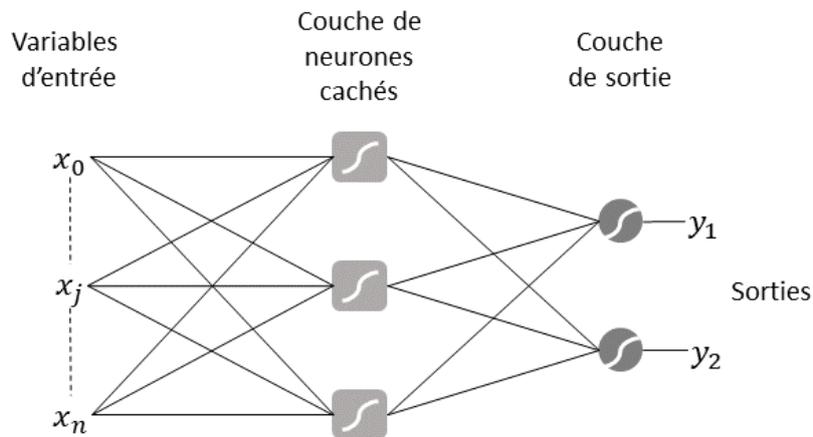


Figure 28 : représentation schématique du perceptron multicouche, ici à une couche de neurones cachés

2.2.1.2.2. Réseaux dynamiques ou récurrents

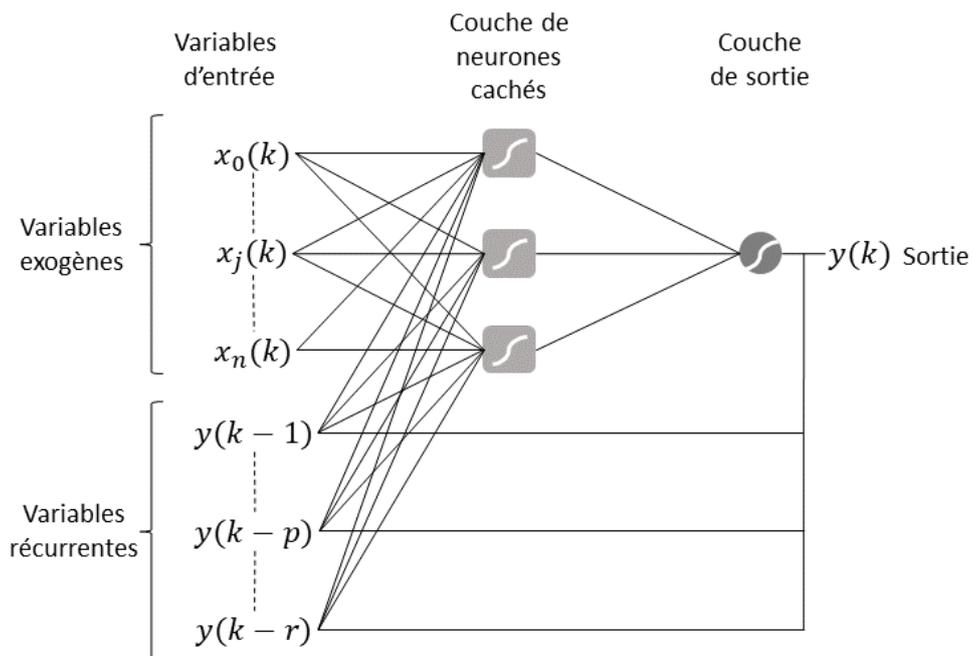


Figure 29 : représentation schématique d'un réseau de neurones récurrent d'ordre r

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.* ».

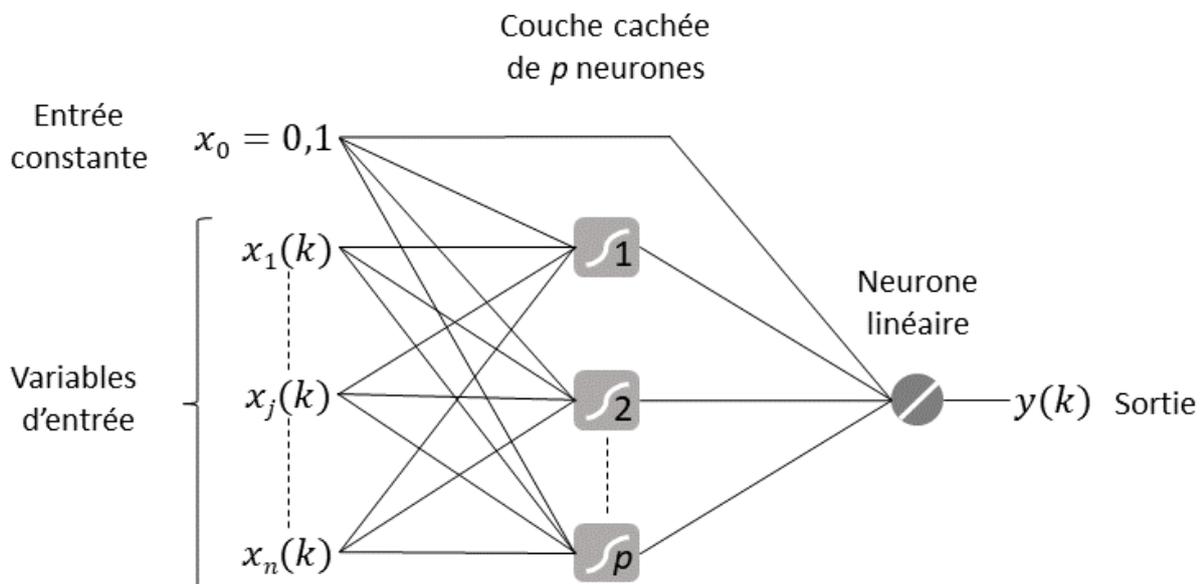


Figure 30 : représentation schématique d'un approximateur universel.

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

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 30). 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 31. 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

} S_v

Figure 31 : 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.

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 (à compléter)	p42
1.1. Tourbière de Luitel	p42
1.2. Tourbière de Frasne	p42
1.3. Autres projets en lien	p42
2. Instrumentation et mesures pour le suivi hydrologique	p43
2.1. Tourbière de Luitel (à compléter)	p43
2.2. Tourbière de Frasne (à compléter)	p46
3. Analyse statistique des données hydrologiques	p48
3.1. Tourbière de Luitel	p48
3.2. Tourbière de Frasne (à compléter)	p71
4. Modélisation du rôle de soutien d'été	p72
4.1. Modèles réservoirs – modélisation du soutien d'été au Luitel	p72
4.2. Réseaux de neurones	p82

1. Partage de données et suivis existants (à compléter)

1.1. Tourbière de Luitel

Les activités scientifiques liées au projet ZHTB ont fait l'objet d'une demande d'autorisation 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.

Intégrer un renvoi vers les parties du rapport concernées / notamment parties G. Artigue.

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. Une partie de l'instrumentation a été mise en place lors de l'ANR Peatwarm (UMR Chronoenvironnement, Université de France Conté). 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...

Intégrer un renvoi vers les parties du rapport concernées / notamment parties G. Artigue.

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 (à compléter)

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 32).

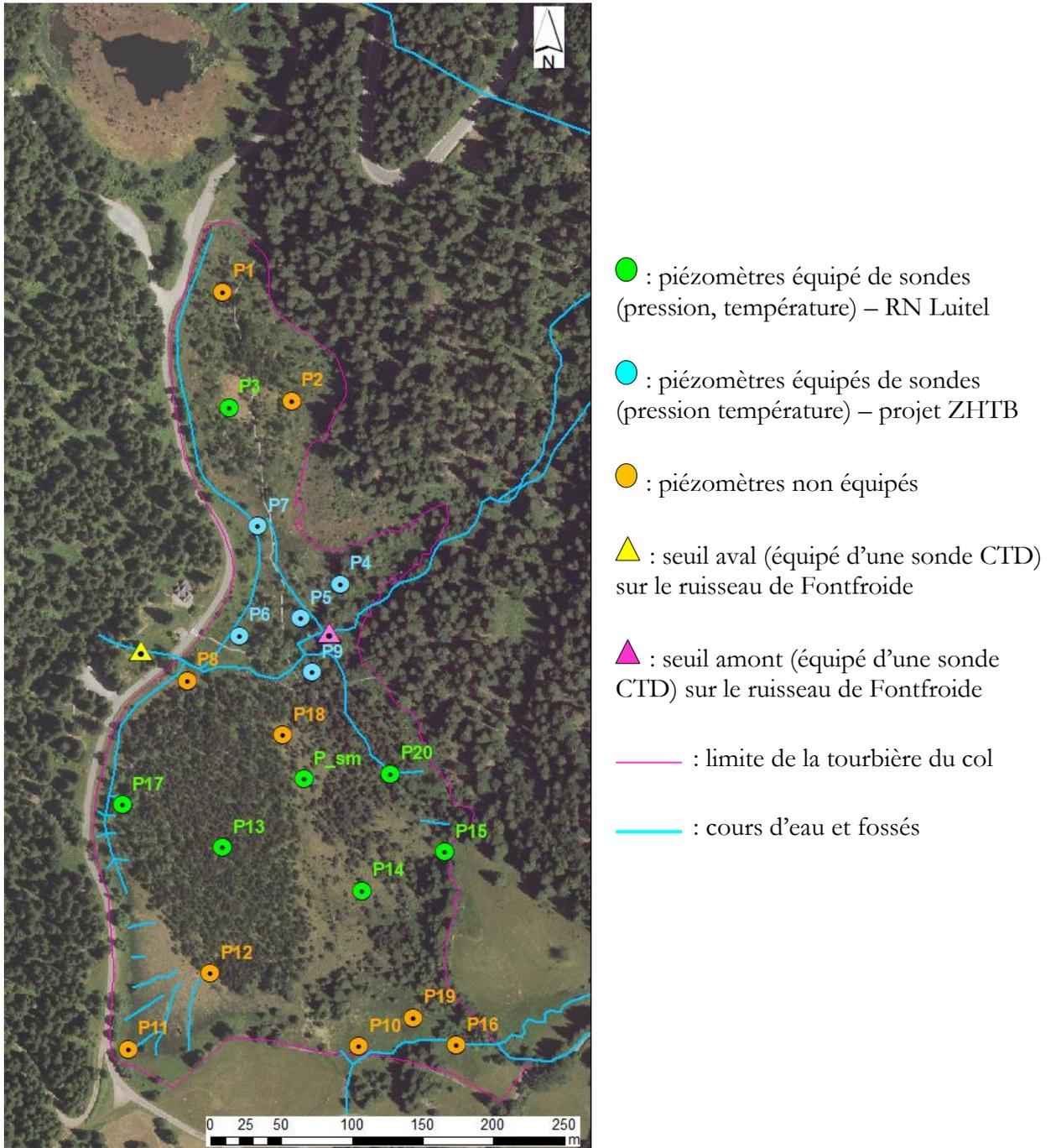


Figure 32 : Instrumentation hydrologique au Luitel

PARTIE II – Volet hydrologie

Ces 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.

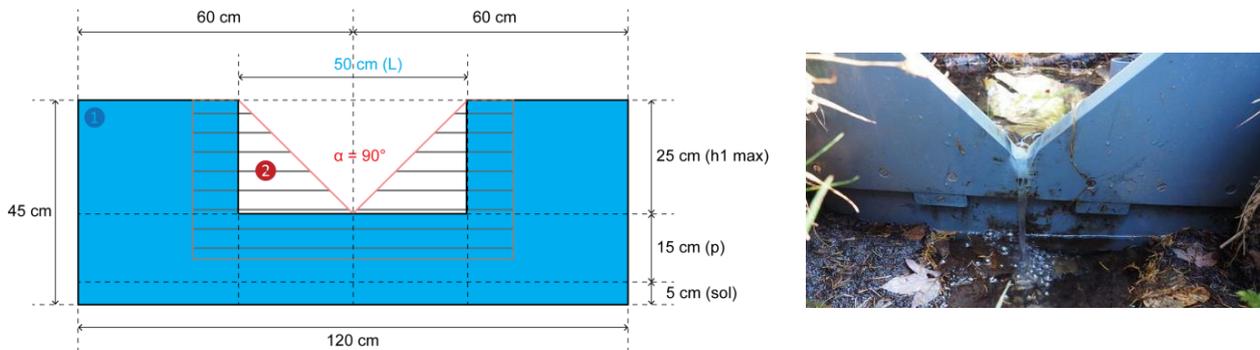


Figure 33 : Vue en plan des seuils jaugés installés au Luitel

- 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 calculé 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 34 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.

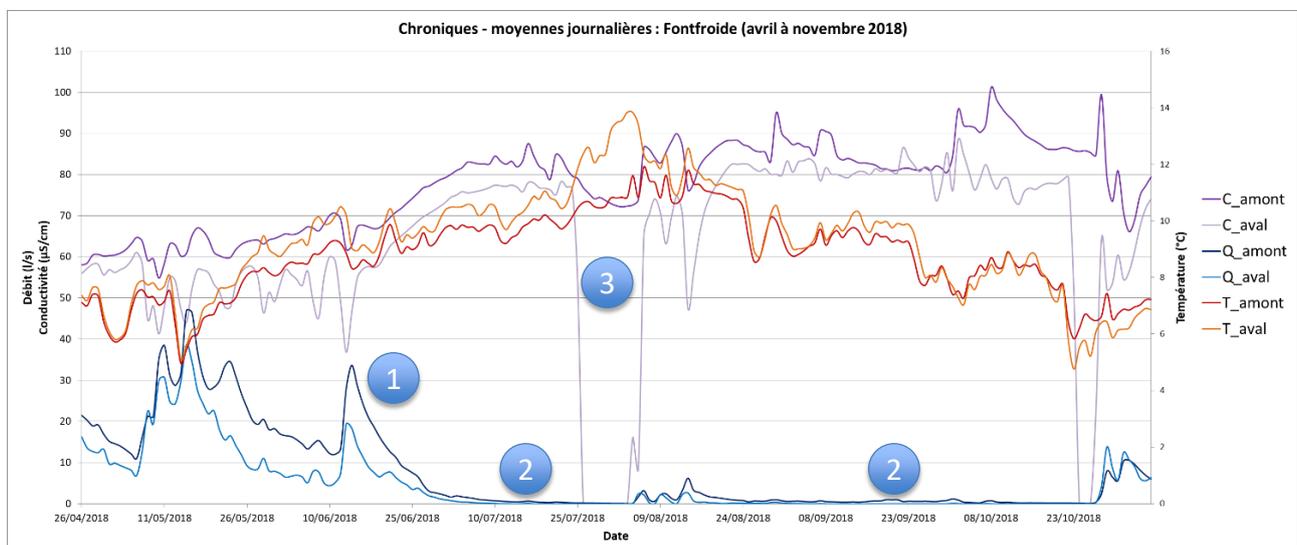


Figure 34 : Données acquises avec les sondes au niveau des seuils amont et aval du ruisseau de Fontfroide

Les données présentées sur la Figure 34 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 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.

À nuancer par rapport au résultat de G. Artigue + V. Lavastre

2.2. Tourbière de Frasne (à compléter)

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 a été complété par l'installation de 4 sondes CTD (Figure 35) :

- 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.

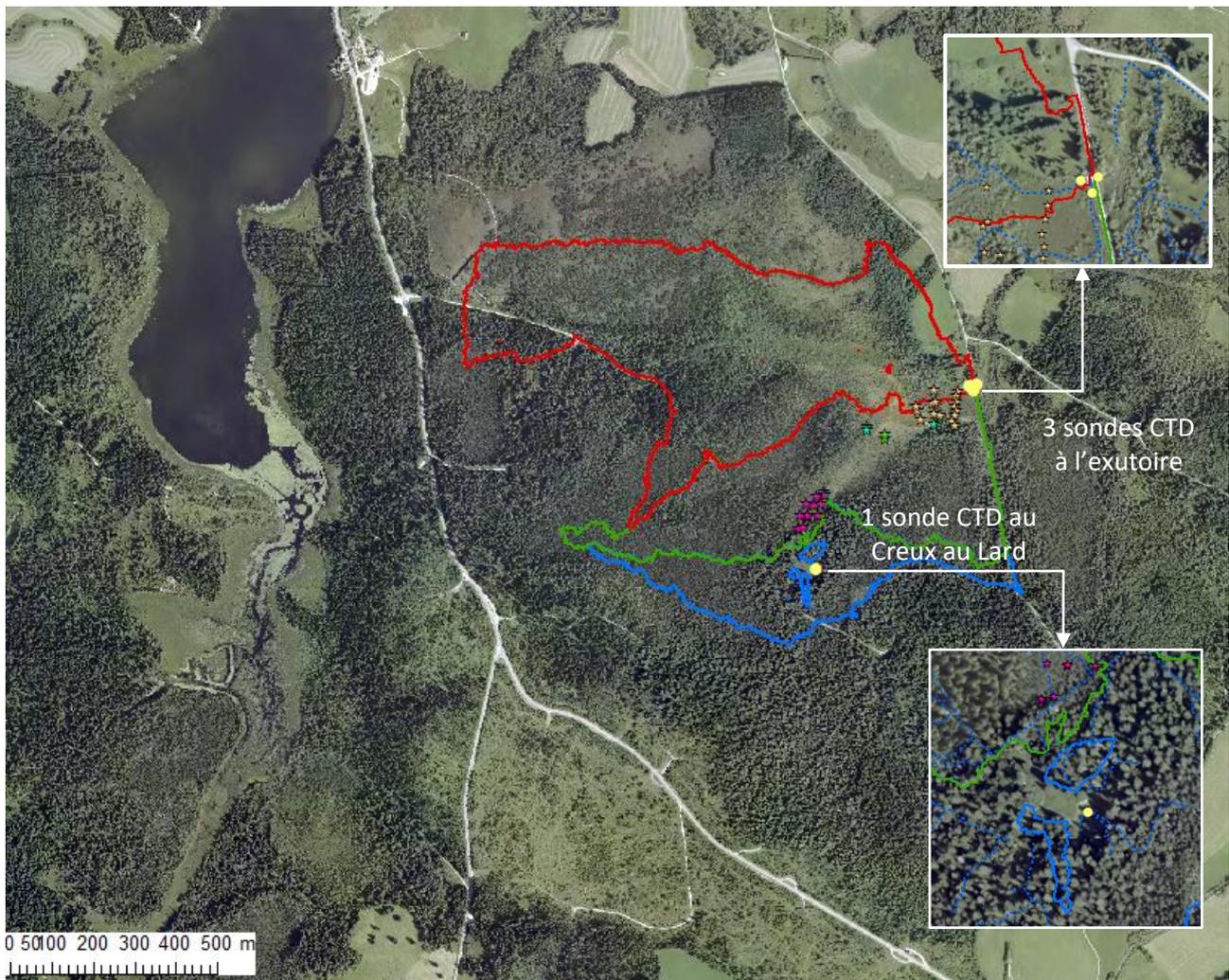


Figure 35 : Instrumentation sur la tourbière de Frasne

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.

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.

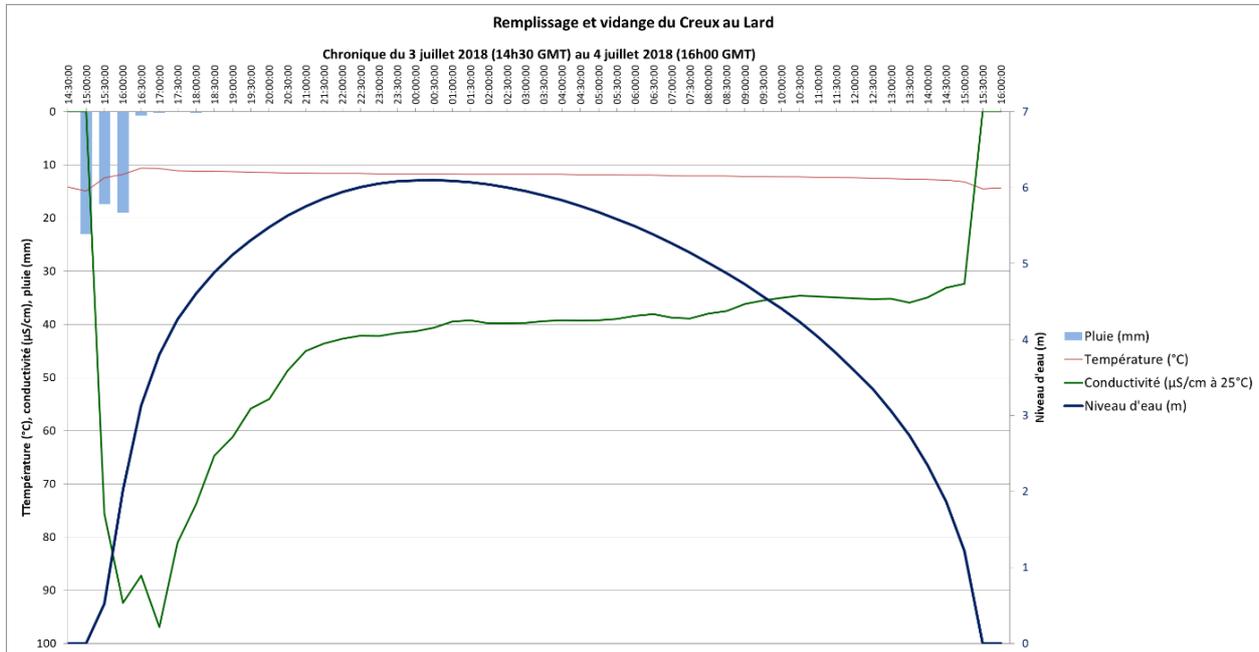


Figure 36 : Remplissage/vidange de la doline du Creux au lard



Novembre 2017 (G. Magnon)



Mars 2017 (F. Paran)

À ajuster par rapport aux parties de G. Artigue

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 37 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).

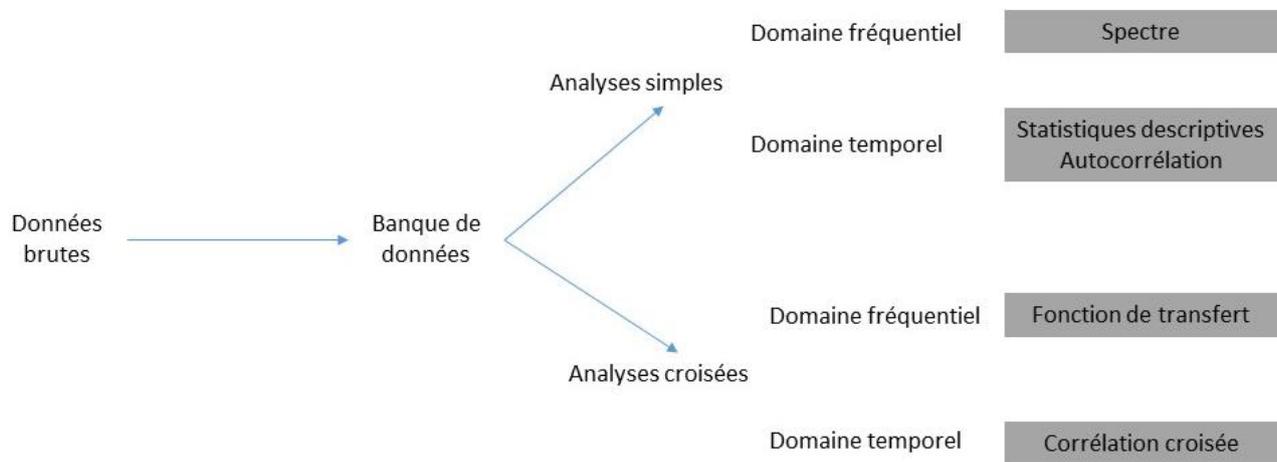


Figure 37. Organigramme des analyses statistiques

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 38) 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 tro-p-pleins, des fuites. Le graphe permet également de déterminer des caractériser un débit d'étiages. Ainsi, Q_{90} , correspondant à la valeur pour laquelle 90% des débits observés sont supérieurs, permettra de définir le débit d'étiage.

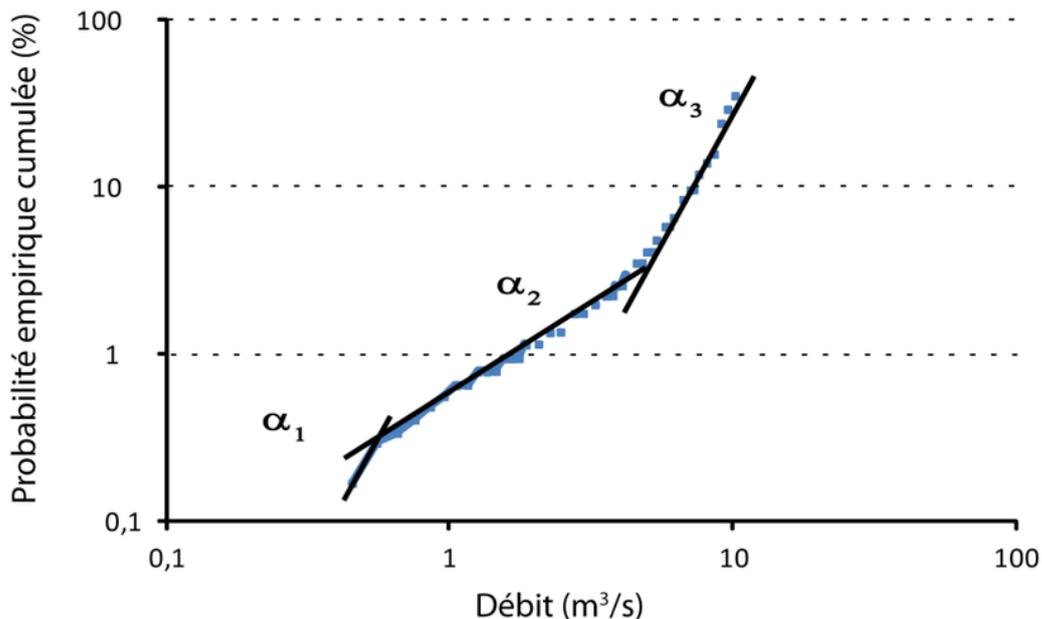


Figure 38. Exemple de courbe des débits classés (Kong a Siou, 2011)

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 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 et al., 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.

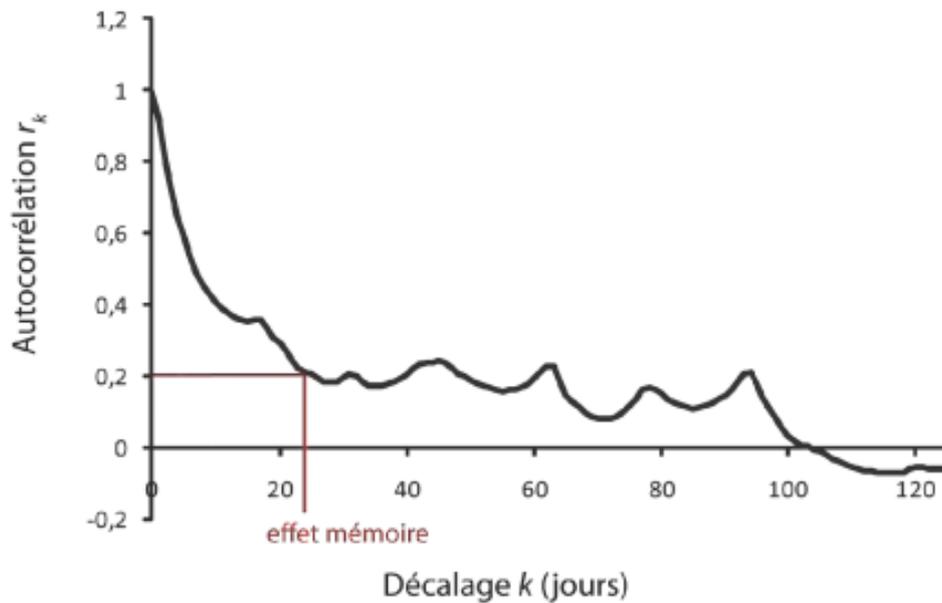


Figure 39. Autocorrélogramme d'un signal de débit (Kong a Siou, 2011)

3.1.3.3.2. Corrélogramme croisé

La corrélation croisée (Figure 40) 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 décorrélatées pour un seuil théoriquement et statistiquement défini, on peut définir une autre valeur k pour laquelle les deux séries sont décorrélatées. 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.

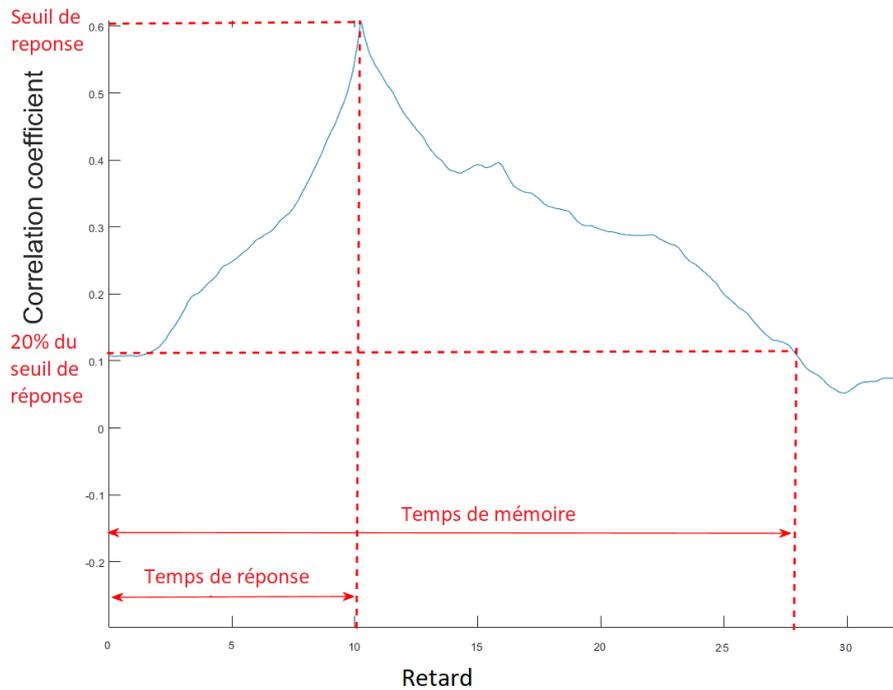


Figure 40. Exemple de corrélogramme croisé pluie-débit (Kong a Siou, 2011)

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 41a), avec des dysfonctionnements locaux (Figure 41b) et avec des lacunes (périodes où le capteur n'a pas fonctionné) (Figure 41c). 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, 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 disposions 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.

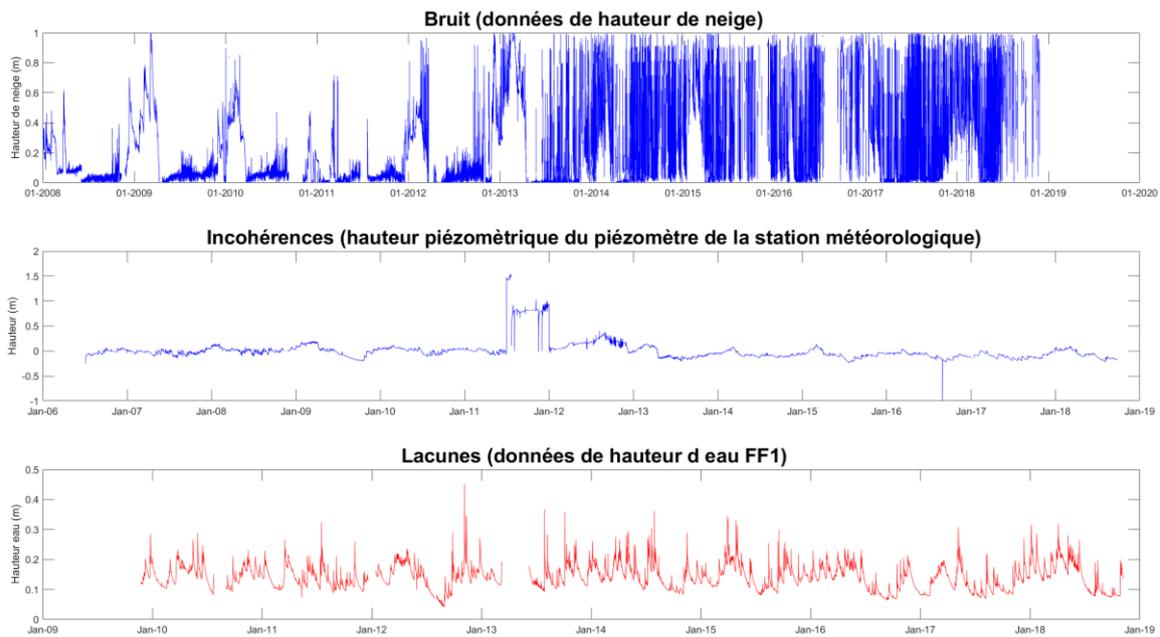


Figure 41. Exemple de données relevées présentant a) un fort degré de bruit (données de hauteur de neige), b) des incohérences (hauteurs piézométriques du piézomètre de la station météorologique), c) des lacunes (données de hauteur d'eau FF1)

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 42 détaille les jours où cette substitution a eu lieu. Finalement, les données originales constituent 80% de ce jeu de données hybrides.

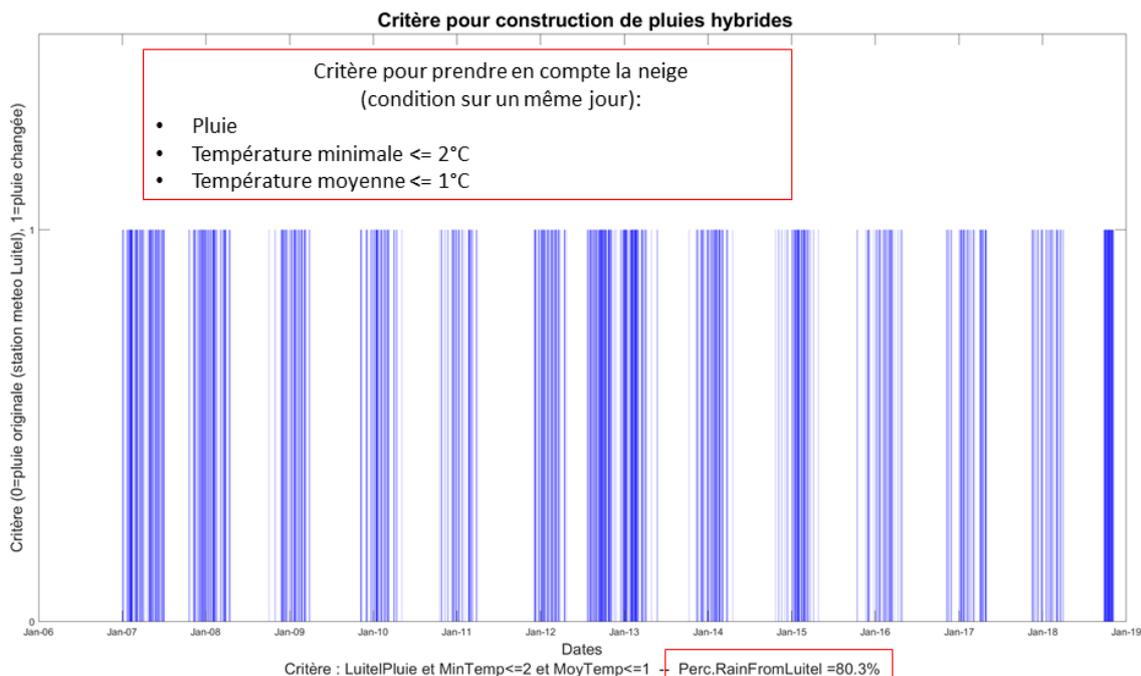


Figure 42 : apparition de la réalisation du critère de construction de pluies hybrides.

PARTIE II – Volet hydrologie

Les Figure 43, Figure 44 et Figure 45 décrivent les chaînes respectives de traitements appliquées aux données d'évapotranspiration, de débits et de hauteurs piézométriques du piézomètre 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 de la rivière où les données sont captées.

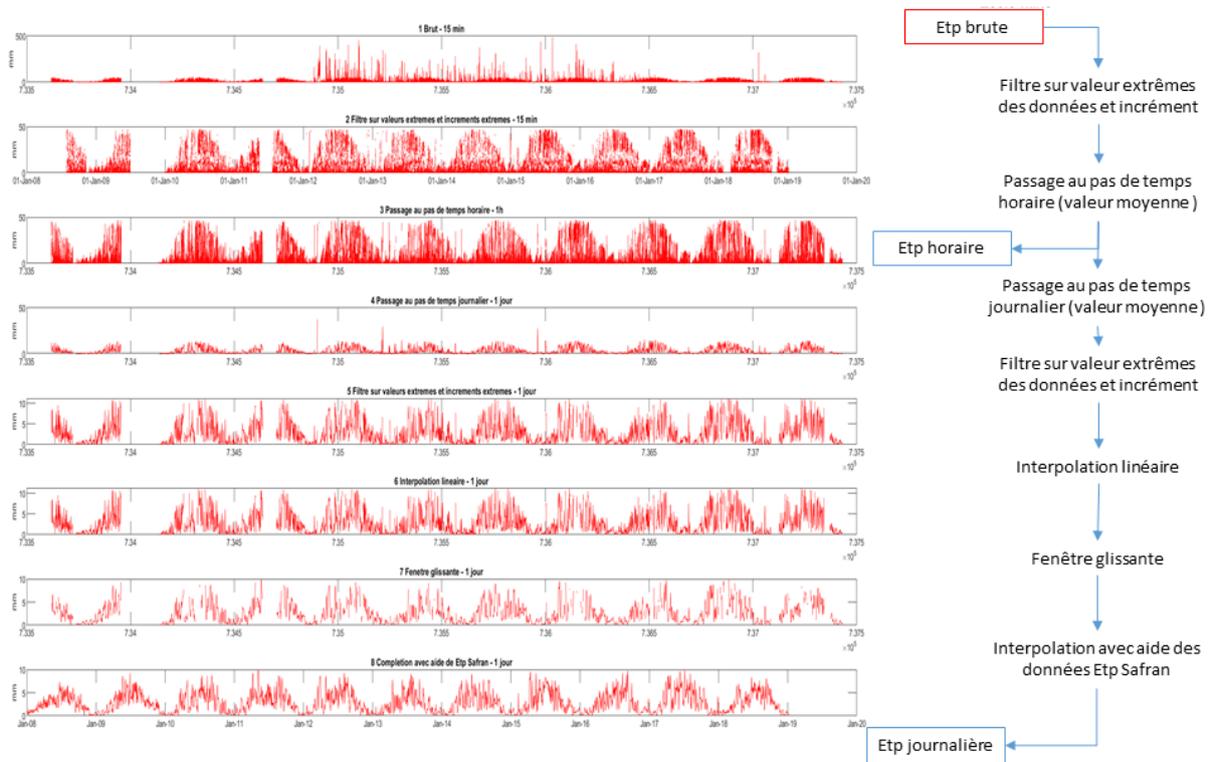


Figure 43. Traitement de l'évapotranspiration

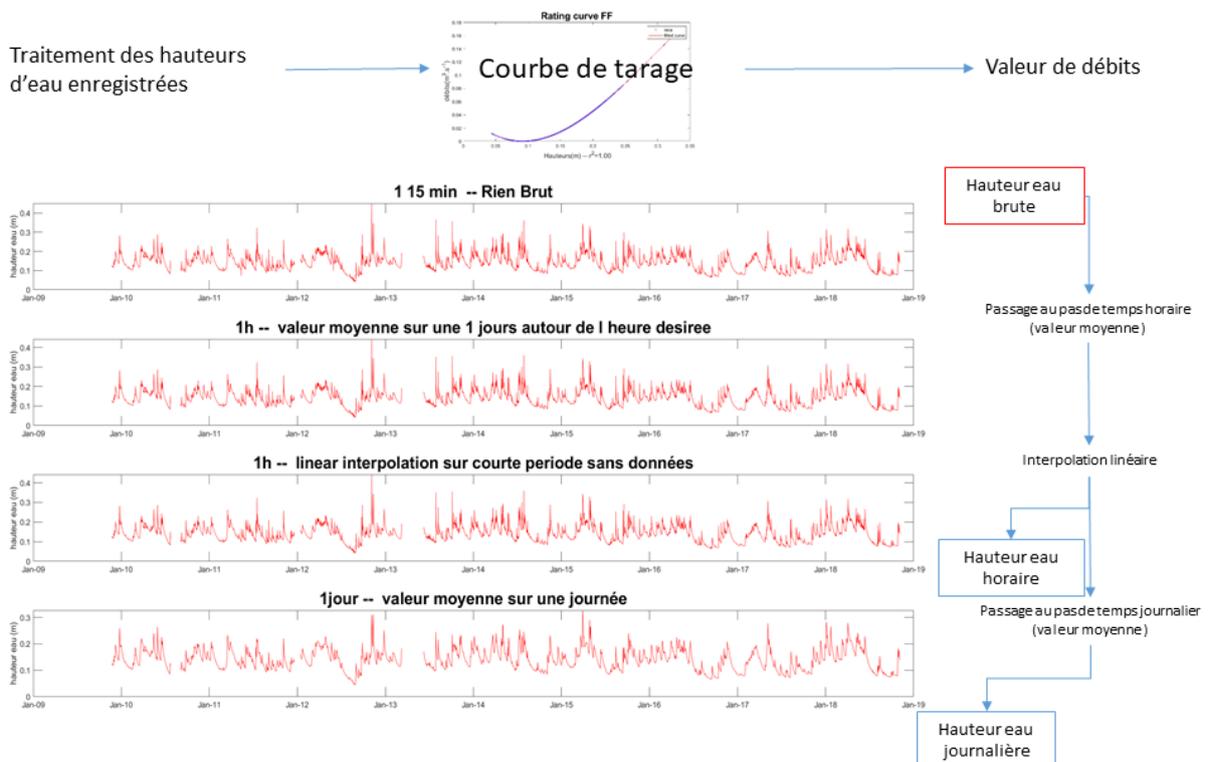


Figure 44. Traitement des données de débits

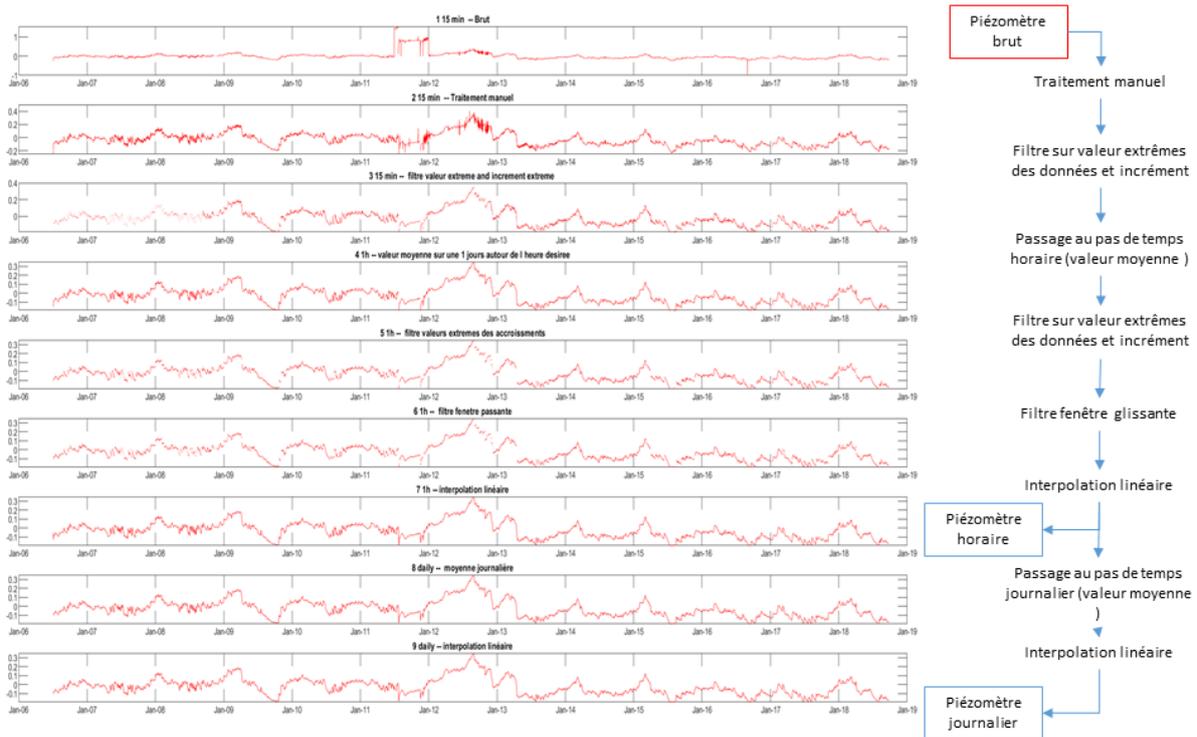


Figure 45. Traitement des hauteurs du piézomètre météorologique

3.1.4.2. Description statistiques descriptives

3.1.4.2.1. Pluie

La Figure 46, 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). Une 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 8), 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. Evapotranspiration

La Figure 47, 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.

PARTIE II – Volet hydrologie

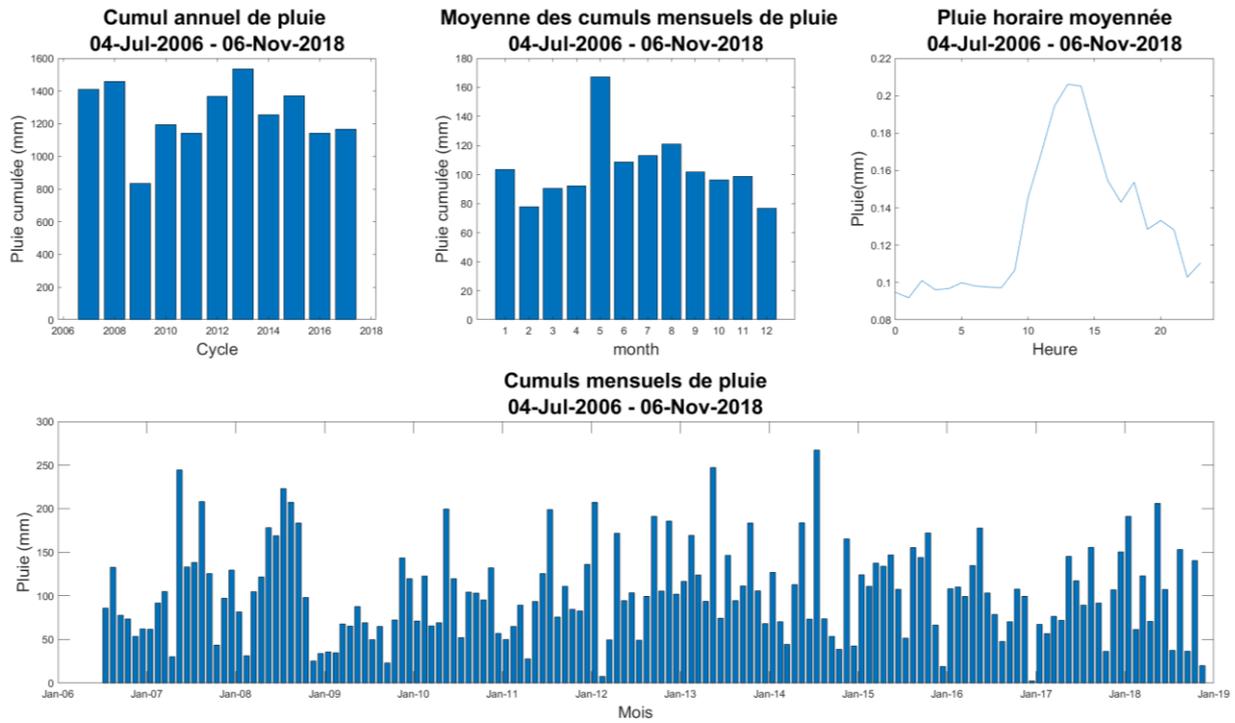


Figure 46. Description statistique des pluies journalières

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

Tableau 8. 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.

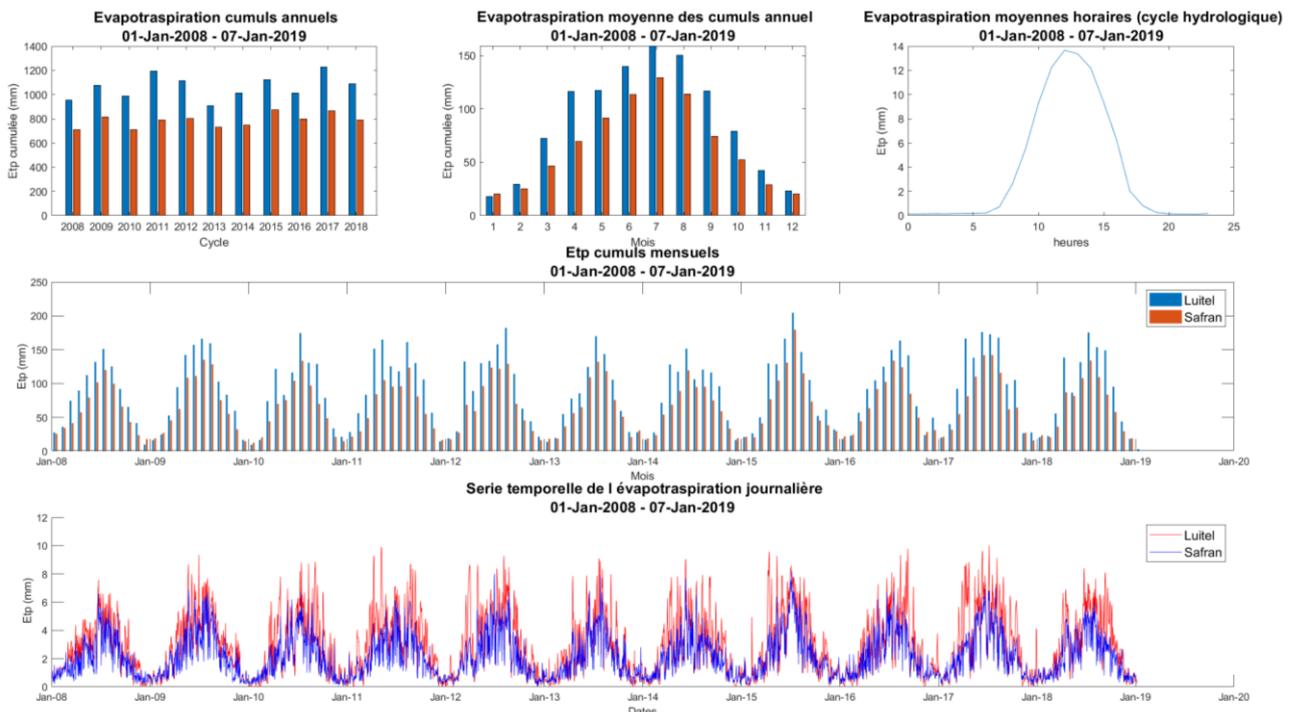


Figure 47. Description statistique des données d'évaporation journalières

3.1.4.2.3. Débits

La Figure 48, 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 rivières 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 9) montre que les deux ruisseaux ont des distributions de débit similaires. Celle-ci sont pratiquement symétrique (skewness=2) et peu « pointues » (kurtosis= ~ 9).

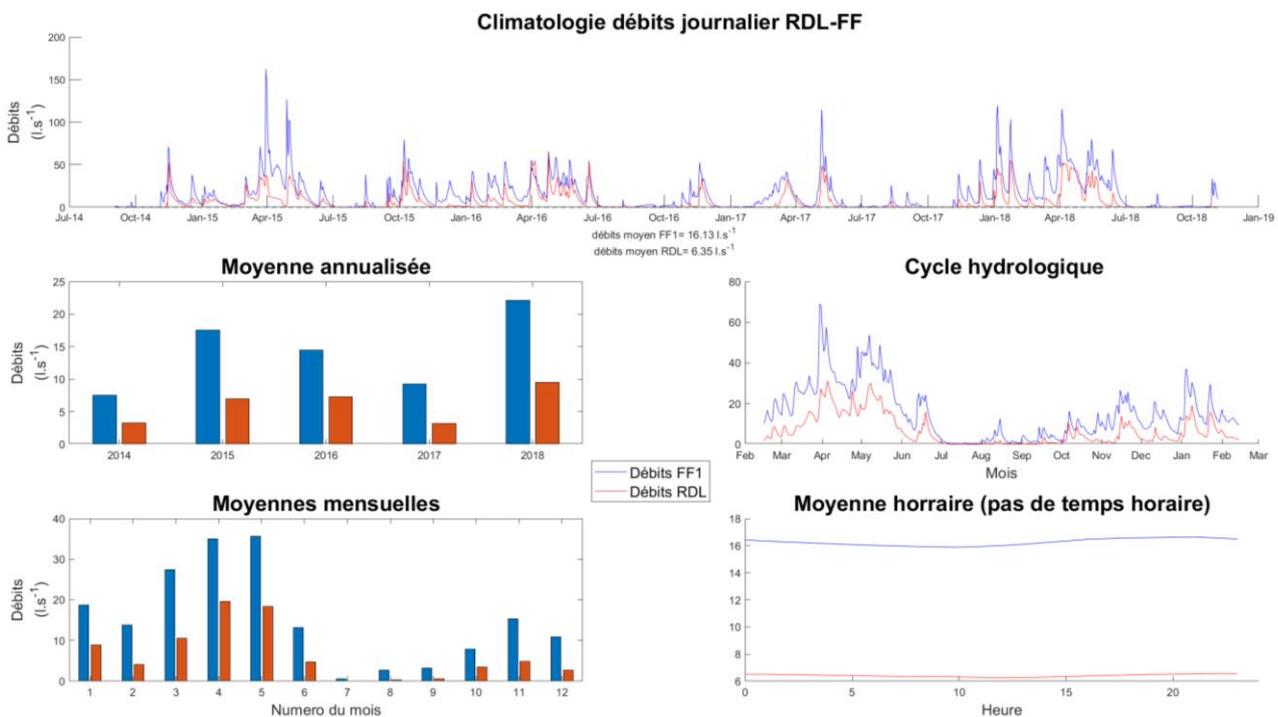


Figure 48. Description statistique des débits journaliers de FF1 et RDL (septembre 2014- novembre 2018)

	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 9. 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 Levelogger) et le piézomètre situé au pied de la

PARTIE II – Volet hydrologie

station météo. La Figure 49 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 50).

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 49. 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)

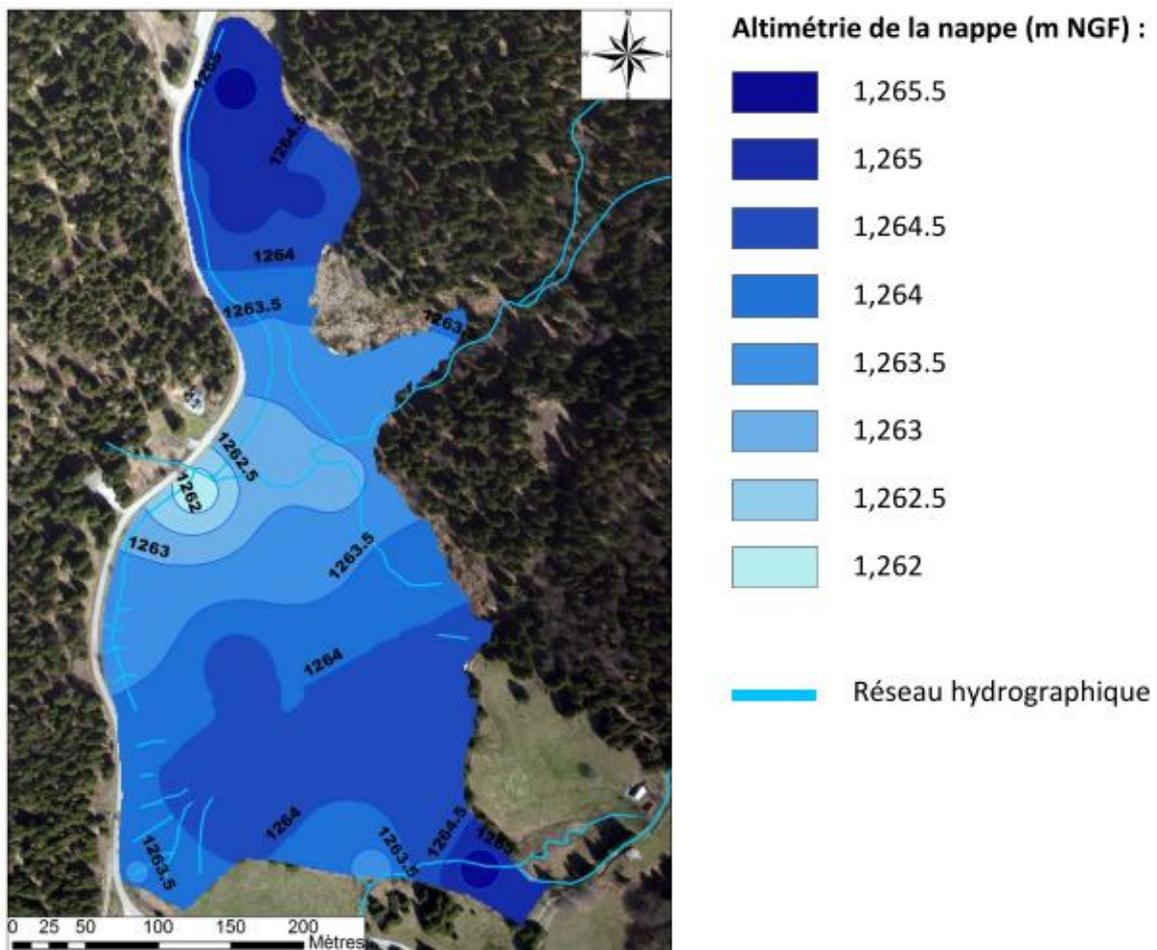


Figure 50. Carte des niveaux piézométriques construite à partir des niveaux relevés le 25.06.2018 (Pascoletti, 2018)

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 10. 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 51). 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.

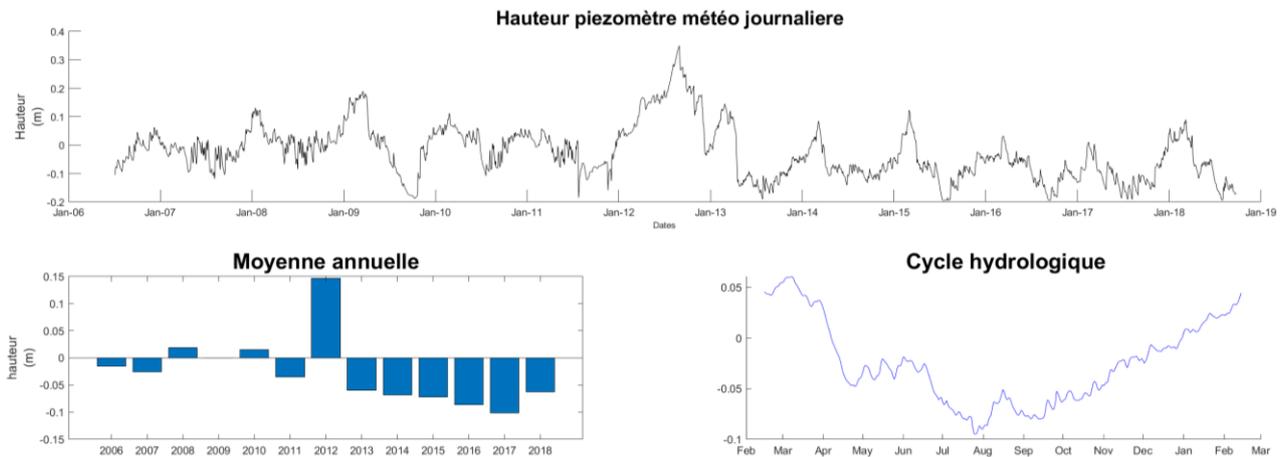


Figure 51. Description statistique des battements de nappe journaliers relevés par le piézomètre de la station météorologique

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 52 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.

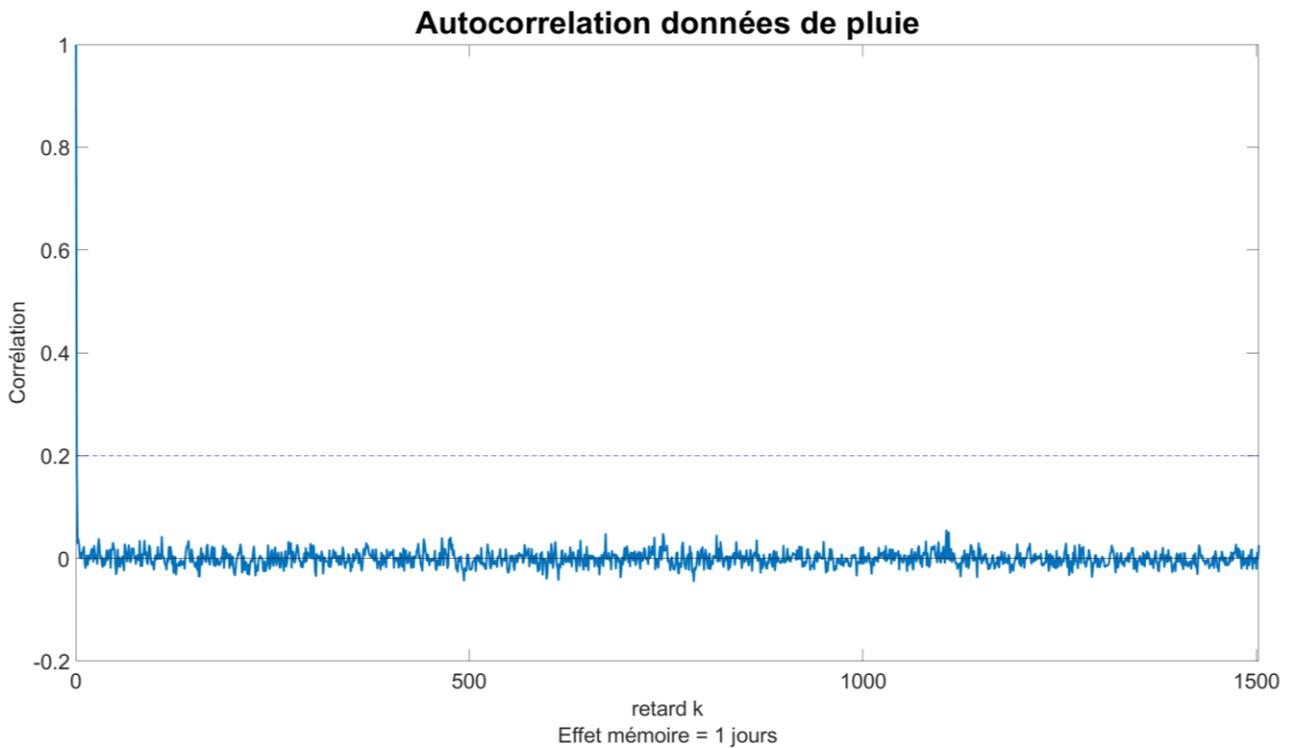


Figure 52. Autocorrélogramme du signal de pluie

L'étude du spectre simple du signal de pluie, en échelle logarithmique (Figure 53), 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.

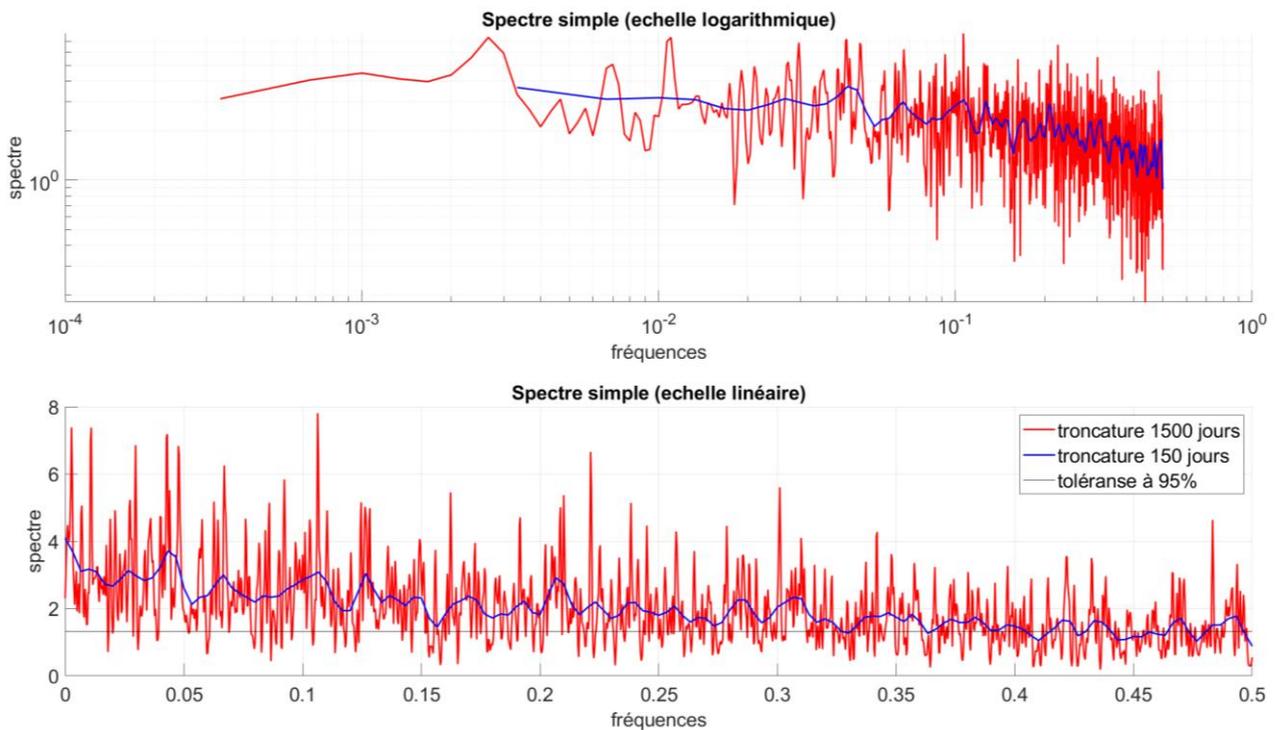


Figure 53. Spectre des précipitations journalières a) échelle logarithmique b) échelle linéaire.

3.1.4.3.2. Débits

L'effet mémoire, obtenu pour le débit FF1, sur la période étudiée (Figure 54), 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 annuelles (365 jours et 730 jours).

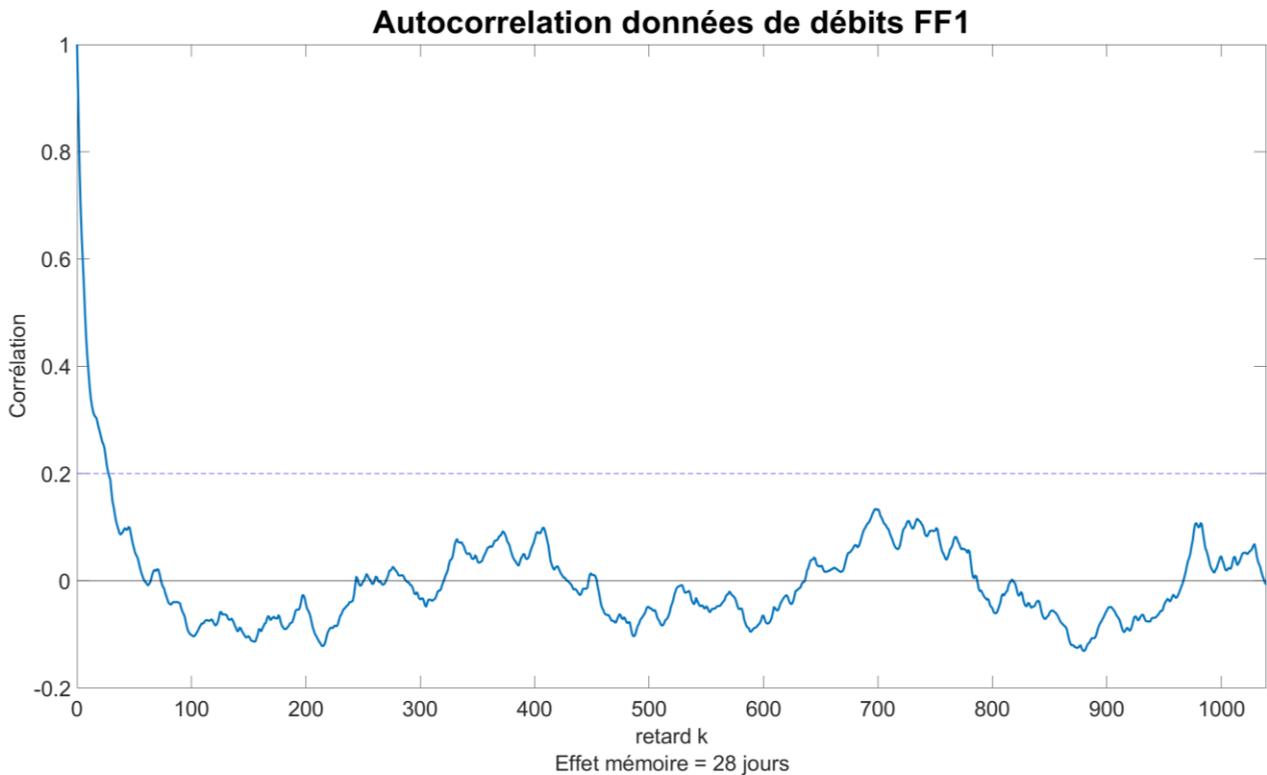


Figure 54. Autocorrélogramme du signal de débits issus de la sonde FF1

Le spectre du débit, tracé en coordonnées logarithmiques pour deux troncatures différentes (Figure 55), 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 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 55) 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 ($F_{\text{cm}} = 0,11667 \text{ j}^{-1}$).

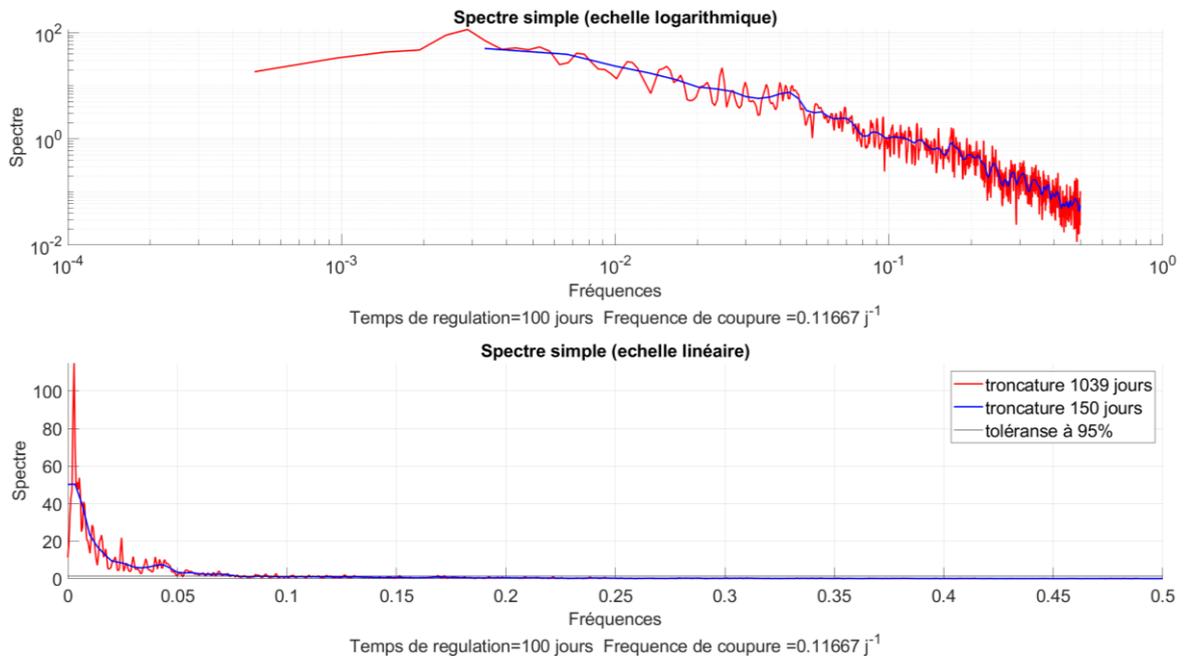


Figure 55. a) spectre des débits journaliers (échelle logarithmique) b) spectre des débits journaliers (échelle linéaire)

3.1.4.3.3. Piézomètres

L'autocorrélogramme appliqué au niveau piézométrique relevé aux piézomètres 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 piézométrique est inertielle et s'étale dans le temps. L'autocorrélogramme met également en évidence des pics de corrélation significatifs des périodicité annuelles (365 jours et 730 jours) qui, comme dans l'étude du signal de débits, traduisent une cyclicité annuelle.

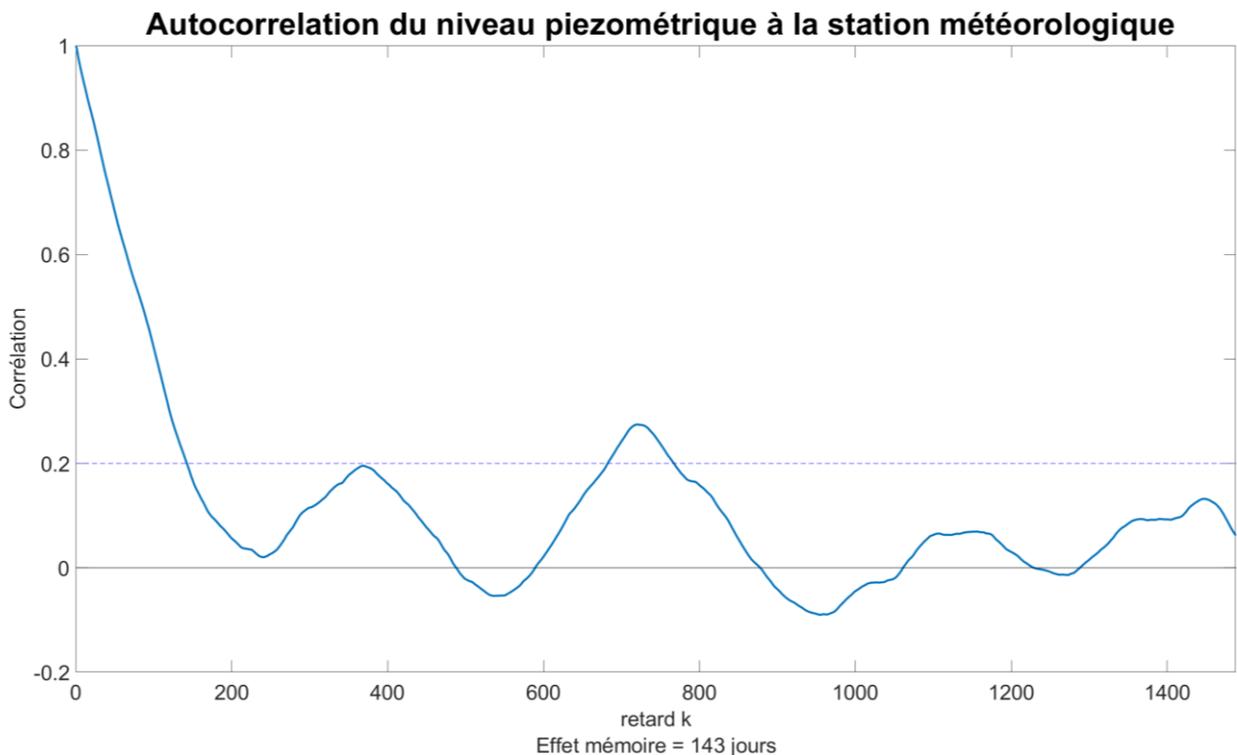


Figure 56. Autocorrélogramme du niveau piézométrique au piézomètre de la station météorologique

Le spectre du niveau d'eau du piézomètre de la station météorologique, tracé en coordonnées logarithmiques pour deux troncatures différentes (Figure 57), 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 57, 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), bi-annuelle (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 ($F_{CM} = 0,026667 \text{ j}^{-1}$).

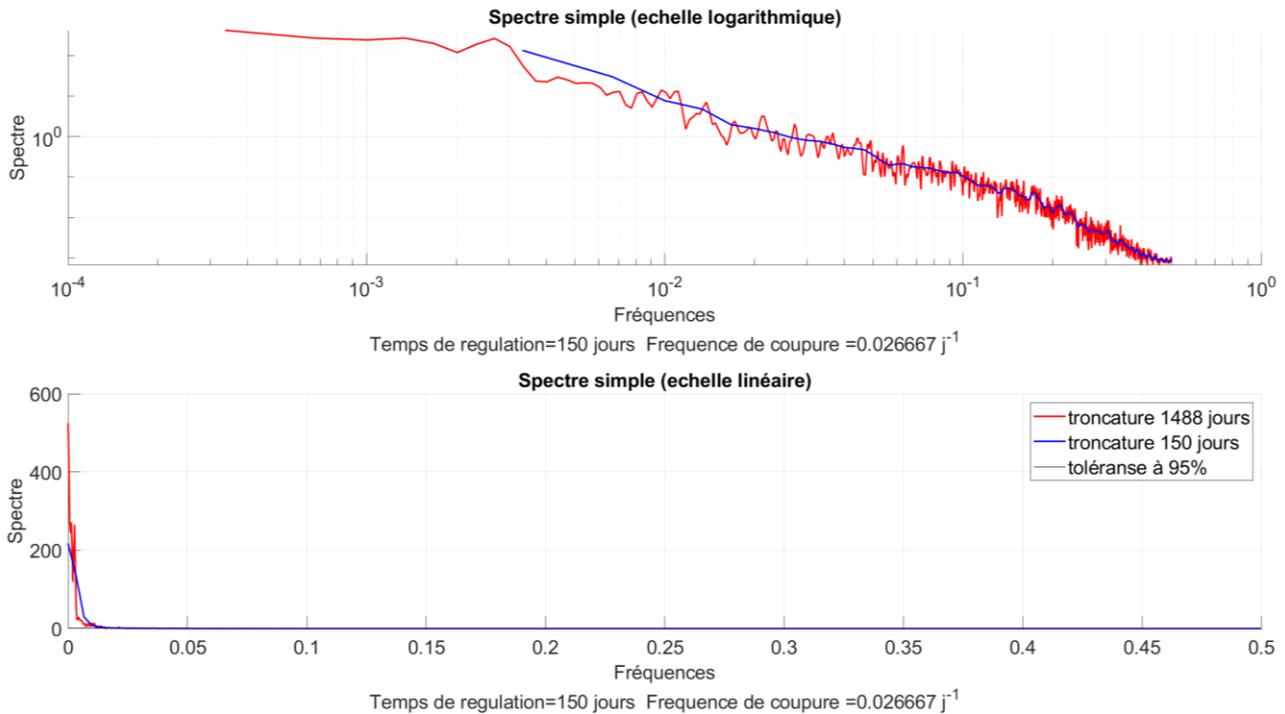


Figure 57. a) spectre du niveau piézométrique au piézomètre de la station météorologique (échelle logarithmique) b) spectre du niveau piézométrique au piézomètre de la station météorologique (échelle linéaire)

3.1.4.3.4. Evapotranspiration

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 59), présente une légère pente négative (-0,92), signifiant que le processus d'évapotranspiration n'est pas strictement aléatoire. La représentation graphique du spectre (Figure 59, 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 ($F_{CM} = 0,11667 \text{ j}^{-1}$).

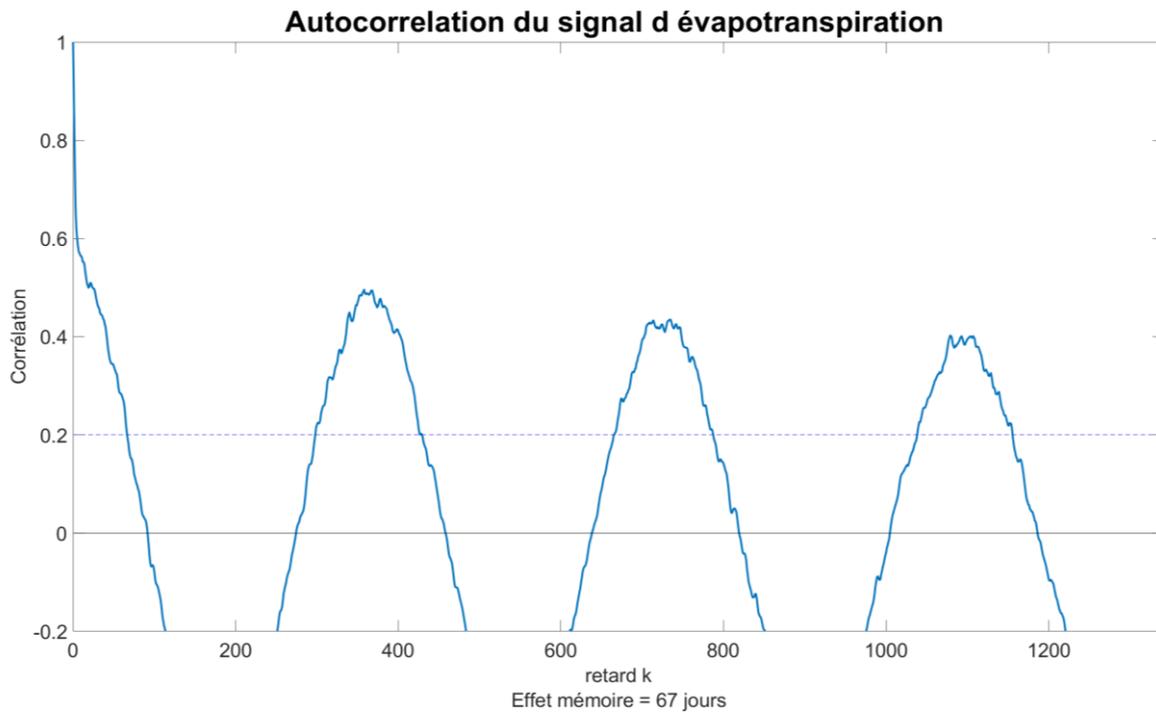


Figure 58. Autocorrélogramme du signal d'évapotranspiration

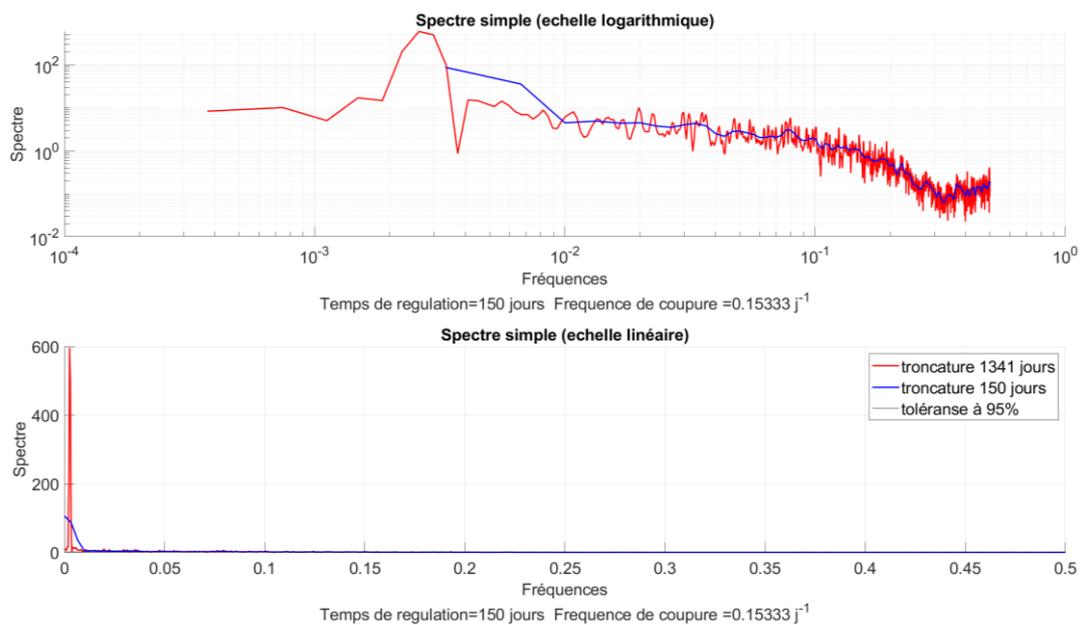


Figure 59. a) spectre des cumuls journaliers d'évapotranspiration (échelle logarithmique) b) spectre des cumuls journaliers d'évapotranspiration (échelle linéaire)

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 60) 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.

Correlogramme croisé pluie-débit FF1

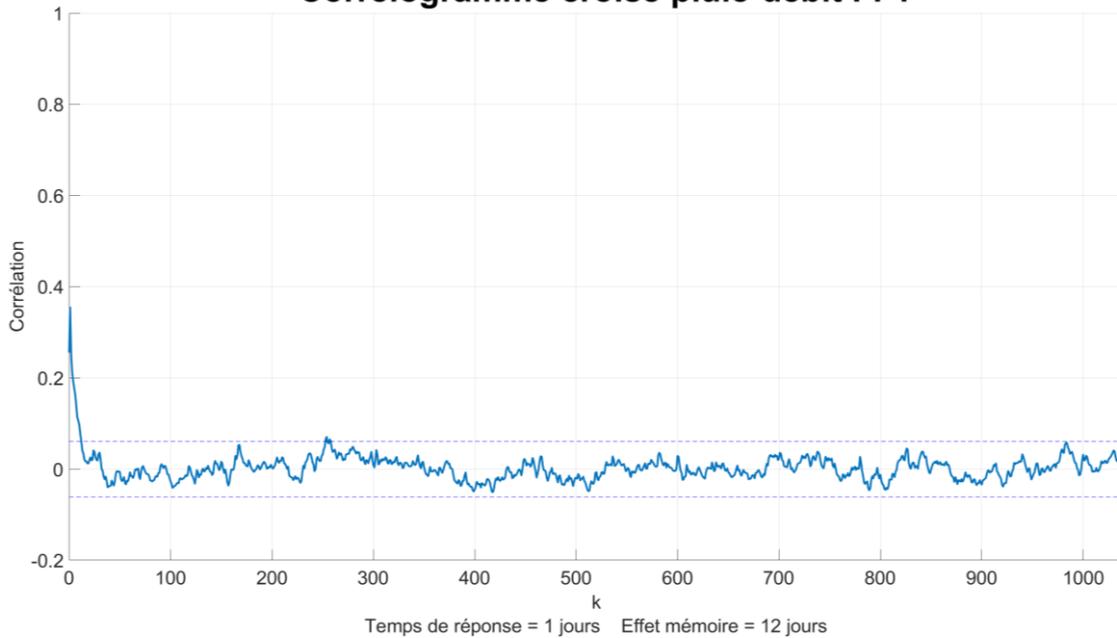


Figure 60. Correlogramme croisé pluie-débits FF1 (les lignes horizontales en pointillés représentent les seuils de décorrélation théoriques), période novembre 2009- novembre 2018.

La représentation de la fonction de transfert en échelles logarithmiques (Figure 61) 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 61 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.

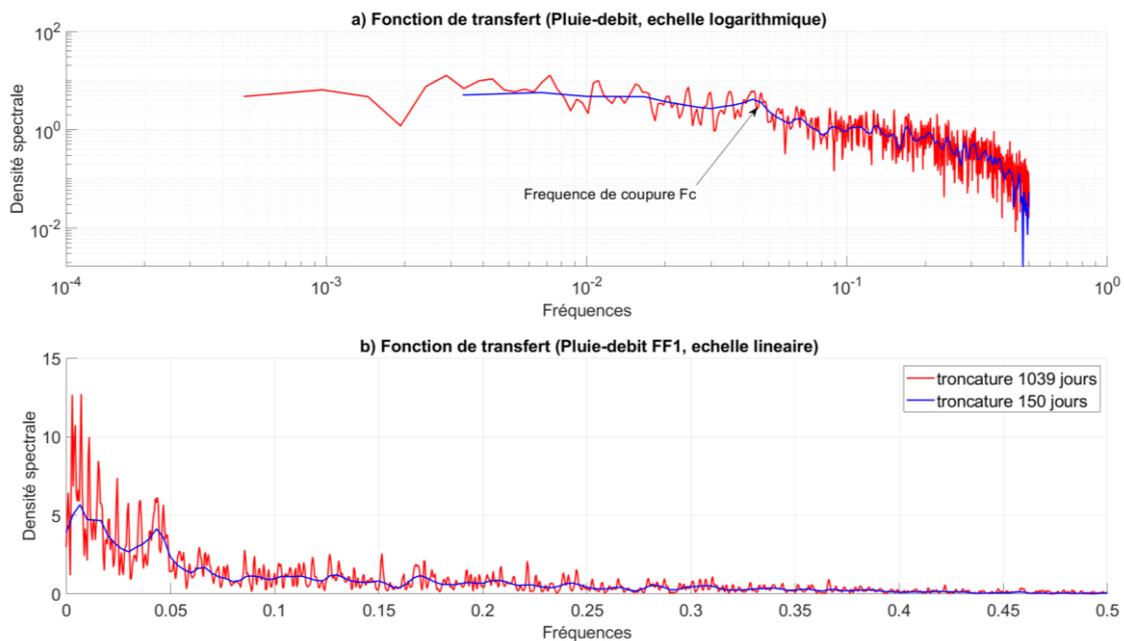


Figure 61. a) fonction de transfert en échelle logarithmique, b) fonction de transfert en échelles linéaire

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 62). Néanmoins, les calculs statistiques donnent 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.

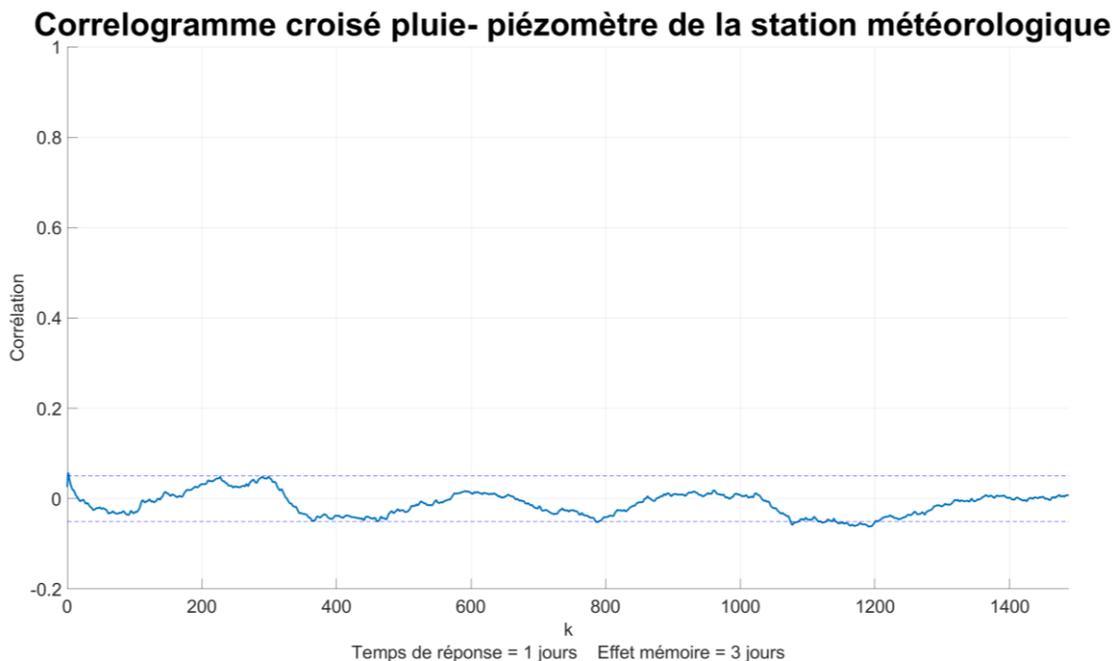


Figure 62. Corrélogramme croisé pluie-piézomètre de la station météorologique (les lignes horizontales en pointillés représentent les seuils de décorrélation théoriques), période juillet 2006- décembre 2018.

3.1.5. Premières conclusions

3.1.5.1. Débits/période d'étiages

Le graphe des fréquences des débits journaliers issus de la sonde FF1 sur la période novembre 2009- décembre 2018 (Figure 63) permet de mettre évidence 4 fonctionnements bien différents du système hydrologique : gros débits (comportement 1 pour des débits supérieurs à Q5), majorité des débits (comportement 2 et 3 pour des débits entre Q5 et Q90), faibles débits (comportement 4, débits inférieurs à Q90). Concernant l'étiage, nous pouvons définir le débits d'étiage comme Q90 (0.36 l.s^{-1}).

Le débit étant déterminé, nous définissons une période d'étiage un période (>1 jours) au cours de laquelle le débit du RDL passe sous la valeur de Q90. Ainsi, sur la période novembre 2009- décembre 2018, nous comptabilisons 312 jours d'étiages repartis essentiellement sur la période juillet-octobre. En moyenne, il y a 35 ± 22 jours d'étiages par an (Figure 64). L'année 2018 est l'année qui comptabilise le plus de jours d'étiage (77). Les mois d'étiages s'étalent de juillet à octobre (Figure 64). Notons aussi, les présences d'étiages ponctuels hivernaux.

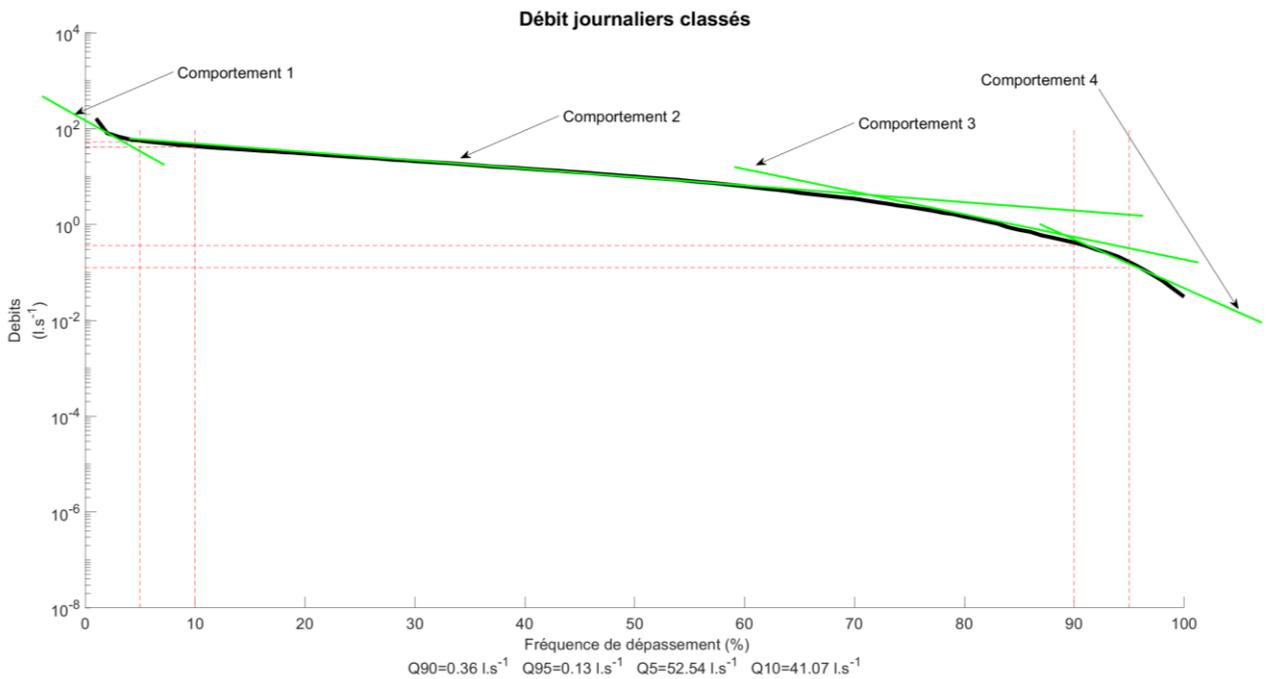
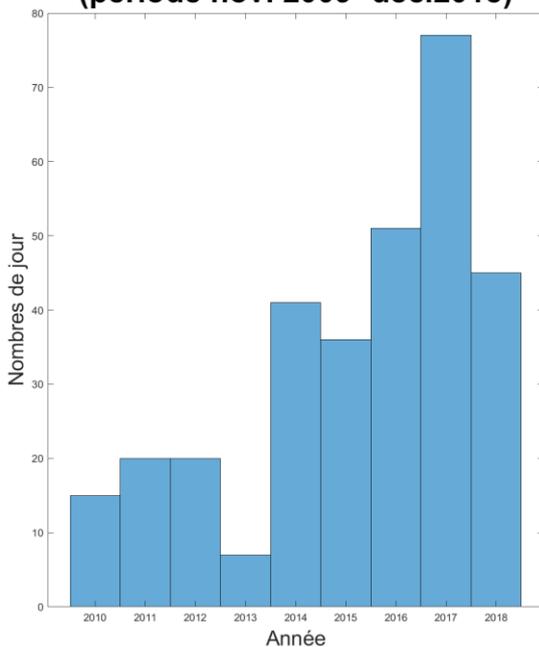


Figure 63. Graphe des fréquences des débits FF1 journaliers sur la période novembre 2009-décembre 2018

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



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

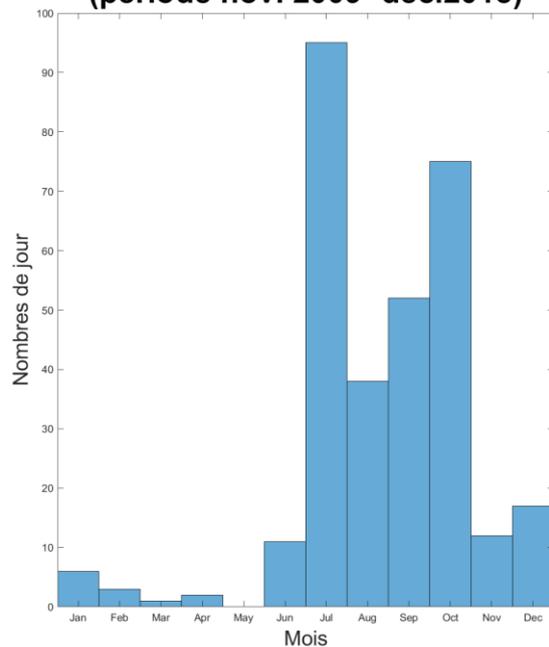


Figure 64. Répartitions des jours d'étiages sur la période novembre 2009- décembre 2018 : a) annuellement, b) mensuellement

3.1.5.2. Saisonnalité des index d'analyse corrélatore.

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 65). 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 i) une faible variation du temps

de réponse restant sur une base de 1 jour ii) 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.

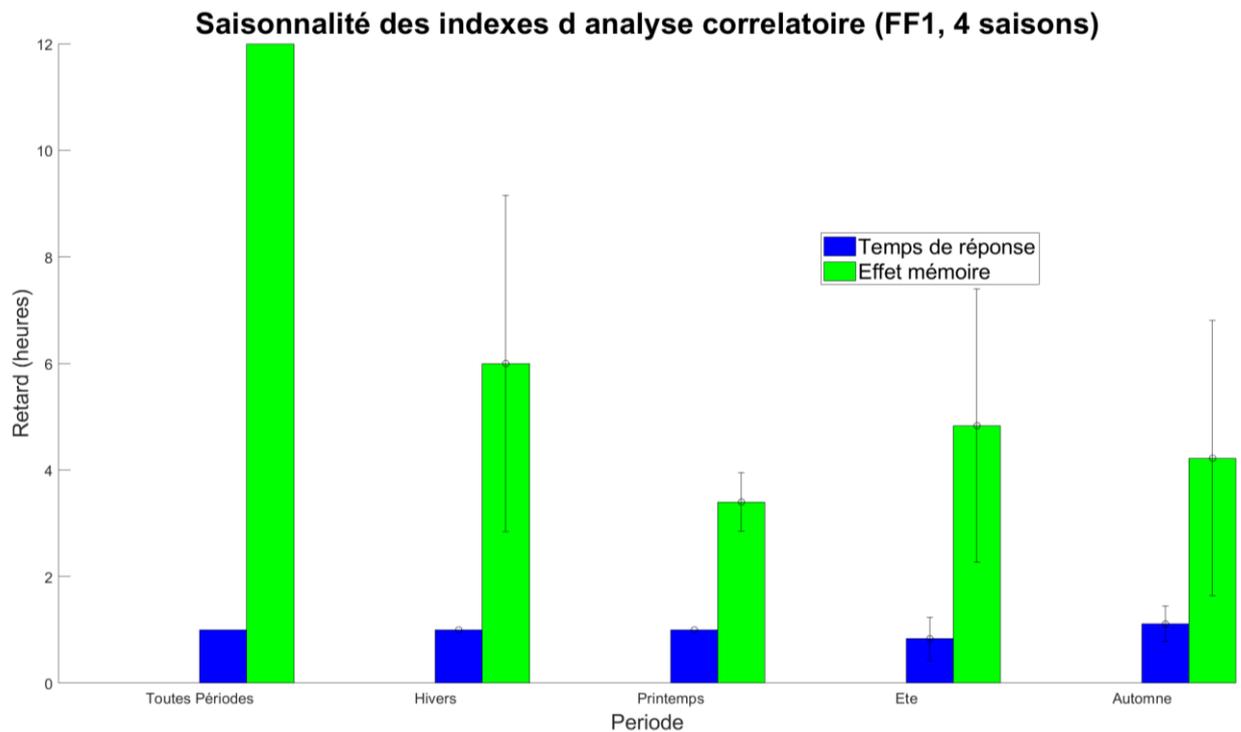


Figure 65. Étude de la saisonnalité des temps de réponse et effet mémoire du ruisseau de Fontfroide

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 66 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 i) la tourbière permet une restitution plus large de la pluie via le ruisseau de FF1, ii) cette restitution pour le ruisseau passant par la tourbière possède une plus grande variabilité.

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 moment (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 66), 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'étiage estival et automnal de la tourbière au ruisseau de Fontfroide.

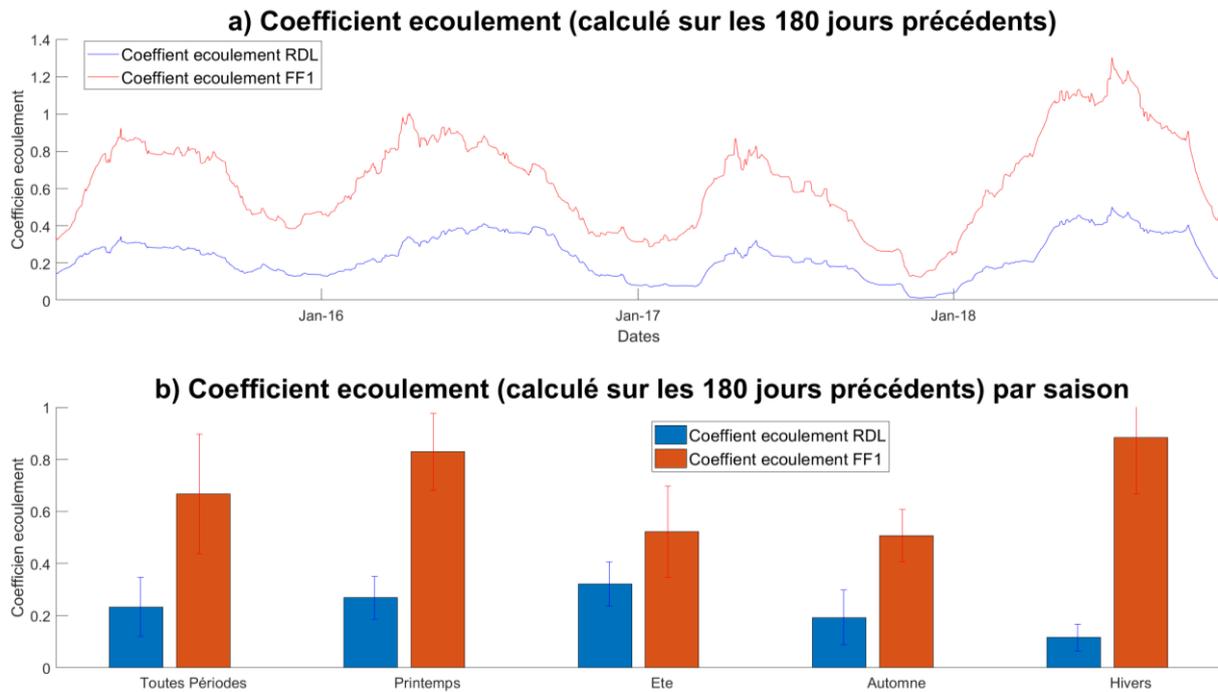


Figure 66. Analyse du coefficient d'écoulement pour les ruisseaux de Fontfroide et du lac: a) série temporelles; b) Analyse de la saisonnalité

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 11. 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 $13,92 \pm 6,03 \mu\text{m.cm}^{-1}$, et les données de débits de $-9,57 \pm 12,24 \text{ l.s}^{-1}$. Il apparaît important de i) ré-établir la courbe de tarage de FF1, i) ré-étalonner les sondes de conductivités ;

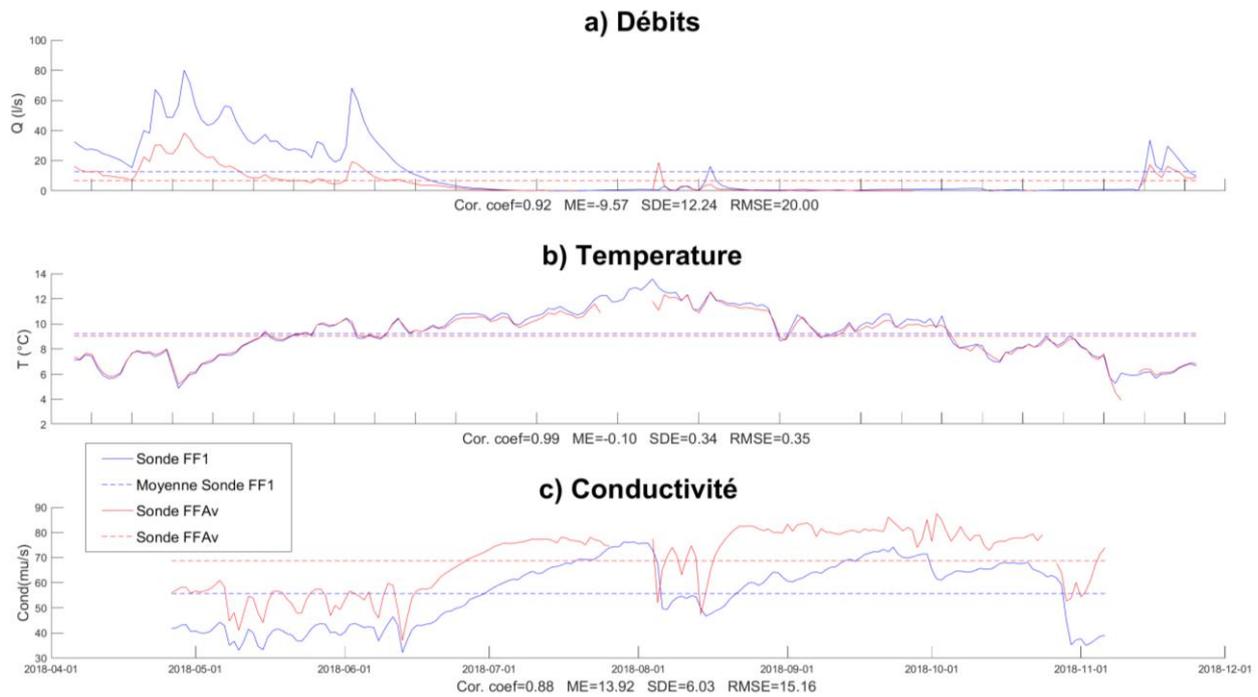


Figure 67. Analyse comparatives entre les sondes FF1 et FFAv: a) débits b) température, c) conductivité

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 i) sur certaines courtes périodes, il peut y avoir des inversions (plus de conductivité en aval, plus de débits en aval), ii) les inversions notées en aout 2018 correspondent vraisemblablement à la fin d'une période où une des deux sondes était restée hors d'eau.

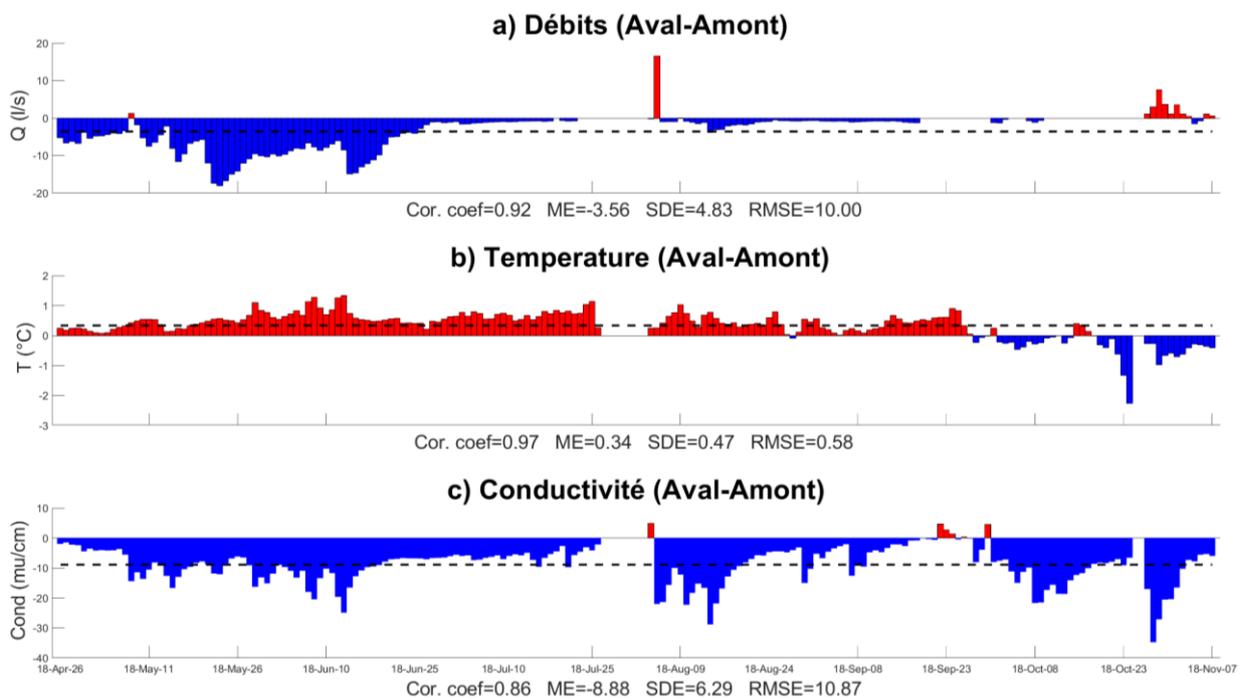


Figure 68. Analyse comparatives entre les sondes FFAm et FFAv: a) débits b) température, c) conductivité.

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 69) peuvent être vraisemblablement attribuées à la traversée de la tourbière. La comparaison des débits montre que leur débit 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 apparaît que l'effet mémoire (Pluie-débits RDL) chute drastiquement à 1 jours pendant le printemps (contre 3 pour le ruisseau de Fontfroide). Ainsi, la tourbière réagit plus lentement aux pluies printanières.

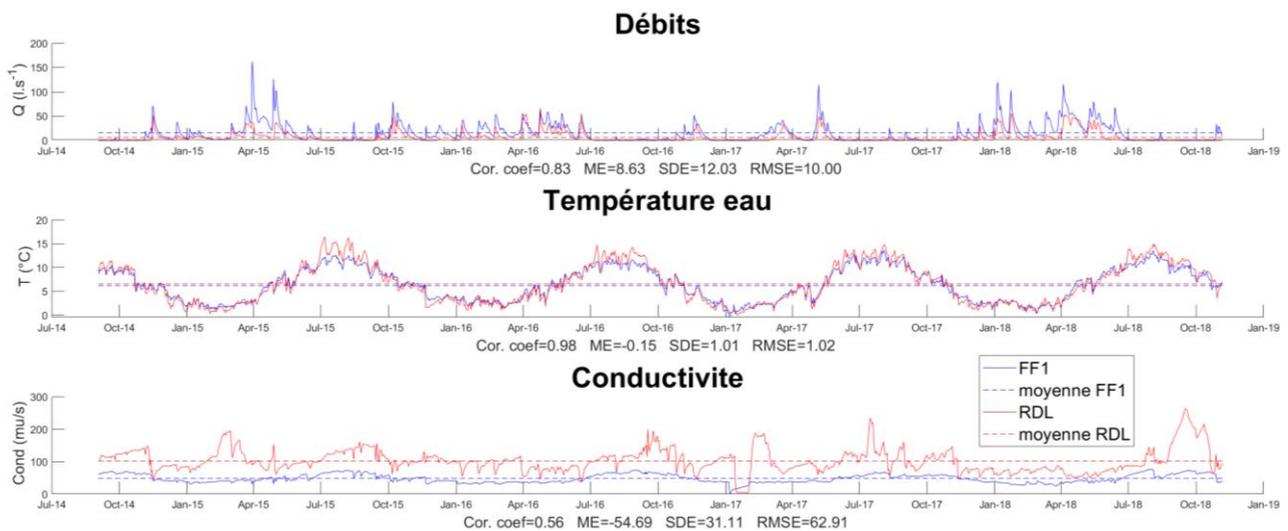


Figure 69. Comparaison entre la sonde FF1 et la sonde RDL a) débits, b) température, c) conductivité

3.2. Tourbière de Frasne (à compléter)

À intégrer :

Même méthode que sur Luitel

Intégrer les premiers résultats de H. Caldirak

Perspectives pour la phase 3

Lien/coordination avec les travaux de Guillaume Bertrand (UFC)

4. Modélisation du rôle de soutien d'étiage

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

Cette partie présente une synthèse du travail de modélisation du soutien d'étiage 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-Etienne⁷. Ce stage a été réalisé conjointement à celui de T. Jolly sur le volet pédologie (Partie III - §2.1 Caractérisation du fonctionnement hydrogéomorphologique de la Tourbière de Luitel, p96)

L'approche qui a été choisie ici pour l'évaluation quantitative du soutien d'étiage 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 Vensim, 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'étiage ont été calculés à partir de ce modèle validé.

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

Les zones humides se caractérisent par la présence d'eau permanente ou temporaire (SIE, 2017), l'aspect hydrologique est donc fondamental pour leur compréhension. Par ailleurs, l'hydrologie conditionne d'autres aspects cruciaux, tels que l'écologie, en induisant la présence d'une flore spécifique au caractère hygrophile (SIE, 2017), et la pédologie, en conférant aux sols leur propriété hydromorphe (Medde et Gis Sol, 2013). Les zones humides sont classifiées 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 la quantité et la qualité des eaux à l'aval (US EPA, 2015). Les tourbières quant à elles sont des milieux représentatifs des zones humides de tête de bassin versant.

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 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

⁷ 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.

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.

La présente étude propose d'opérer cette caractérisation via 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 (Desplanques, 2011), nous ont permis de déduire le fonctionnement hydrologique de la tourbière et de reprendre le bilan hydrologique établi

PARTIE II – Volet hydrologie

plus haut. En vue d'une modélisation, les différents flux ont été ainsi identifiés, quant aux réservoirs, nous en avons distingués 3 (Figure 70) :

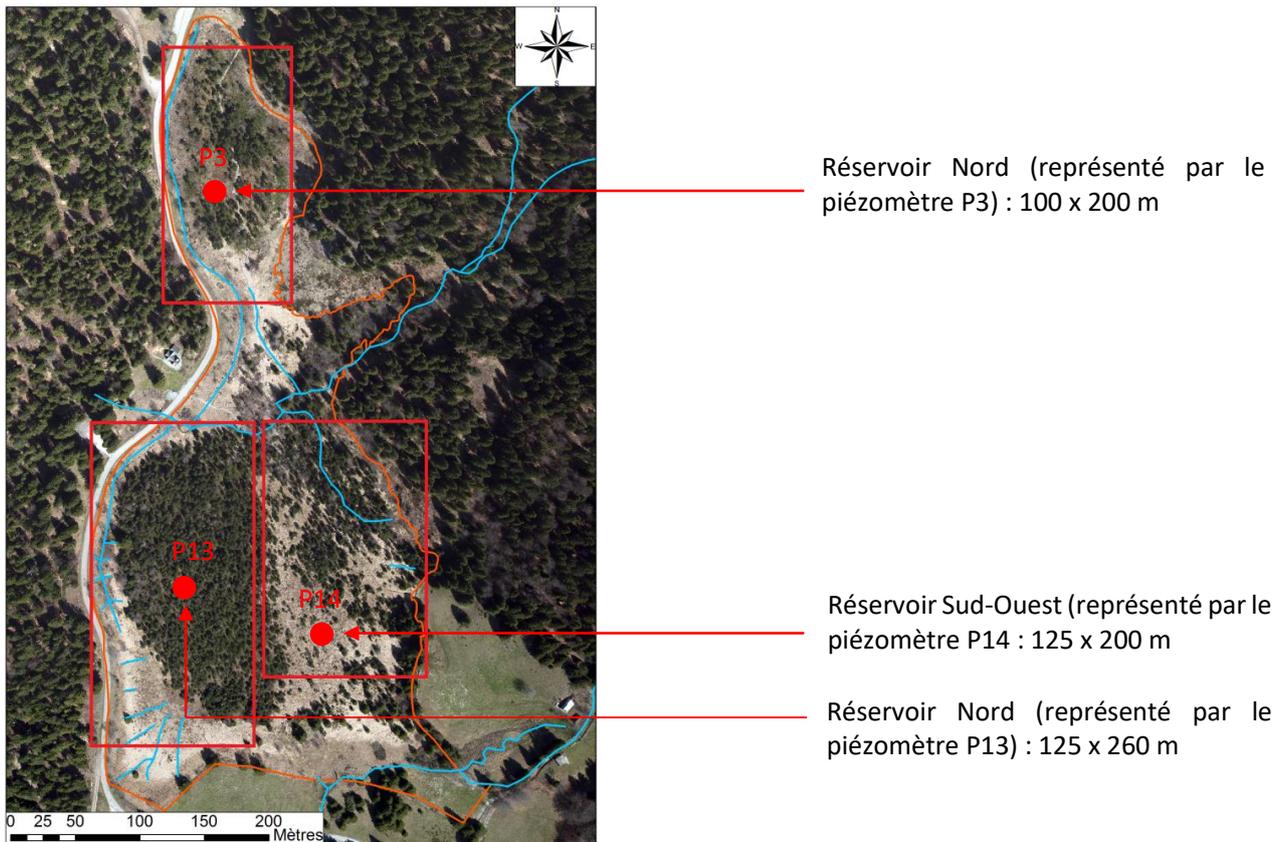


Figure 70 : Trois réservoirs pour la modélisation des flux

La Figure 71 propose une synthèse visuelle des flux et des réservoirs constitutifs du modèle conceptuel. Le modèle complet est présenté Figure 72.

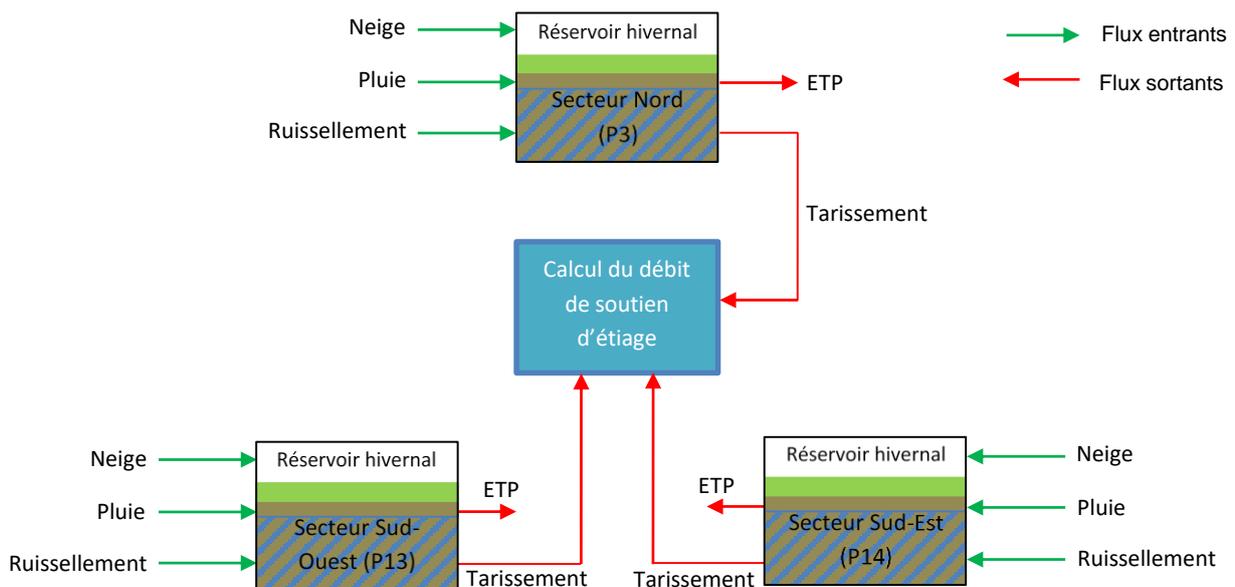


Figure 71 : Schéma de synthèse du modèle conceptuel : flux et réservoirs

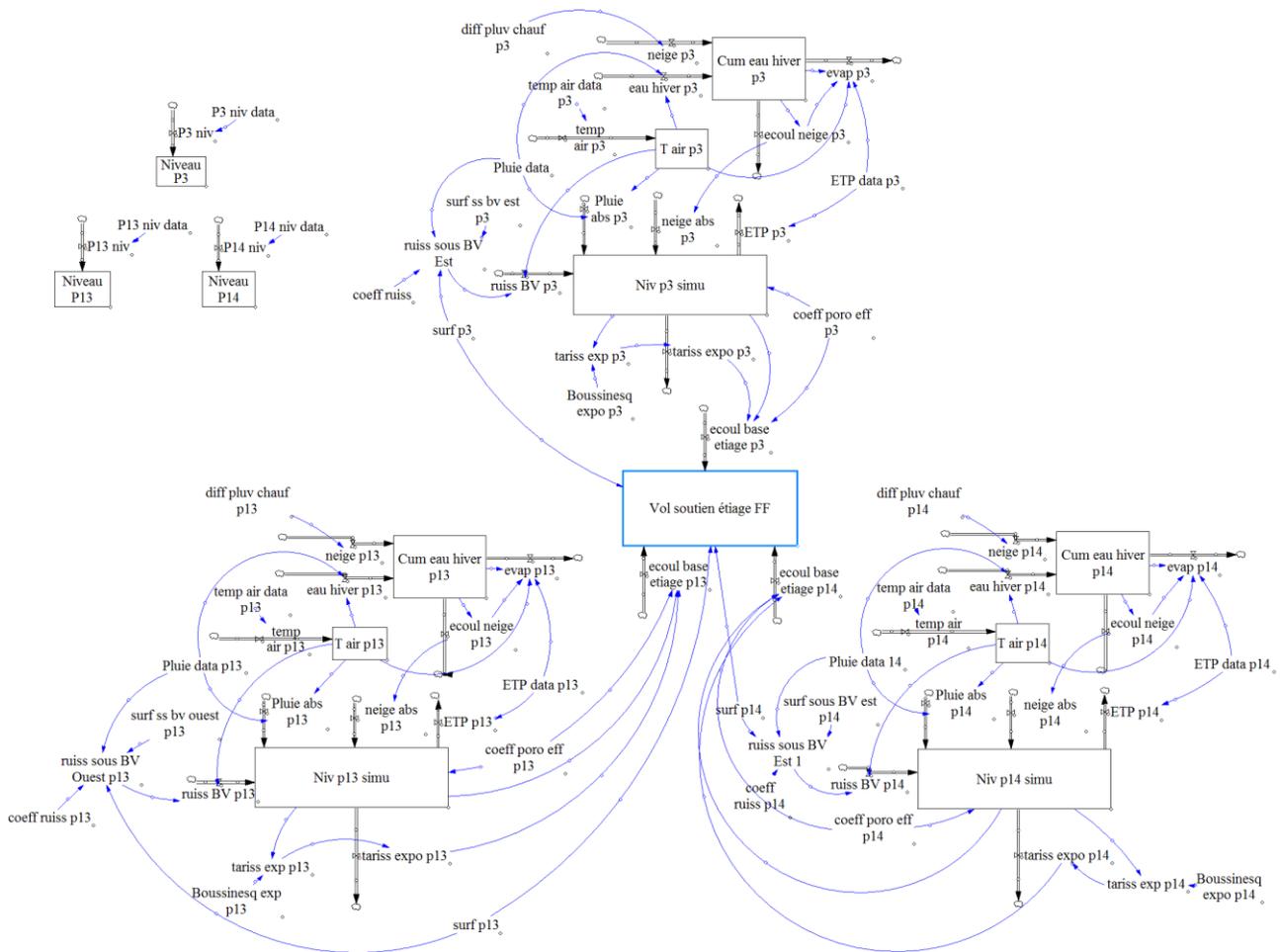
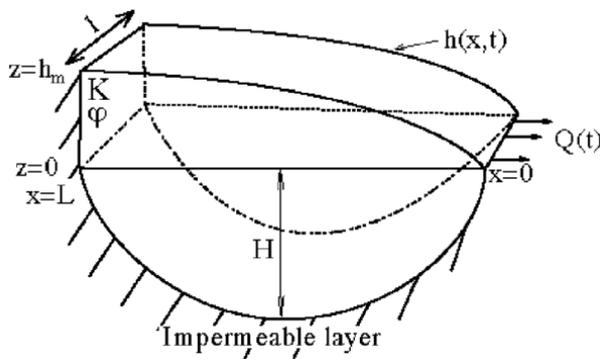


Figure 72 : Modèle complet réalisé avec le logiciel Vensim

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 73).

Modèle :



Formule :

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

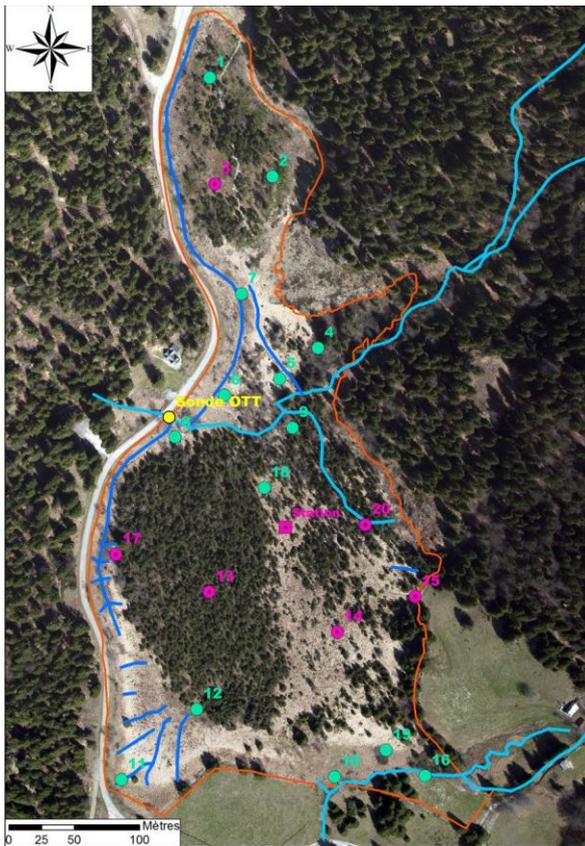
$$Q_0 = (\pi/2) K H l (h_m/L),$$

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

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

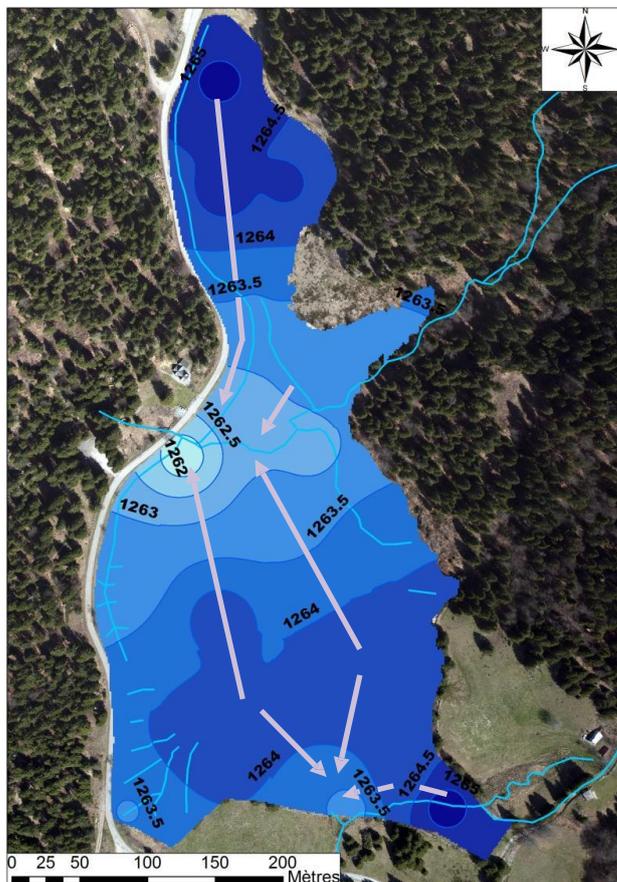
Figure 73 : Modèle d'écoulement des fluides dans un réservoir poreux (Dewandel et al., 2002)



Instrumentation et réseau hydrographique :

- Piézomètre automatique
- Station météo et piézomètre automatique
- Piézomètre manuel
- Sonde OTT
- Cours d'eau
- Fossés de drainage

Figure 74 : Instrumentation de la tourbière du Col du Luitel



Altimétrie de la nappe (m NGF) :

- 1 265,5
- 1 265
- 1 264,5
- 1 264
- 1 263,5
- 1 263
- 1 262,5
- 1 262
- Réseau hydrographique

Figure 75 : 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 74) 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 75) 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 70 et Figure 74). 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 supérieur 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'été 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'été de Fontfroide à partir des écoulements de base et d'autre part, par la mise en corrélation du lit d'été de Fontfroide avec les niveaux de nappes dans la tourbière.

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

D'après le seuil retenu, la simulation (2014-2017) fait apparaître trois périodes d'été estivales, une hivernale et une plus étendue, en 2017, où l'été se manifeste de manière plus diffuse (Figure 76). En termes quantitatifs, la valeur de débit de soutien d'été journalière maximale est de 0,38 l/s.

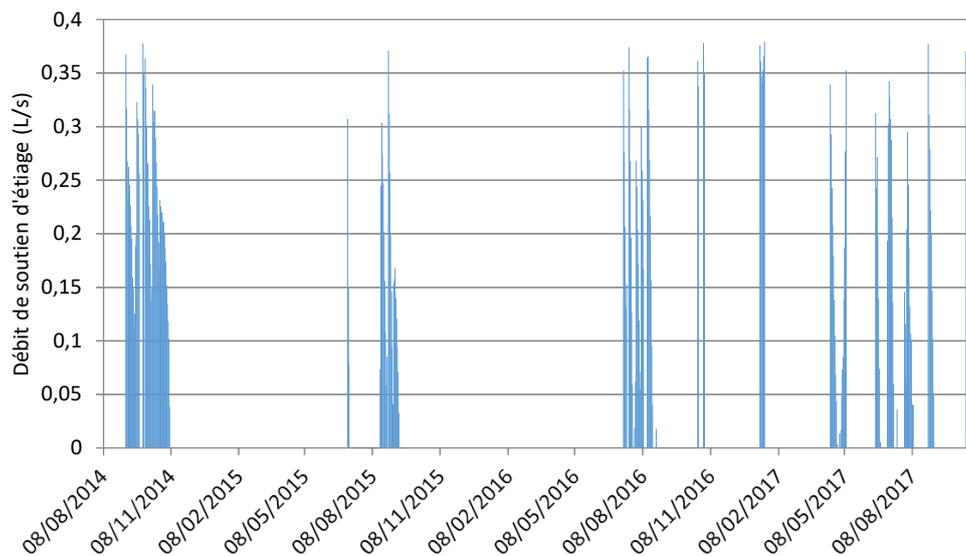


Figure 76 : Débits participant au soutien d'été

PARTIE II – Volet hydrologie

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 12).

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 77 à Figure 80). 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 12 : Comparaison des moyennes des débits de Fontfroide et de soutien d'été par période

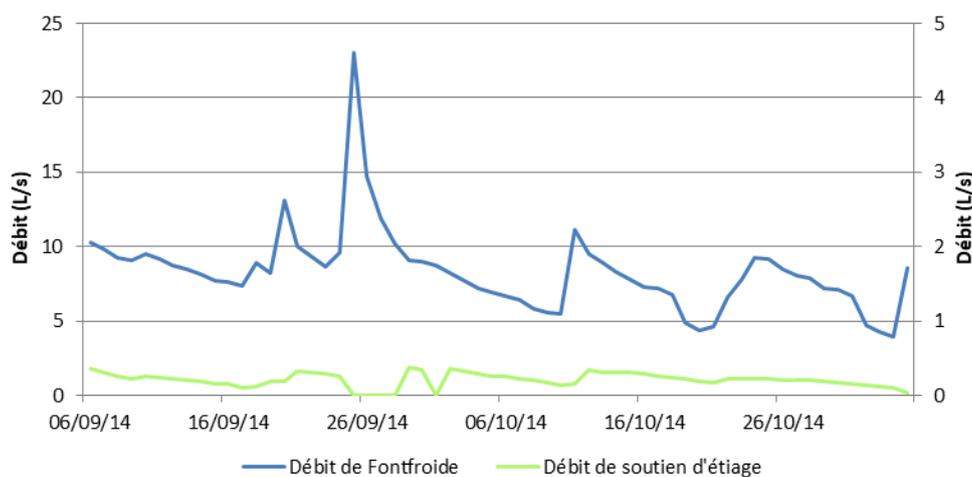


Figure 77 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2014 :

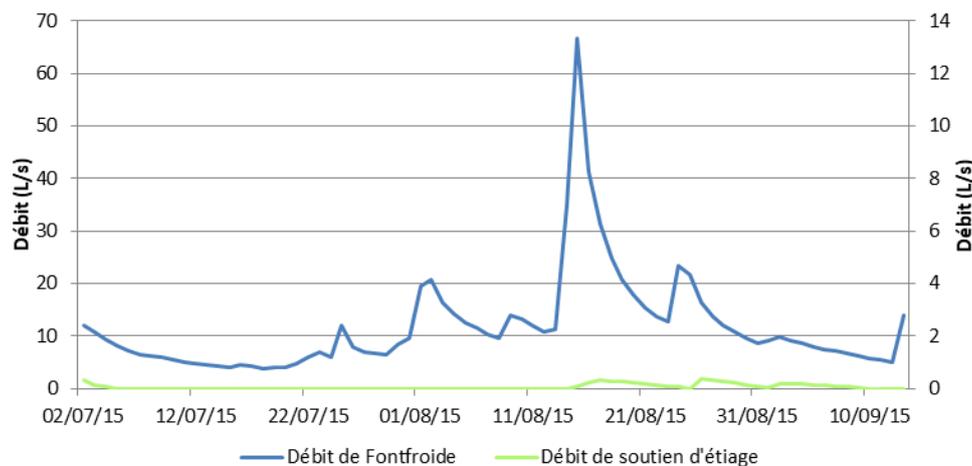


Figure 78 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2015

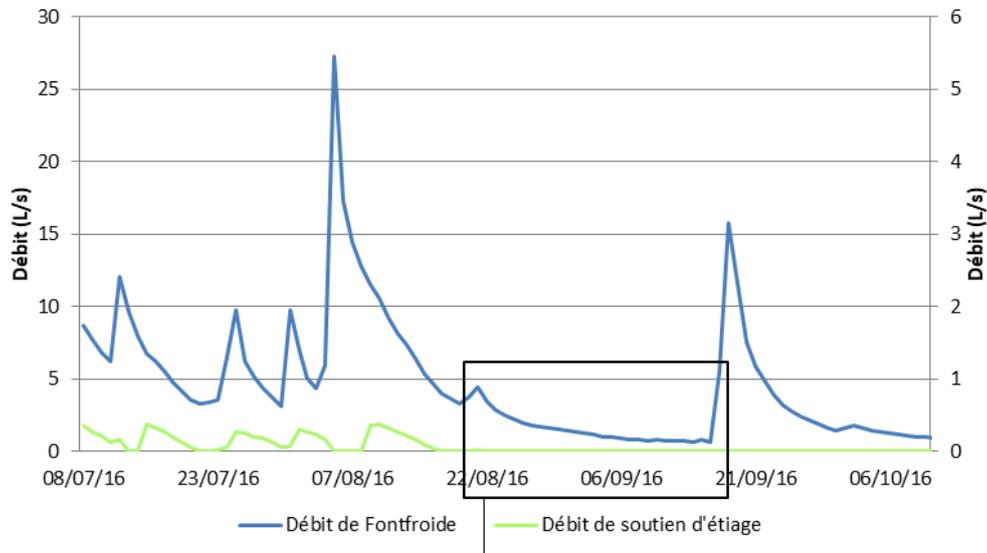


Figure 79 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2016

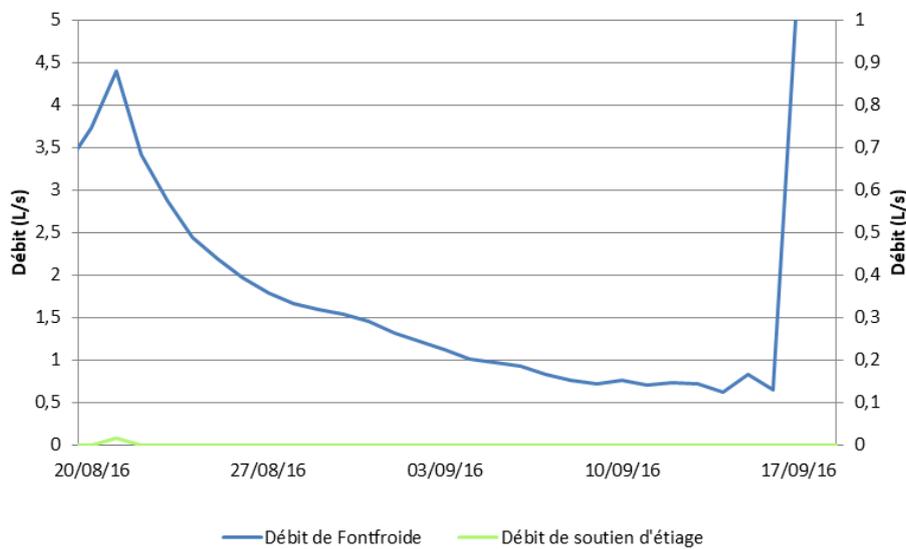


Figure 80 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2016 (agrandissement de la partie encadrée de la figure précédente)

4.1.1. Discussion

La comparaison des valeurs de débit d'été peut également être faite avec d'autres débits, ce qui permet par ailleurs de proposer un recul réflexif sur les résultats et la méthode. Le QMNA5 est généralement utilisé afin d'apprécier l'été, 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 13.

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 13 : Débits moyens annuels et module interannuel de Fontfroide

De plus, notre 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 de nos résultats nous 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. Nos 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 nous a néanmoins permis de modéliser rapidement un mécanisme complexe. Ses imprécisions ne nuisent pas à nos 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 nous 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. Notre démarche est cela dit basée sur des simplifications qui sont acceptées dans une certaine mesure. Pour permettre la mise en œuvre de notre modèle, des valeurs de porosité efficace ou de conductivité hydraulique uniques ont ainsi été affectées à l'ensemble des différentes aires modélisées. Cela dit, notre travail de terrain nous 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 - §2.1 Caractérisation du fonctionnement hydrogéomorphologique de la Tourbière de Luitel, p96) 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) que nous n'avons pas 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 - §2.1 Caractérisation du fonctionnement hydrogéomorphologique de la Tourbière de Luitel, p96).

La construction de notre modèle a enfin été très largement tributaire des données dont nous disposions, d'autant que le modèle a été conditionné par la manière dont nous avons traité ces données. Il nous 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. Cela dit cette imprécision ne nous 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 météorologique. Le calcul de la centrale 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, il y a fort à parier que les arbres drainent d'avantage d'eau et plus en profondeur grâce à leurs racines. D'ailleurs les variations des hauteurs de nappe sont susceptibles de soumettre l'évapotranspiration à un effet de seuil, qui correspond à la profondeur à laquelle les espèces végétales sont capables de puiser de l'eau et ainsi d'enclencher le phénomène d'évapotranspiration.

Au vu de tous ces éléments qui relativisent notre méthode et nos résultats, notons qu'une perspective intéressante serait de 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 ? Notre modèle s'est donc construit à partir d'hypothèses, mais d'autres pourraient aussi être testées.

4.1.2. Conclusion

Il ressort donc de notre étude quelques résultats dont nous espérons qu'ils pourront faire avancer la connaissance des zones humides, mais qui sont toutefois à interpréter avec un certain recul de par le fait qu'ils découlent d'un choix méthodologique qui nous 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 notre démarche simplificatrice mais elles engagent tout de même à une certaine prudence quant à l'utilisation de nos résultats. L'intérêt de ce travail réside donc peut-être surtout dans la démarche qui nous a permis d'aboutir aux résultats que nous avons présentés, et le fait qu'elle puisse être reprise pour d'autres études. Cela pourrait éventuellement être le cas pour le site de Frasné dans le Doubs. 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. Notre démarche pourrait ainsi servir de base pour une modélisation d'un système plus grand et plus composite tel que celui de Frasné.

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 81 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																					
	Piezomètre 3																					
Piezo (T,D)	Piezomètre 13																					
	Piezomètre 14																					
Meteo	Evapotranspiration																					
	Evapotranspiration virtuelle																					
	Pluie																					
	Pluie avec neige																					

Figure 81. Données utilisées pour modélisations à base de réseaux de neurones (Pluie avec neige est aussi dénommée pluie hybride dans le texte)

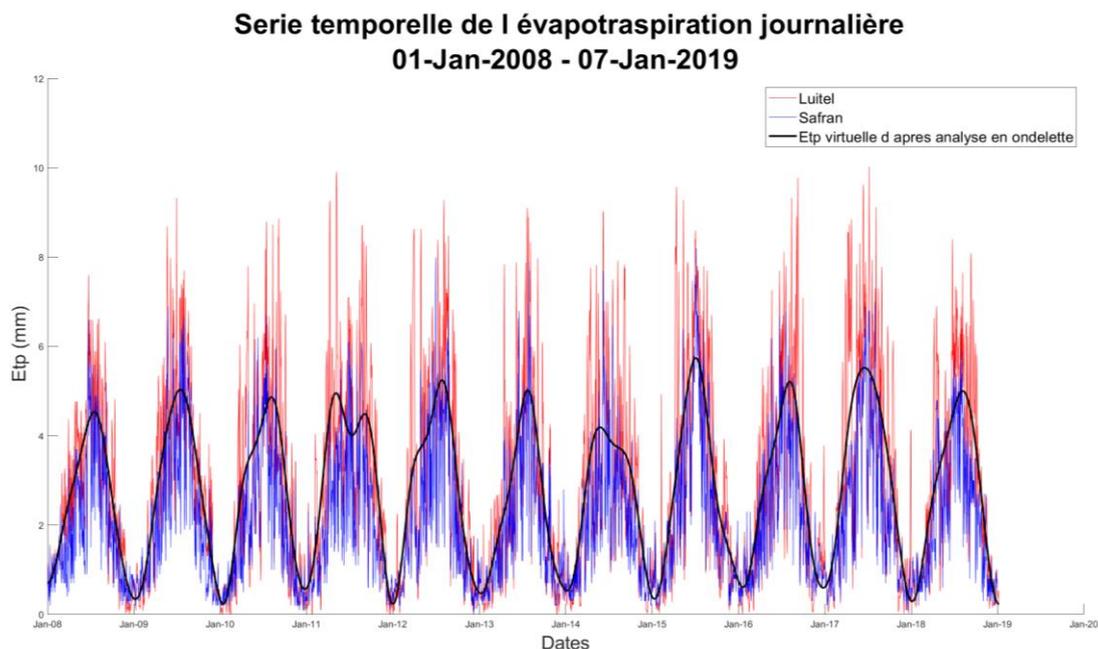


Figure 82. Comparaison de l'évapotranspiration virtuelle avec l'évaporation mesurée, et l'évaporation fournie par le modèle SAFRAN-ISBA

P3. Les piézomètres sont agrégés via 5 neurones linéaires et le nombre de neurones cachés optimal est de 6.

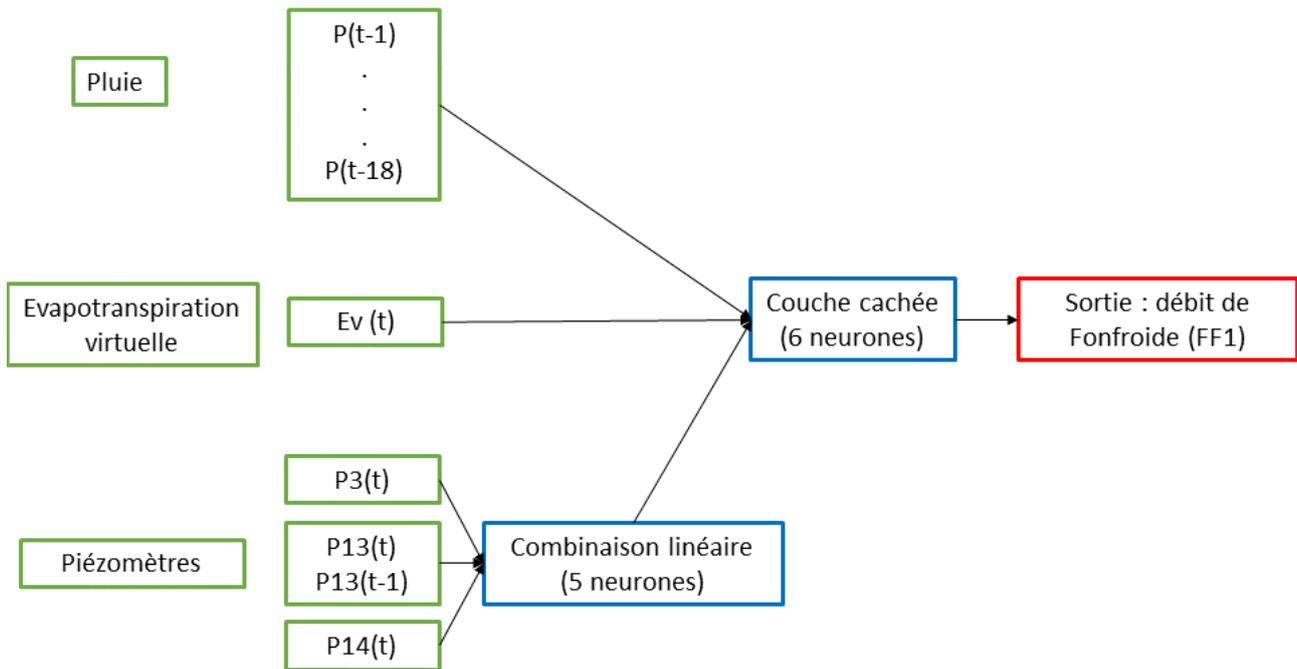


Figure 84. Architecture du réseau choisi pour modéliser le débit de Fontfroide

La visualisation de la comparaison simulation/observation durant apprentissage montre que le modèle reproduit assez fidèlement les débits observés (Figure 85). 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 85) :

- 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. 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'étiage.

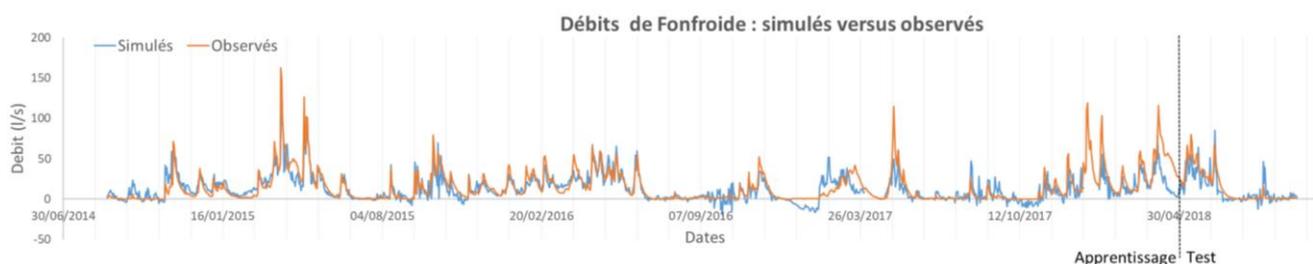


Figure 85. Débits de Fontfroide : simulés versus observés

4.2.3.2. Modélisation de piézomètres

La Figure 86 décrit le modèle à réseau de neurones simulant au mieux le piézomètre P3. Il s'agit d'un réseau récurrent avec 8 entrées récurrentes. Pour simuler une hauteur piézométrique journalière à un instant donné t , les entrées associées sont les informations de pluies allant du jour précédent jusqu'au 14^{ème} jour, l'évaporation sur le même jour. Le nombre de neurones cachés optimal est de 10.

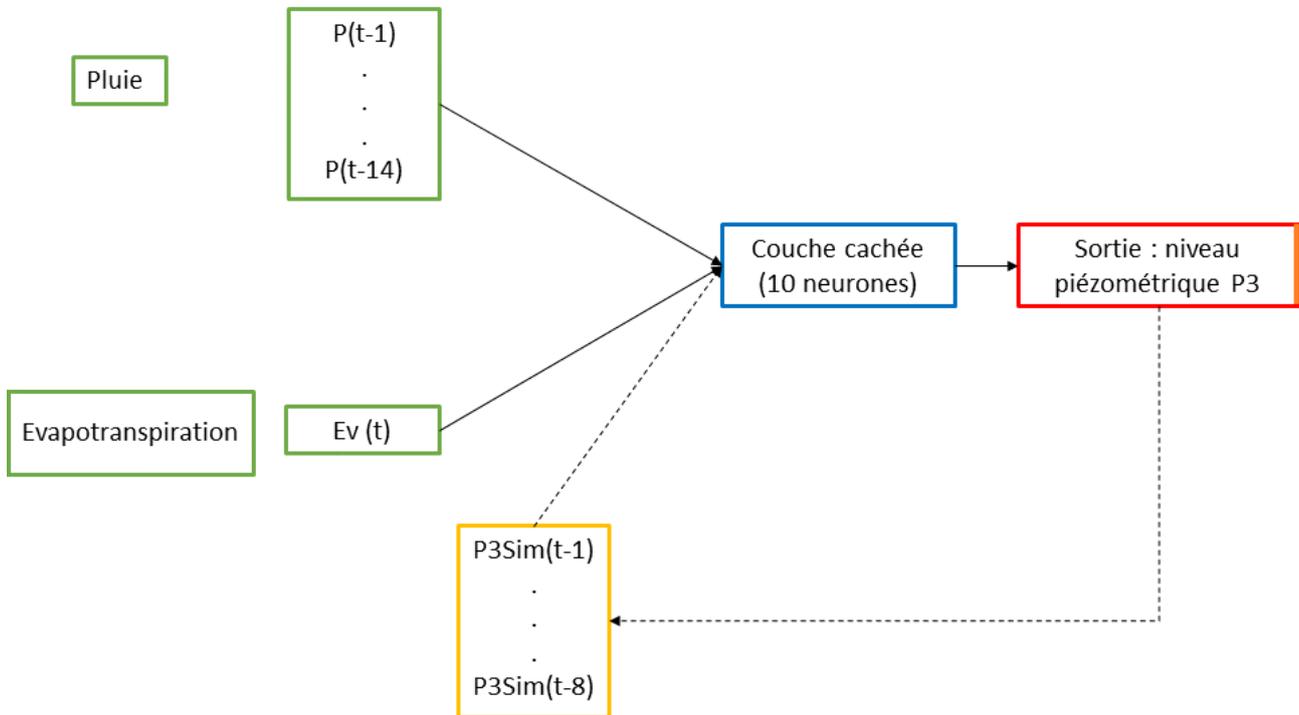


Figure 86. Architecture du réseau choisi pour modéliser le piézomètre P3

La visualisation de la comparaison simulation/observation durant apprentissage montre que le modèle reproduit fidèlement les hauteurs observées (Figure 87). 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 dans le 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, menant à s'interroger sur l'inspiration que ce modèle pourrait susciter sur la suite des travaux.



Figure 87. Niveaux piézométriques de P3: simulés versus observés

4.2.4. Perspectives pour la phase 3

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

PARTIE II – Volet hydrologie

- 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, prometteurs, ne sont pas encore suffisamment aboutis pour être présentés ici.

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 | p88 |
| 2. Volet pédologie | p96 |
| 3. Volet géochimie | p110 |

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 88) qui s'avèrent décisifs en fonction des objectifs poursuivis.

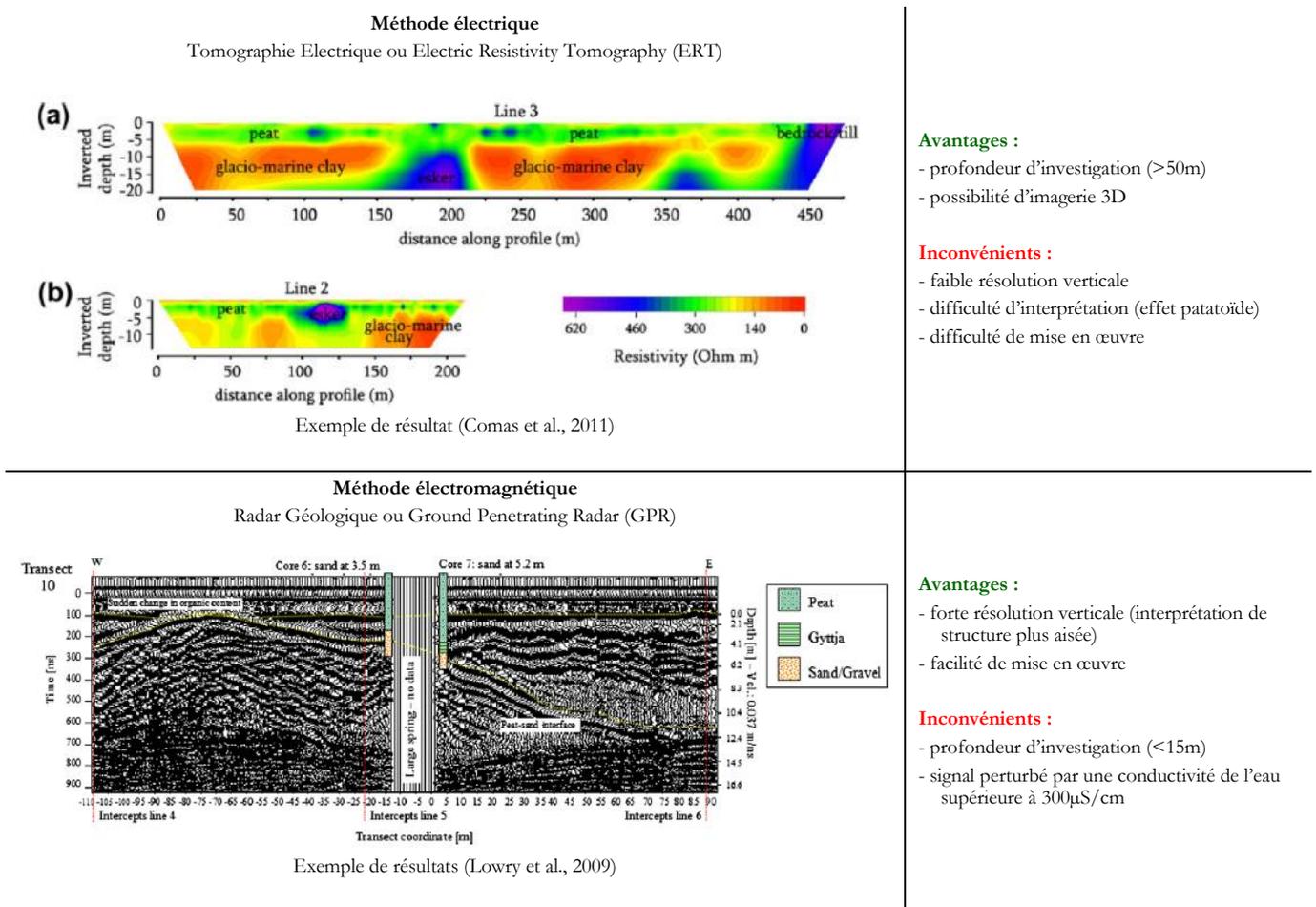


Figure 88 : Principaux avantages et inconvénients des 2 principales méthodes géophysiques (ERT et GPR) mises en œuvre sur les tourbières

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 quand 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 89. 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. Une septième personne peut être nécessaire pour surveiller la base fixe du GPS.

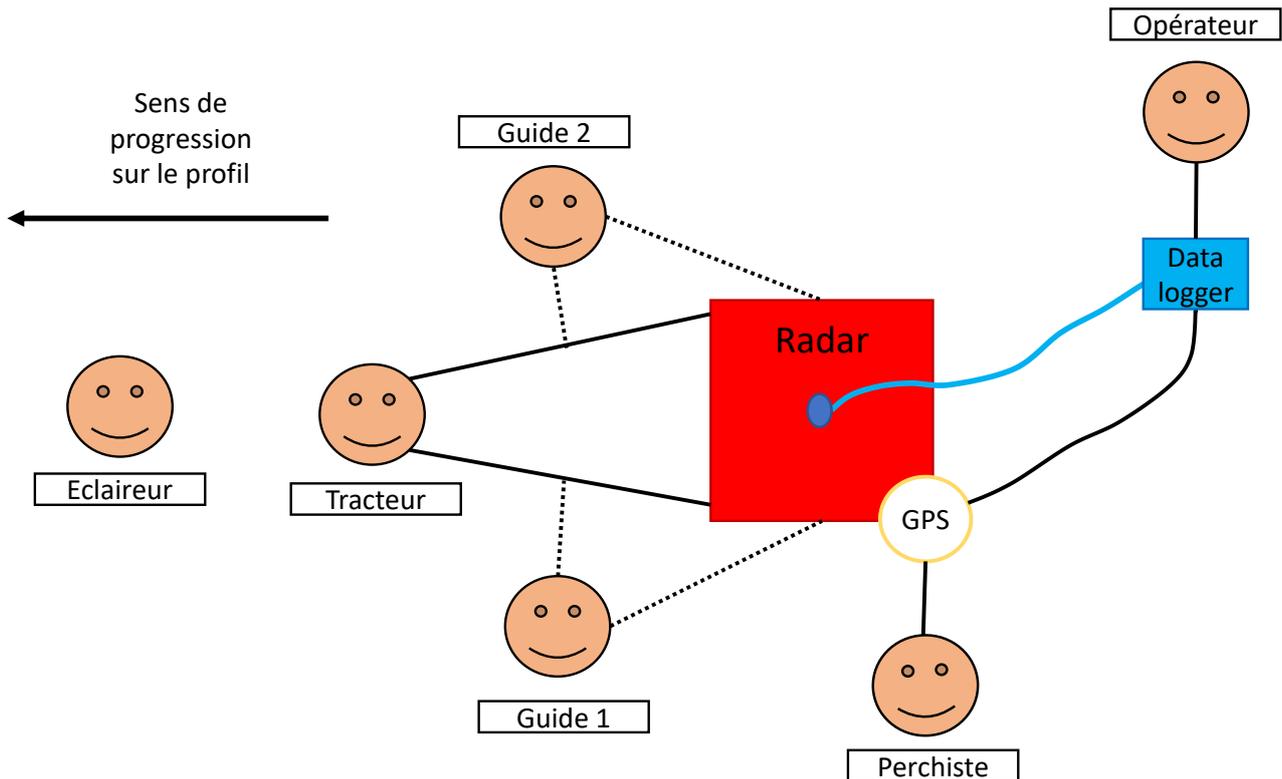


Figure 89 : Dispositif d'acquisition de données avec un GPR

Pour l'acquisition de données, compte-tenu du caractère humide voire inondée 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 raquette 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 91) 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 90). 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 91). L'interprétation des radargrammes sera, à terme (phase 3) validée et calibrée à l'aide de sondages pédologiques (Figure 91) dans le cadre du volet pédologique (Partie III - §2 Volet pédologie, p96).

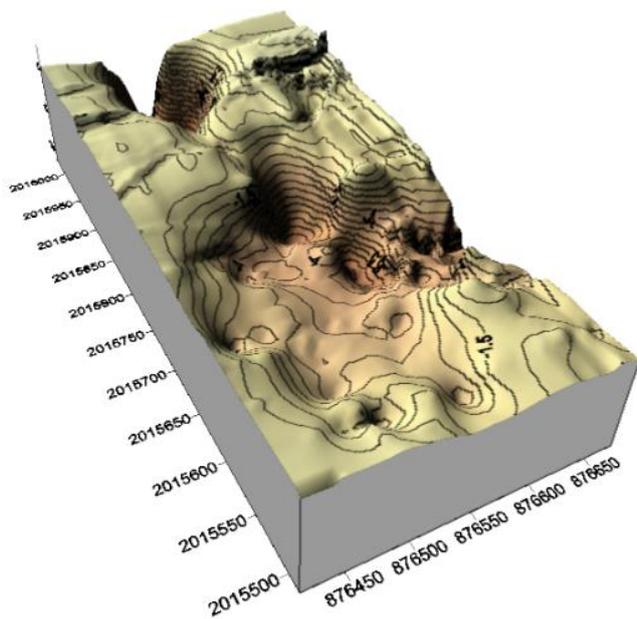


Figure 90 : Topographie du fond (profils GPR 2007)

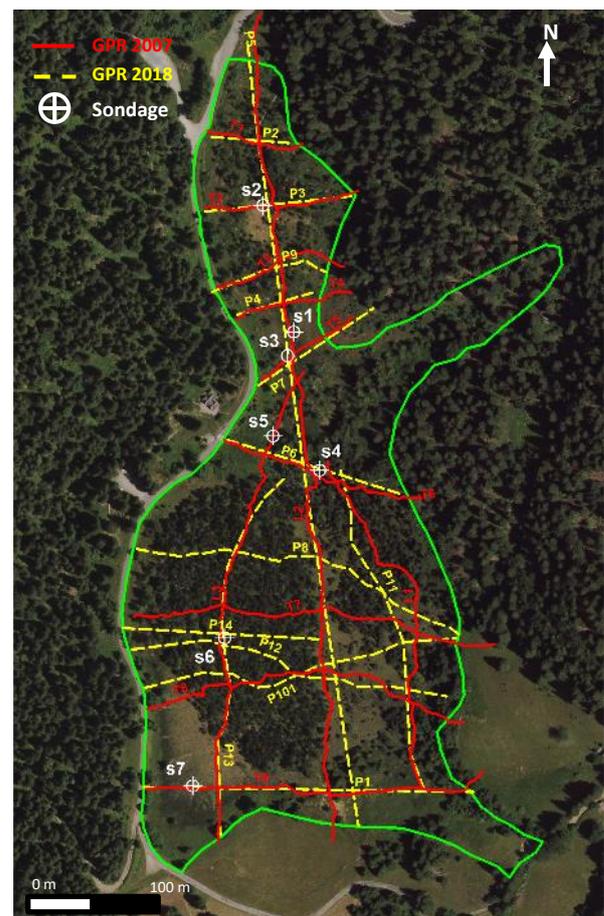


Figure 91 : Profils GPR 2007 et 2018

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 92 et Figure 93).

Les données sont en cours d'interprétation.

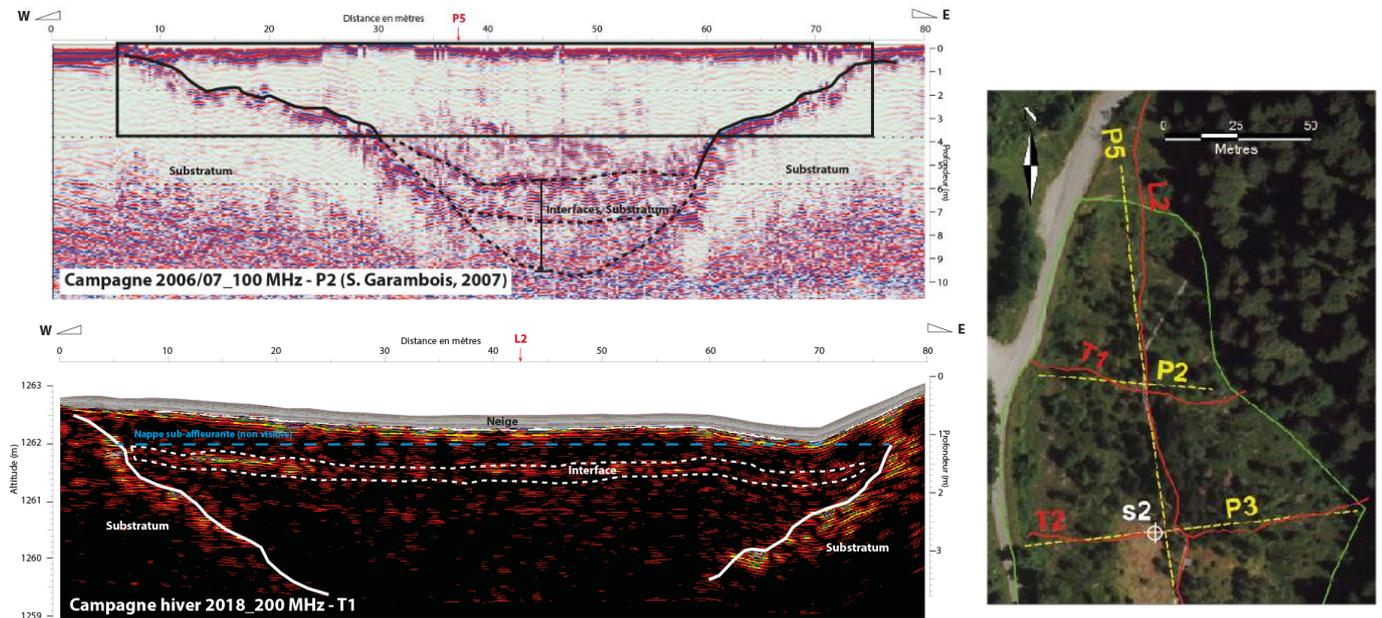


Figure 92 : Premiers résultats sur le profil P2 (GPR 2007) ou T1 (GPR 2018)

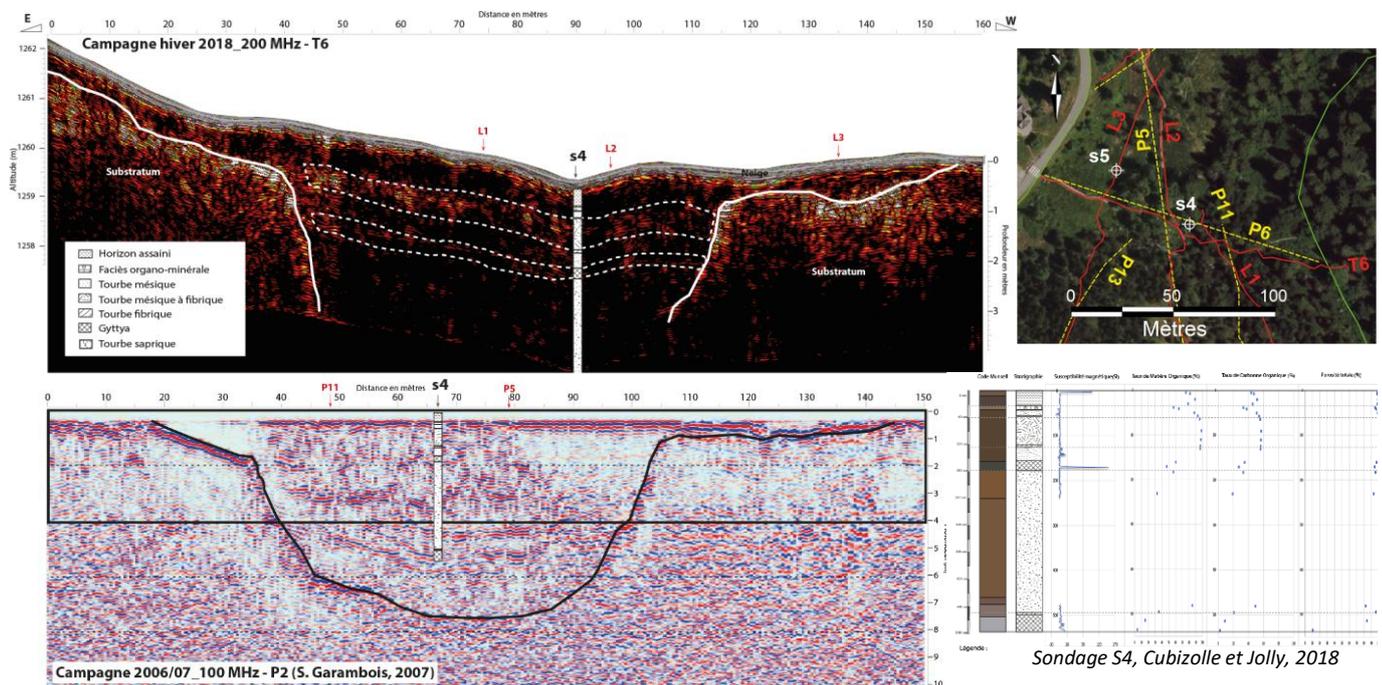


Figure 93 : Caractérisation des interfaces à l'aide des carottes pédologiques (profil P6 – GPR 2007 ou T6 – GPR 2018)

1.4. Tourbière de Frasne

Contrairement au Luitel, sur la tourbière de Frasne, il existe très de peu de données géophysiques sur un site beaucoup plus grand. L'acquisition de données géophysique vise mieux connaître :

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 94). Ces profils ont une profondeur d'investigation d'environ 30 m mais sont peu informatifs concernant la structure de la tourbière (Figure 95).

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 94 (points jaune et rouge).

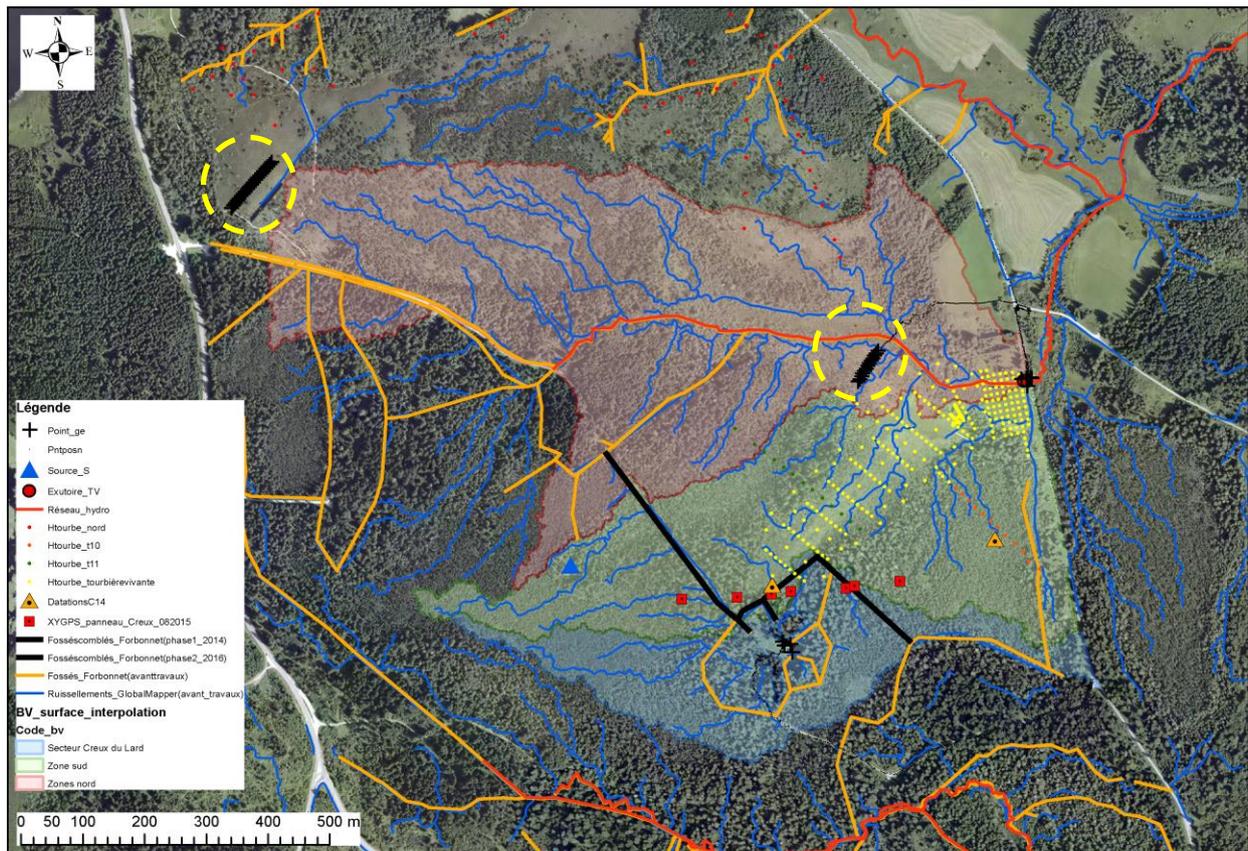


Figure 94 : Données géophysiques sur la tourbière de Frasne

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 :

- 2 en juin 2018 sur des zones sèches (Figure 94, profils en noir cerclés de pointillés jaune) ;
- 2 en janvier 2019 sur des zones humides gelées et couvertes de neige (Figure 96 et Figure 97, tronçon ouest du profil A1 et tronçon est du profil 1).

La Figure 96 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.

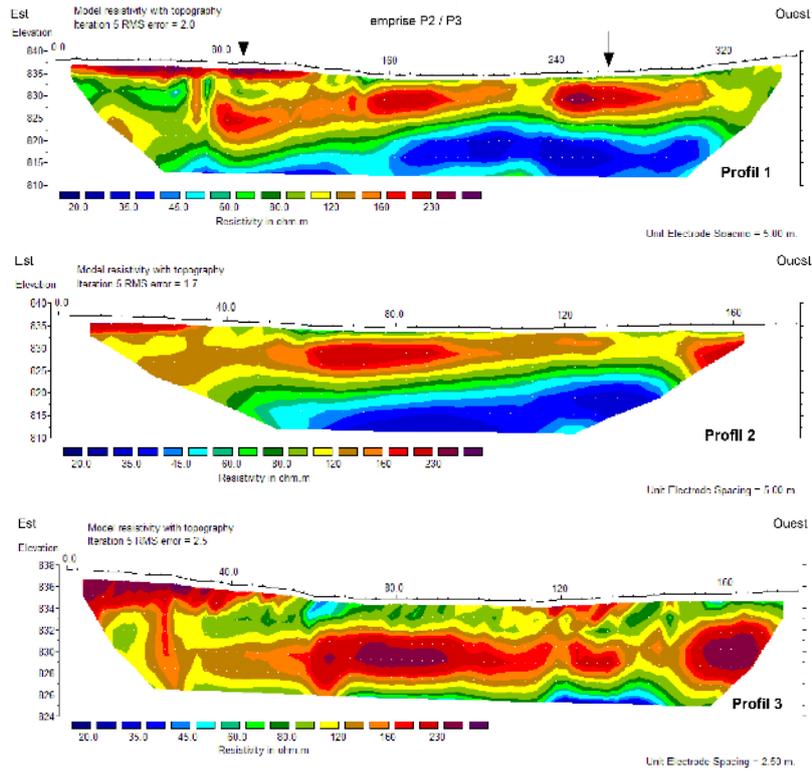


Figure 95 : Prospection ERT du Creux au Lard (Bichet, 2015)

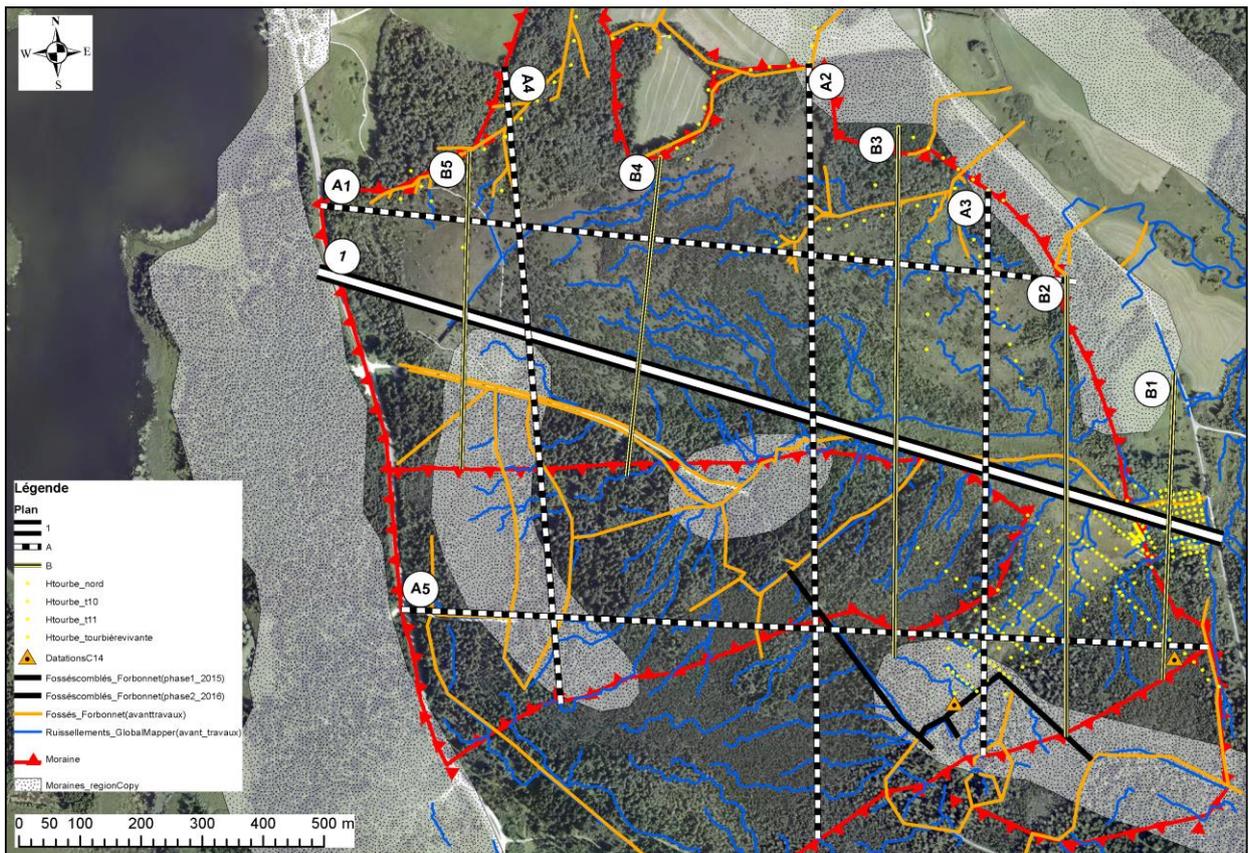


Figure 96 : Profils géophysiques prévus sur Frasne

1.4.2. Premiers résultats

La Figure 98 présente les premiers résultats et interprétations des profils réalisés en janvier 2019 (Figure 98). 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 98).

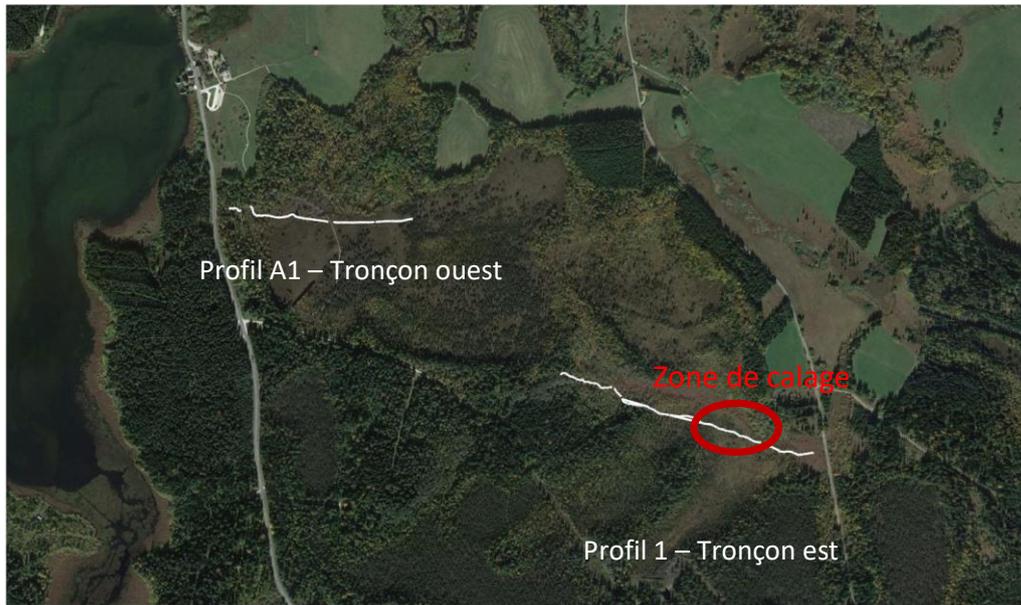


Figure 97 : Profils test réalisés en janvier 2019

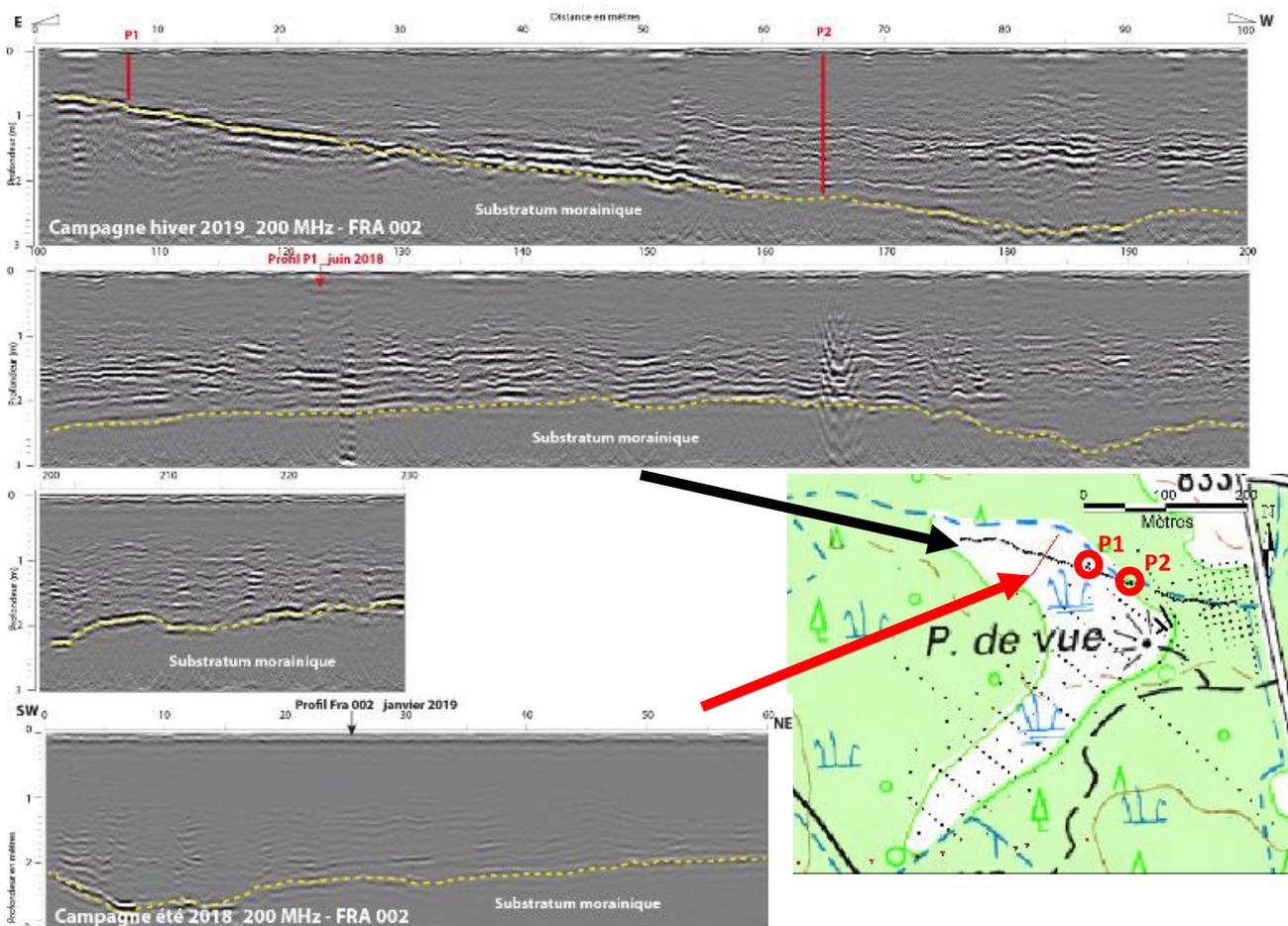


Figure 98 : Premiers résultats et validation à l'aide des sondages à la perche

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. De nouvelles campagnes géophysiques sont prévues sur Frasné pour automne/hiver 2019/2020. 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.

2.1. Caractérisation du fonctionnement hydrogéomorphologique de la Tourbière de Luitel

Cette partie propose une synthèse du travail et du rapport de stage de master 1 de T. Jolly⁸. 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 hydro-pédologique/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.

2.1.1. 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 de cet écosystème si particulier. Ces zones humides sont des sites colonisés par une flore édificatrice, 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

⁸ 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.

préservé 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'acrotelm dans la partie supérieure et le catotelm dans sa partie inférieure. L'acrotelm 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 catotelm (Figure 99). Notons que les paramètres hydrophysiques sont également étroitement liés au degré d'humification de la tourbe. Ainsi une tourbe blonde fibrique affichera des propriétés structurales (densité) et hydrauliques plus élevées qu'une tourbe noire saprique.

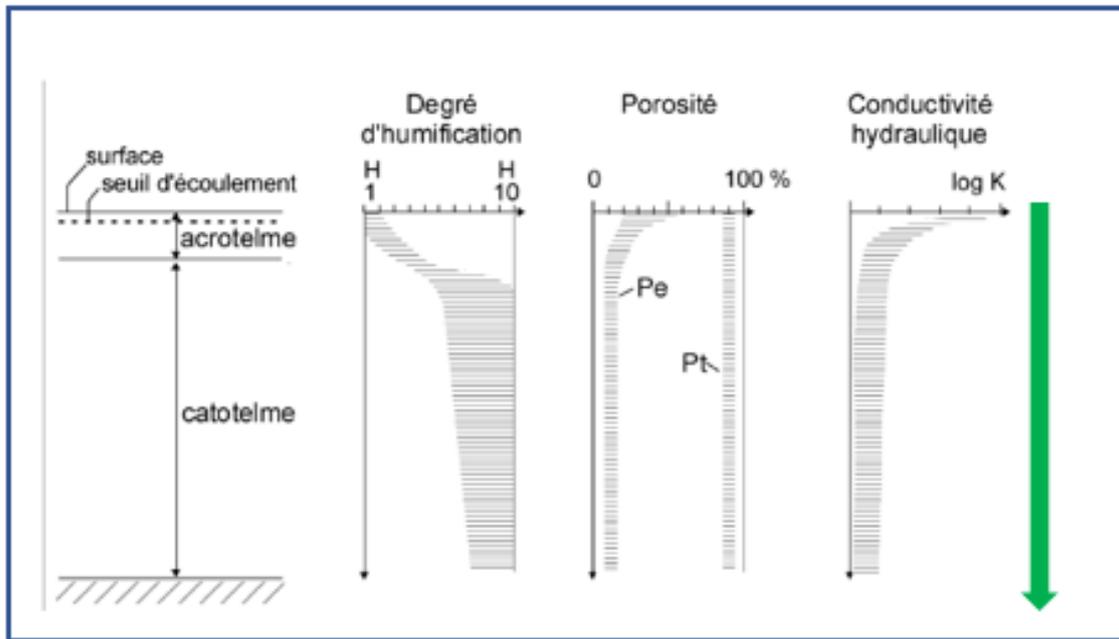


Figure 99 : Paramètres hydrophysiques généraux pour une tourbière haute à sphaignes (WASTIAUX.C, 2008)

H : degré d'humification

K : conductivité hydraulique à saturation

Flèche verte : baisse globale des paramètres (exceptée Pt)

Pt : Porosité totale

Pe : Porosité efficace

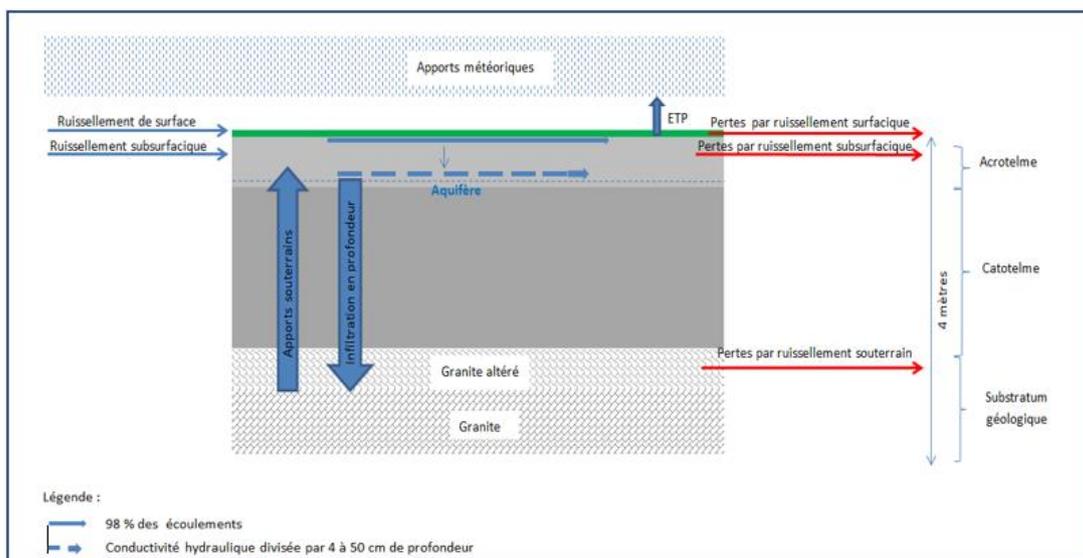


Figure 100 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrologique supposé d'une tourbière de tête de bassin versant

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 éco-complexes tourbeux pour la restitution d'eau au cours d'eau en période d'étiage semble une piste intéressante à privilégier (Figure 100).

2.1.2. *Éléments géographiques d'importance du site de Luitel*

Le site d'étude s'inscrit dans un complexe orographique à savoir le Massif de Belledonne, à cheval sur deux départements : la Savoie et l'Isère (Figure 101). Les tourbières du Luitel sont situées au niveau d'un col (1260 mètres d'altitude) à l'extrême Ouest de la chaîne de Belledonne qui sépare la vallée morte de l'Uriage au Nord et la vallée de la Romanche au Sud. Le Luitel est positionné dans son secteur Ouest sur une faille d'importance (accident médian de Belledonne), qui distingue le rameau interne (1453 m au rocher du But) du rameau externe (1457 m au Pic de l'Oeilly). Sa position au sein d'un col lui confère des températures moyennes annuelles relativement faibles (5,7 °C sur le pas de temps 2007-2016, source : Station hydroclimatique du Luitel, Desplanque, 2011), soit un climat humide et frais. Concernant les précipitations météoriques, une moyenne annuelle sur la période 2007-2016 indique une lame d'eau de 1233 mm par an. Si on s'intéresse à l'hydrologie de surface, la tourbière du col se voit alimentée principalement par le ruisseau de Fontfroide, qui la traverse d'Est en Ouest. Un petit ruisseau parcourt également la tourbière dans sa partie sud. Il est essentiel de rappeler que la tourbière a subi de profondes transformations au cours du temps, dont les vestiges sous formes de fossés de drainages sont toujours actifs. Situé sur l'accident médian de la chaîne Belledonienne, les failles y sont nombreuses, induisant par la même des transferts probables d'eau du lac vers le ruisseau de Fontfroide par un accident Nord/Sud (Visentin, 2001 in Desplanque, 2011). Nous noterons que la tourbière dispose déjà d'un suivi expérimental à travers une instrumentation du site (station météo, piézomètres) permettant de fournir des informations précieuses sur le comportement hydrologique du site. Fort d'une diversité spécifique floristique et faunistique (INPN- FR8201732 – Tourbières du Luitel et leur bassin versant), ces milieux bénéficient d'une superposition de mesures environnementales conservatoires (RNN, ZNIEFF type I et II, Natura 2000).

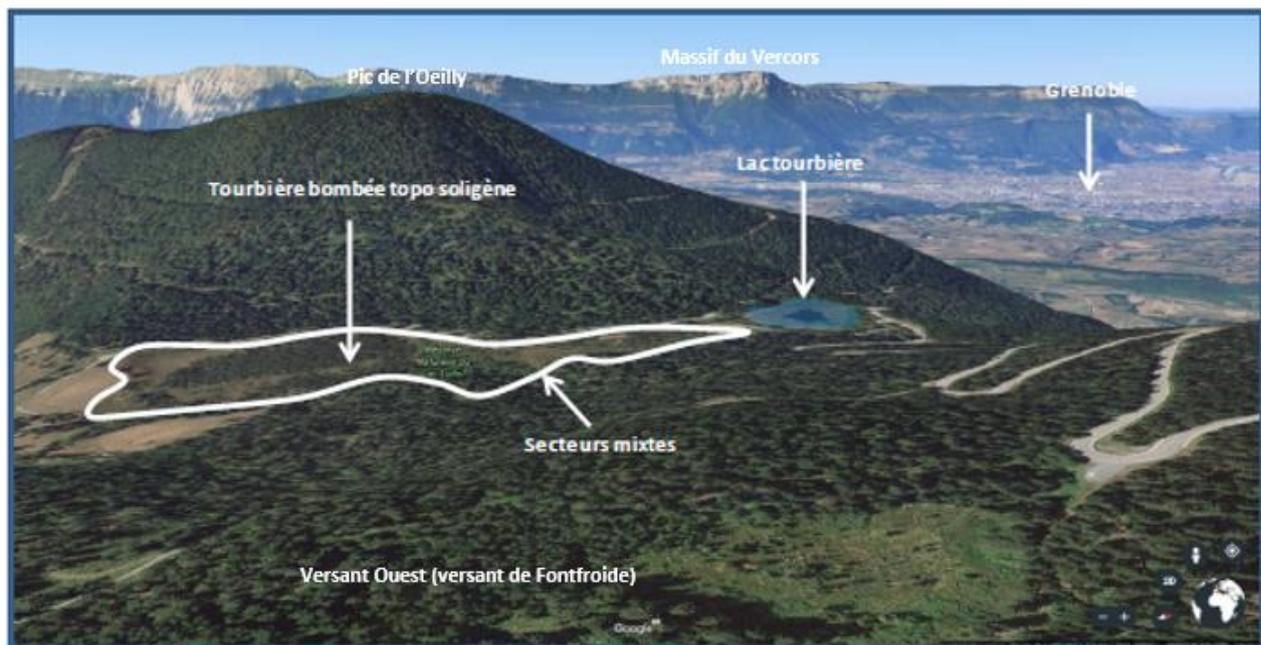


Figure 101 : Contexte géographique des tourbières du Luitel

2.1.3. Matériel et méthode

La méthodologie mise en œuvre a pour objectif de mettre en exergue les différentes étapes du travail de recherche et concours à la caractérisation du fonctionnement hydrogéomorphologique du site de Luitel. Rappelons que cette méthodologie a pour objectif de donner des résultats du point de vue hydro-pédologique afin de contribuer à alimenter un modèle qui servira à simuler un soutien d'étiage sur la tourbière du col (Partie II - §4.1 Modèles réservoirs – modélisation du soutien d'étiage au Luitel, p72).

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 hydro-pédologiques 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, c'est donc déroulée conjointement et complémentarément à d'autres approches et notamment :

- le volet géophysique (Partie III - §1.3 Volet géophysique, p88)
- le volet hydrologique (Partie II - §4.1 Modèles réservoirs – modélisation du soutien d'étiage au Luitel, p72)

2.1.3.1. 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 phyto-sociaux	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 14 : 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 turfigénèse 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 ;

PARTIE III - Volets géophysique, pédologie, géochimie

- 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 14 résume le choix des points de prélèvements en fonction d'une série d'arguments.

- **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.

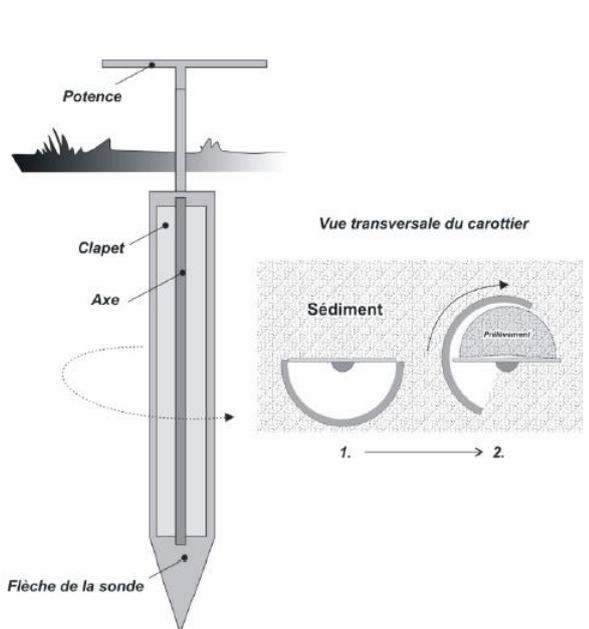


Figure 102 : Principe de fonctionnement du carottier Russe (Guiter et al. 2013)



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

Les échantillons subissent ensuite une première interprétation (stratigraphie à l'aide du code Munsel, détermination du type 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 l'occupation du sol avec les faciès édaphiques superficiels. La méthodologie retenue est de considérer que pour un même polygone de végétation, correspondra le même faciès pédologique. 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)

2.1.3.2. 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 14).

- **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 nous renseigne, dans le cas de notre étude, sur plusieurs éléments liés à l'environnement et/ou au climat (Dearing, 1999 ; Naudin, 2012 ; Salomon, XXXX) :

- 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 conditions redox du milieu qui conditionnent la solubilité et la précipitation des minéraux par voie biologique ou chimique dû à la forte réactivité du fer.

- **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 texture 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).

2.1.3.3. 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 concours 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.

2.1.4. Résultats

2.1.4.1. Texture et stratigraphie

La Figure 106 montre la stratigraphie des points de prélèvement au carottier russe, des similarités s'expriment entre les différents profils. Tous les profils (excepté P3S2) possèdent un horizon assaini⁹. 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 gyttja. 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.

2.1.4.2. 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 de la carte des habitats Corine (exemple, Figure 105).

⁹ 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

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.

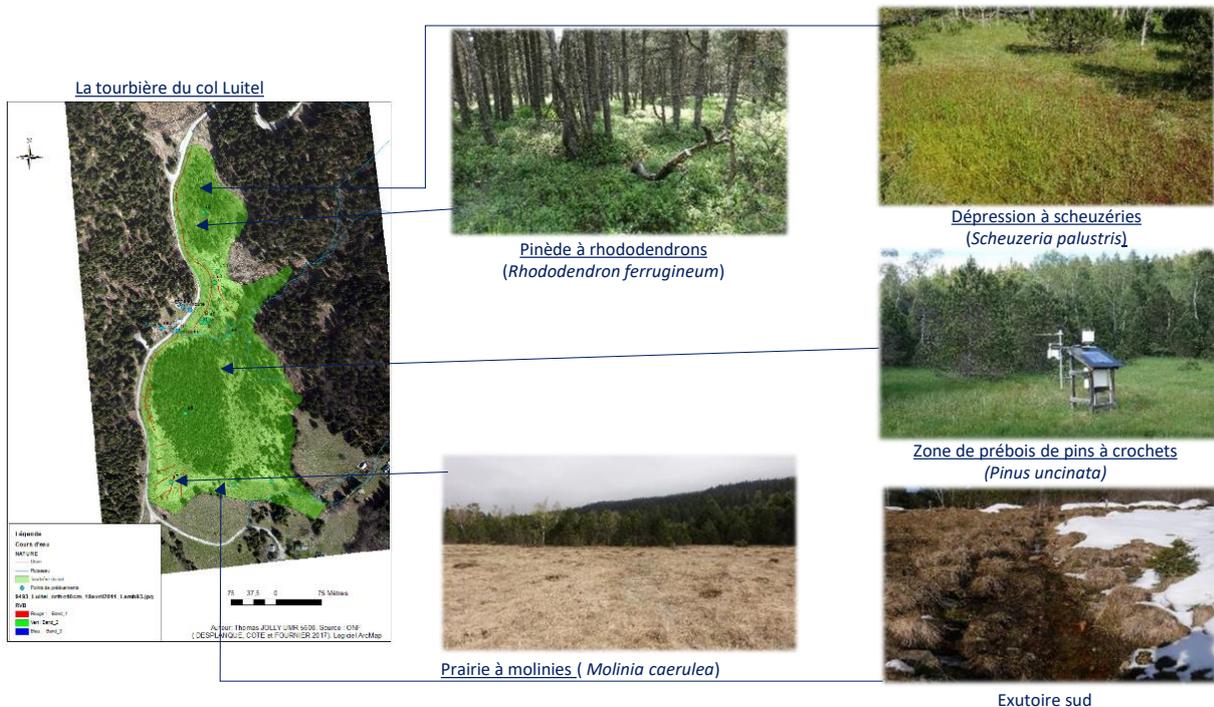
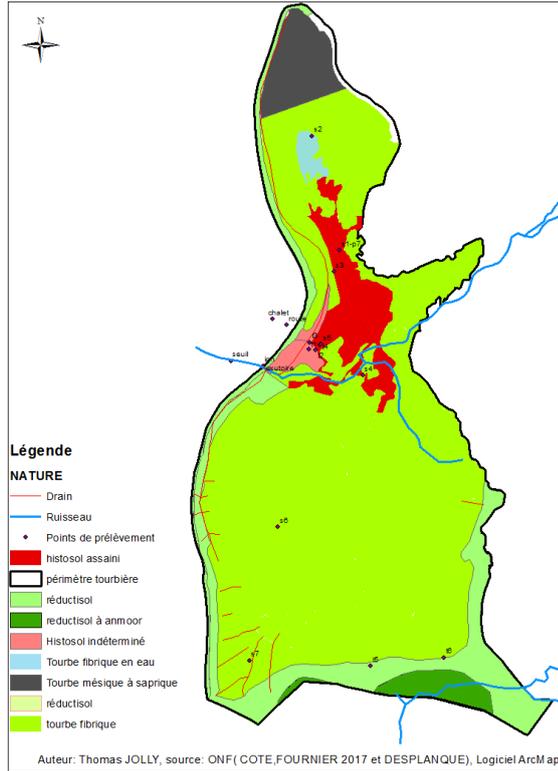


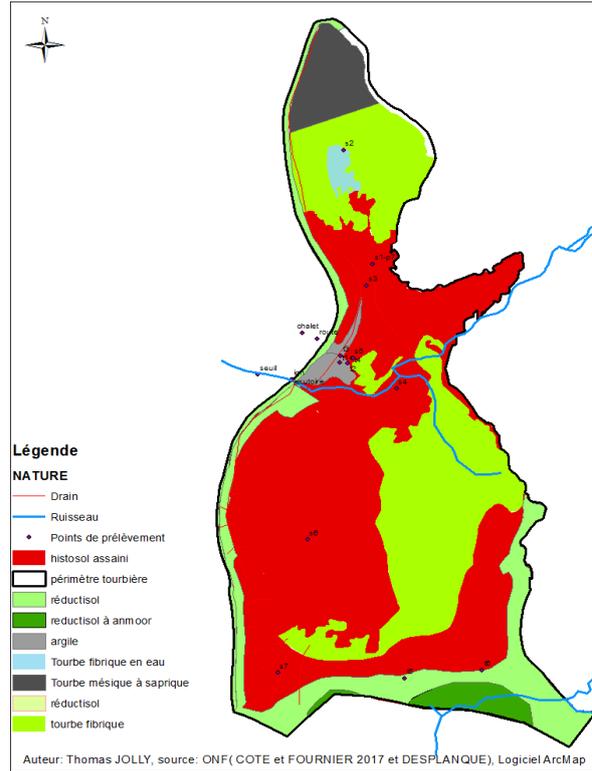
Figure 105 : Présentation des écosystèmes du Luitel (exemples)

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

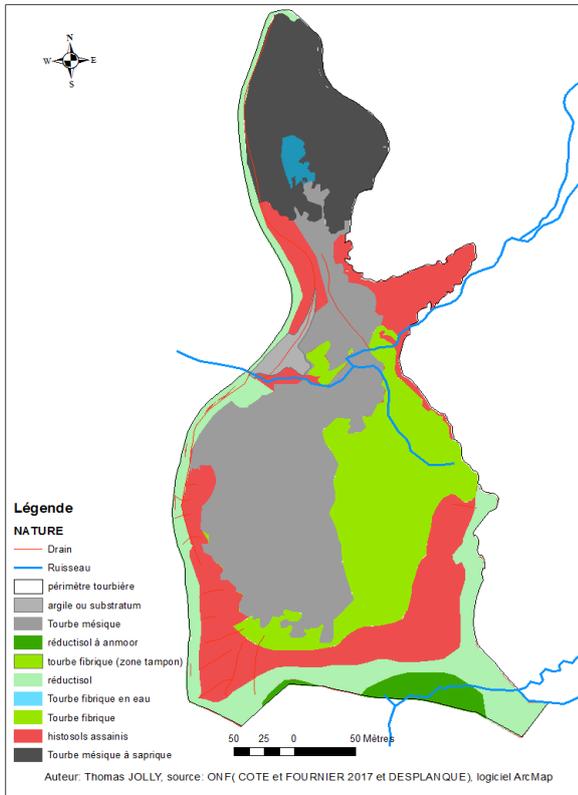


Faciès édaphiques à 0 centimètres de profondeur

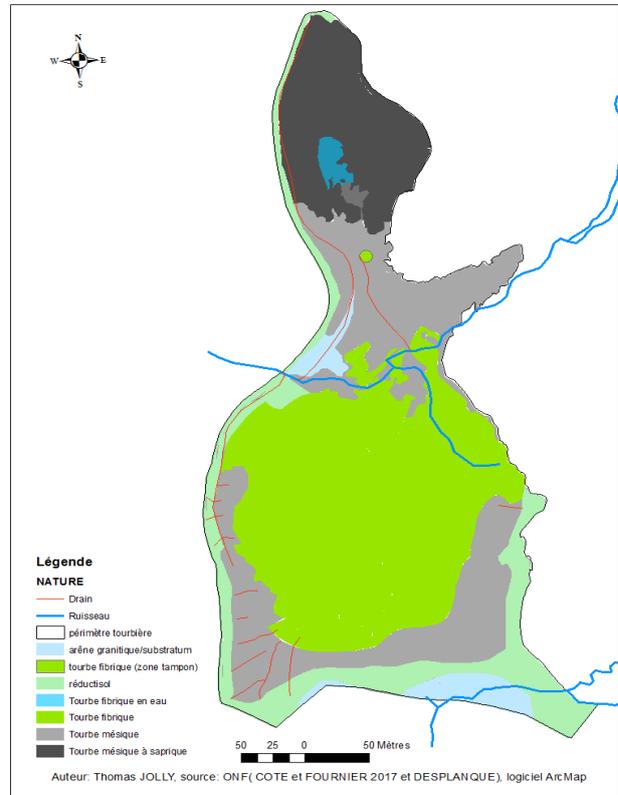
Faciès tourbeux à 15 centimètres- tourbière du col - RNN du Lac Luitel



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.

2.1.5. Discussion

2.1.5.1. 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 strates affleurantes sont composées d'une strate de tourbe fibrique avec des coussins de sphaignes comme végétation de surface. Les valeurs des propriétés hydrophysiques supposées dans ces faciès sont élevées avec $10^{-1} \text{ m}^3/\text{s}$ 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. Aux vues des éléments dont nous disposons (bibliographie, analyses, témoignages), la présence de ces horizons serait davantage liés à un piétinement qu'à la seule action des fossés de drainage. La reprise de l'activité turfigénèse sur une majorité des secteurs accreditte cette hypothèse, dans la mesure où le piétinement n'a plus lieu alors que les fossés de drainages 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 $10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 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'acrotelm « 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 sont généralement des zones peu profondes, avec des arènes granitiques déposées sur le substratum. De plus ces zones sont des secteurs privilégiés dans la réception des eaux de ruissellements issus des versants.

2.1.5.2. La question du soutien d'étiage

Si la caractérisation des faciès pédologique 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 des systèmes dynamiques a été conçu (Partie II - §4.1 Modèles réservoirs – modélisation du soutien d'étiage au Luitel, p72).

Le débit d'étiage modélisé en période d'étiage sur la période allant du 06/08/2014 au 26/10/2017 est de $10,47 \text{ m}^3/\text{jour}$ soit $0,44 \text{ m}^3/\text{h}$. Ce modèle permet donc de répondre à la question de départ : la tourbière du col Luitel délivre un soutien d'étiage au cours d'eau. Cependant il faut bien prendre garde à ne pas élargir ce résultat à l'ensemble des tourbières de tête de bassin ; chaque contexte d'alimentation et d'intégrité du milieu étant différent.

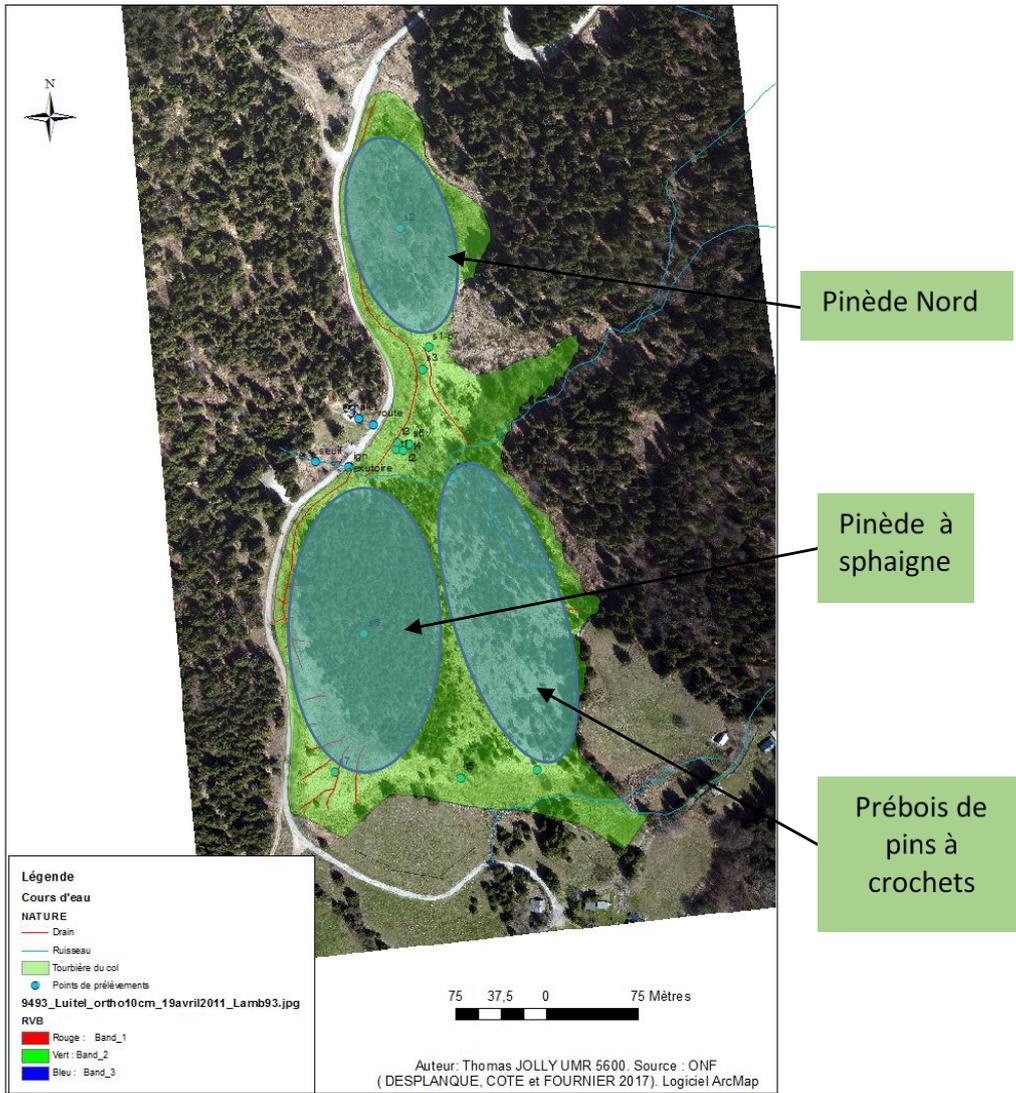


Figure 108 : Synthèse des « zones réservoirs » susceptibles d'assurer un étiage

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

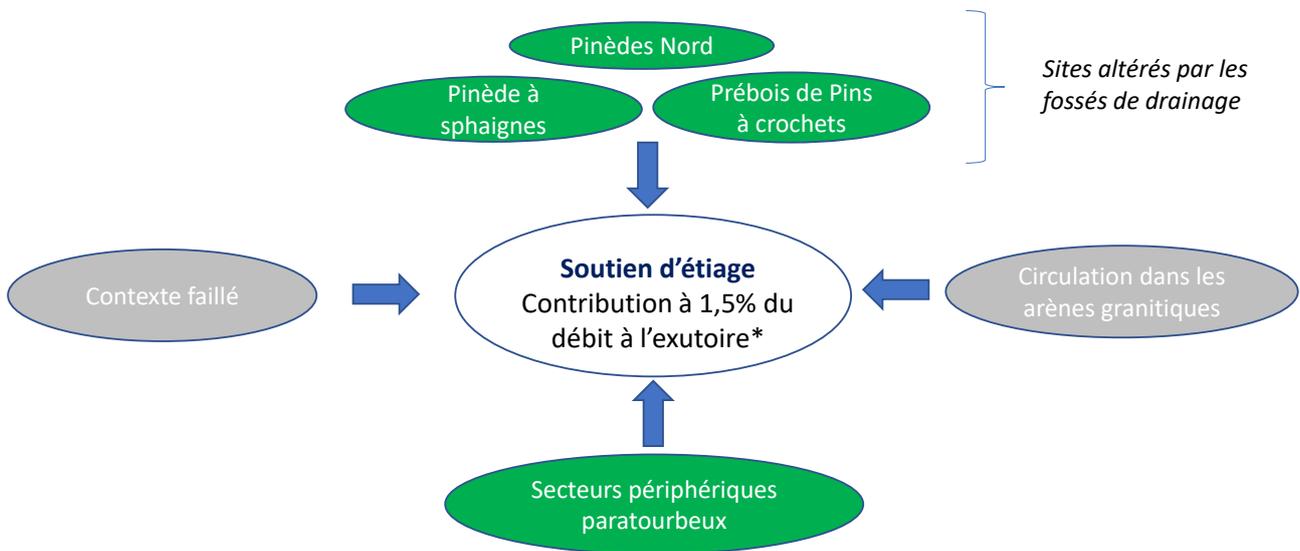


Figure 109 : Hypothèses sur les secteurs contribuant au faible soutien d'étiage

PARTIE III - Volets géophysique, pédologie, géochimie

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 ? Autant de questions qui mériteraient de trouver des réponses pour bien caractériser les apports du point de vue quantitatif et qualitatif.

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). En revanche dans le cas d'un éco-complexe non dégradé, la tourbe est toujours à saturation, l'eau étant rapidement évacuée par ruissellement surfacique.
- 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.
- La position de la tourbière entre deux versants lui confère une place privilégiée pour recevoir des eaux sub-surfacique qui se jetteraient dans l'ancien lac périphérique, contribuant ainsi au faible débit relevé.

2.1.6. 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.

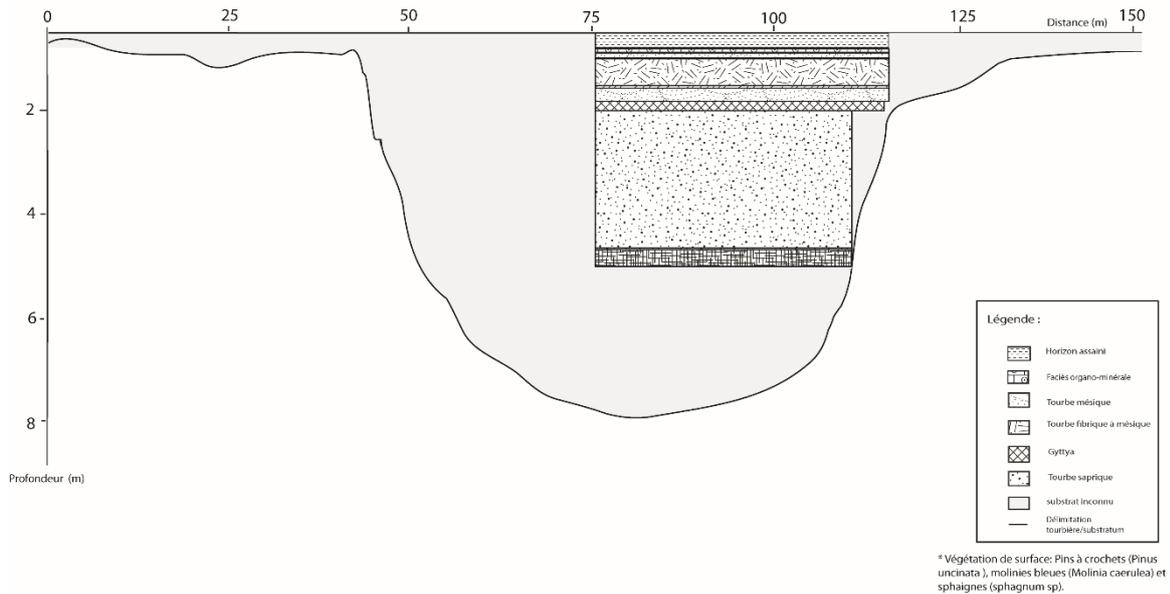
- **Détermination des structures par la géophysique et la pédologie**

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, p88). 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 profils géophysiques n'ont pas encore été analysés et feront l'objet d'une étude poussée en 2019. L'objectif serait 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 suites 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 éco-complexe. Concernant le modèle développé pour déterminer un éventuel soutien d'étiage, 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 drainages 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 préférentielles. Également, les écoulements issus des versants, la circulation de l'eau dans les arènes granitiques et le contexte faillé du site, soulèvent autant d'hypothèses dans les apports au cours d'eau qui ne peuvent pour le moment se vérifier. Une analyse croisée entre la pédologie et la géophysique permettront d'en apprendre davantage pour formaliser des hypothèses plus solides.

À l'aune des changements environnementaux, la question des zones humides de têtes de bassins soulève des enjeux primordiaux. Pour le Luitel, les projections climatiques à l'horizon 2070-2100 du site mettent en avant un bouleversement du bilan hydrique. La modification des conditions climatiques locales jette alors les bases d'une détérioration de l'éco-complexe tel que nous le connaissons aujourd'hui. Dans ce contexte, une réflexion globale sur les choix de gestions des tourbières de tête de bassins doit être portée, dans la mesure où les scénarios traduisent un déclin programmé de ces sites. Les actions en faveur de la conservation de ces milieux sont-elles vaines, dans la mesure où les conséquences climatiques semblent avoir déjà celé leur destin.

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), une 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, la tourbière de Luitel en zone intermédiaire et la tourbière du col au Sud (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 nord 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/drains 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)

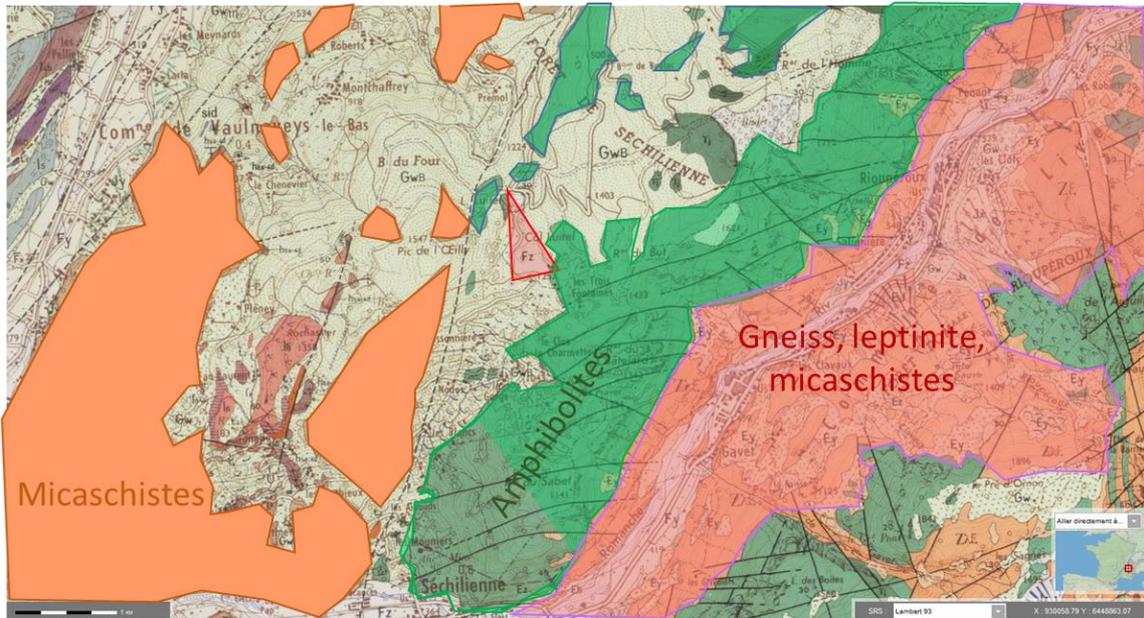


Figure 111 : Extrait de la carte géologique au 1/50000^{ème}. La zone humide de Luitel est localisée par le triangle rouge

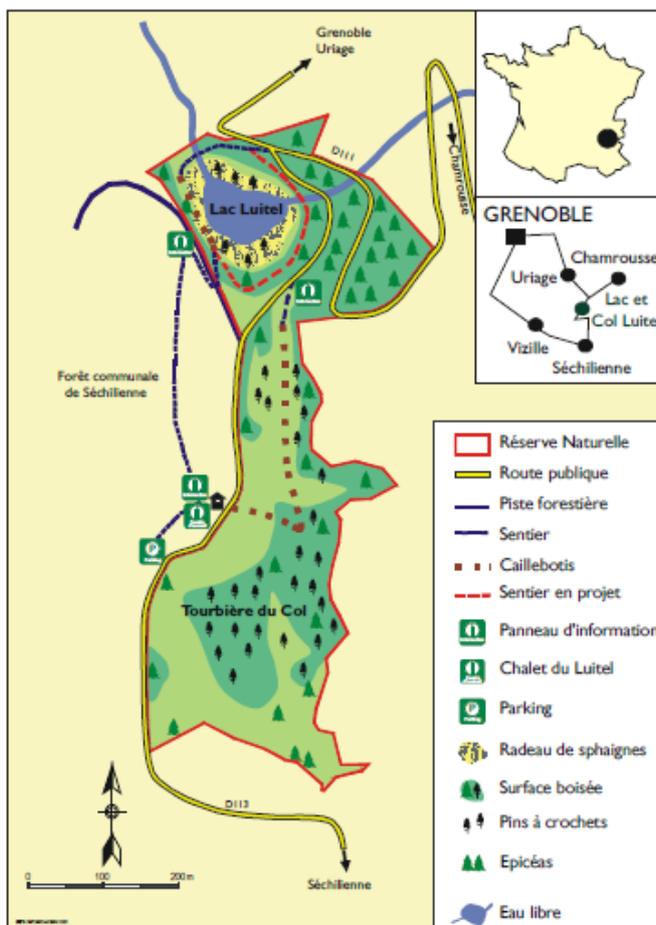


Figure 112 : Carte simplifiée de la réserve naturelle du Lac Luitel (Desplanque, 2001, publié dans Guiter et al. 2015).

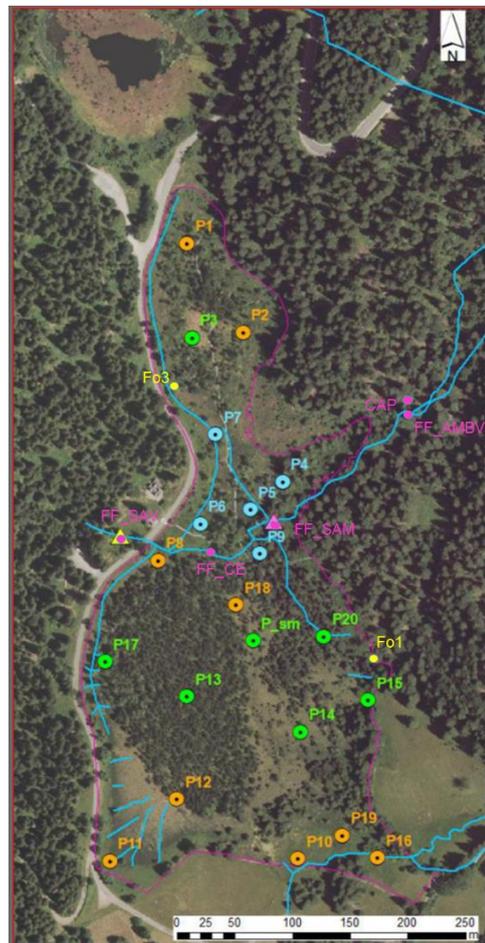


Figure 113 : Localisation des points d'échantillonnage, les piézomètres de la zone humide sont notés PXX, les fossés/drains sont notés FoX, le ruisseau de FontFroide est noté FF (AMBV= amont)

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 15).

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 15 : 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 contraindre 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 dépendants 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 traversés 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. ; [Copen 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 $\delta^{18}O$ », les eaux de pluies 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 $\delta^{18}O$ 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 $\delta^{18}O$ 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 inférieur. Ainsi l'alcalinité a été mesurée dès que cela a été possible (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 60mL ont été collectés dans des flacons HDPE de 60mL. Le flacon destiné à l'analyse des cations a été filtré à 0,45 μ m et acidifié avec HNO₃ 2N ultrapur pour atteindre un pH \approx 3. Les échantillons ont été filtrés en laboratoire avant dosage avec un filtre en fibres de verre à 0,45 μ 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 $\delta^{18}O$ 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 μ S/cm à 126,4 μ S/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 μ S/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 Diagrammes¹⁰.

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.

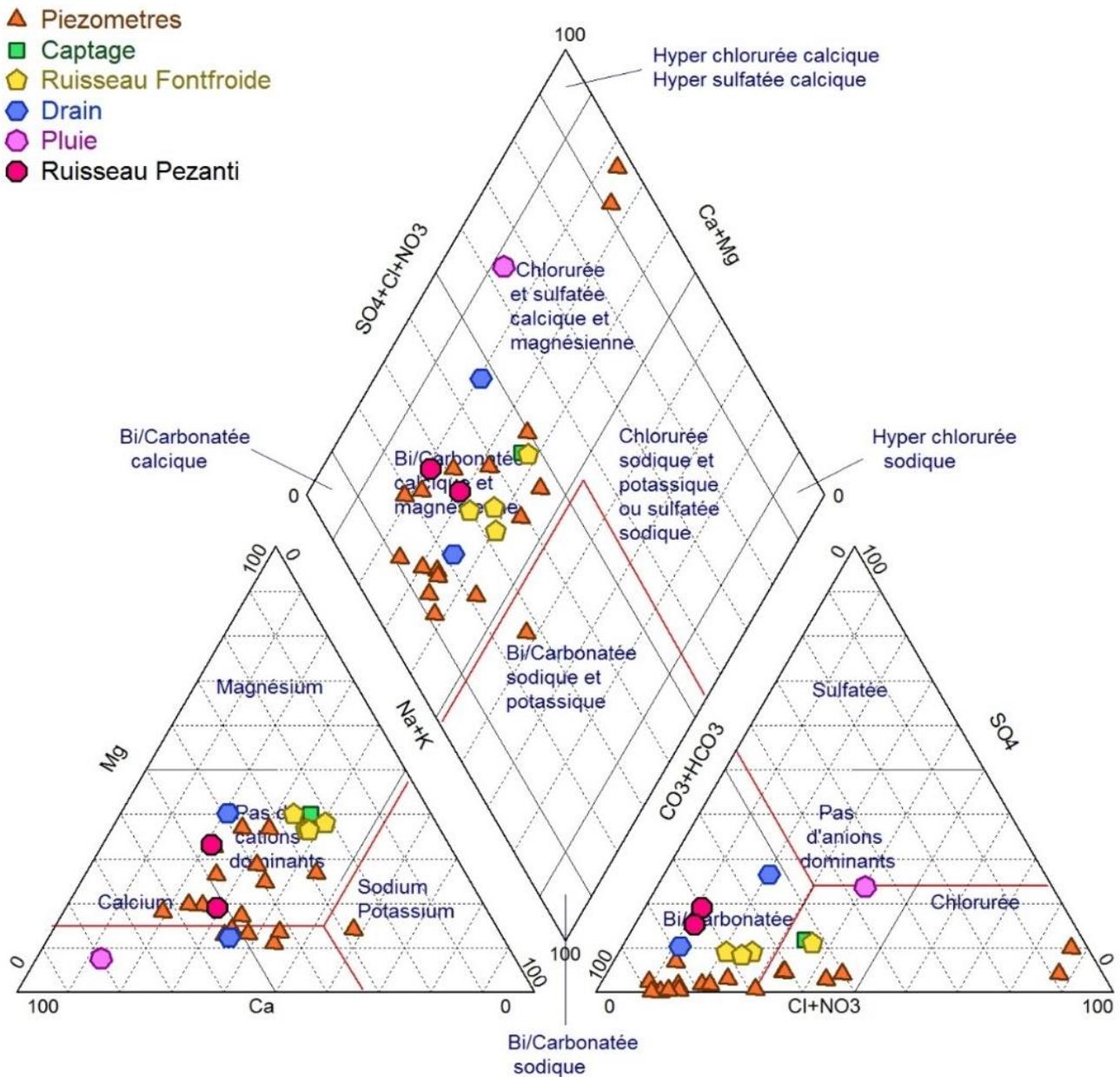


Figure 114 : Diagramme de Piper reportant les abondances relatives des espèces ioniques majeures : cations (triangle de gauche) et anions (triangles de droites)

¹⁰ <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.

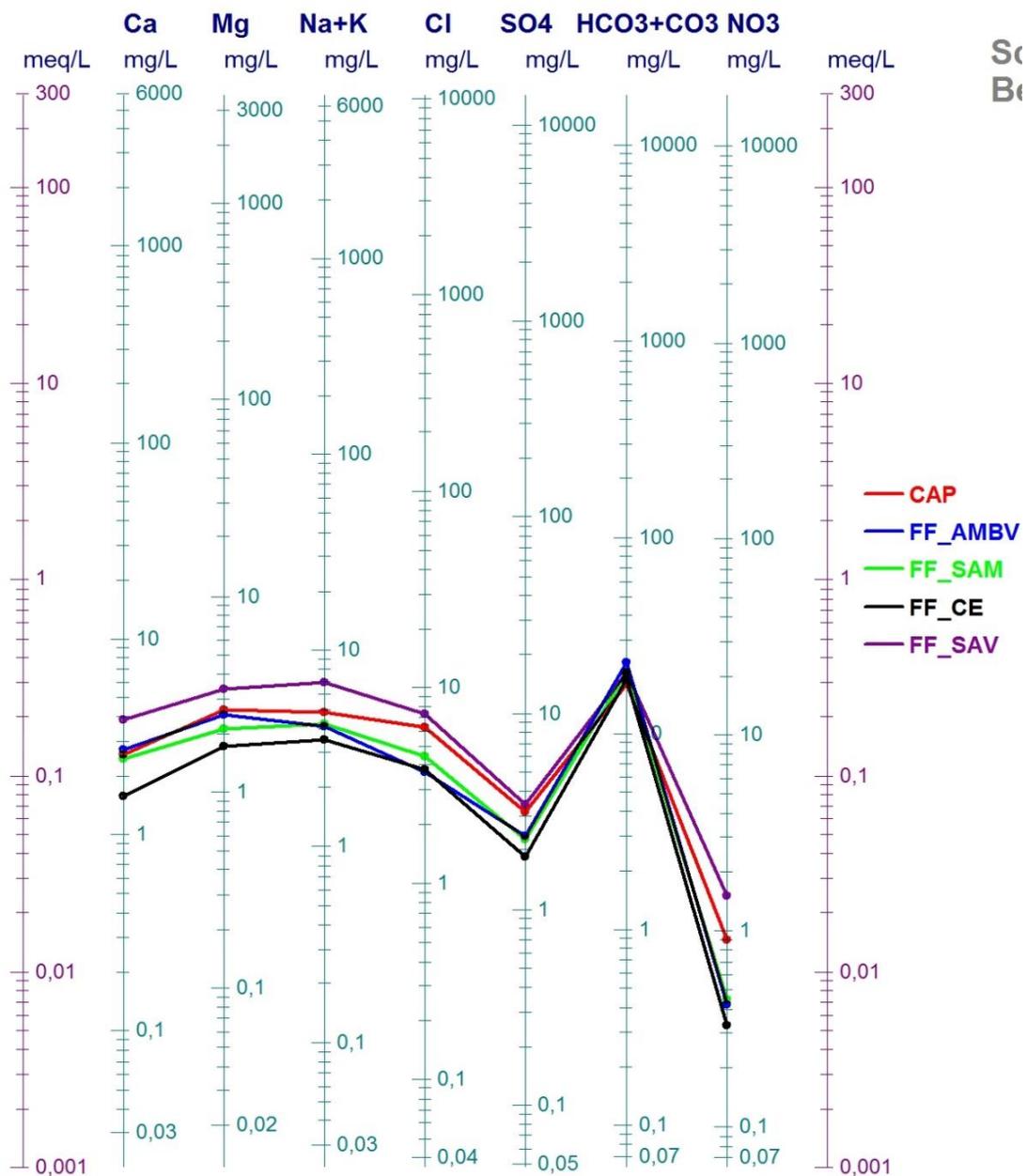


Figure 115 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff représentant les concentrations des eaux prélevées en différents points du ruisseau de FontFroide et dans les eaux du captage. Les concentrations sont reportées en mg/L sur une échelle logarithmique, l'équivalence en meq/L peut être lue sur l'échelle de gauche.

PARTIE III - Volets géophysique, pédologie, géochimie

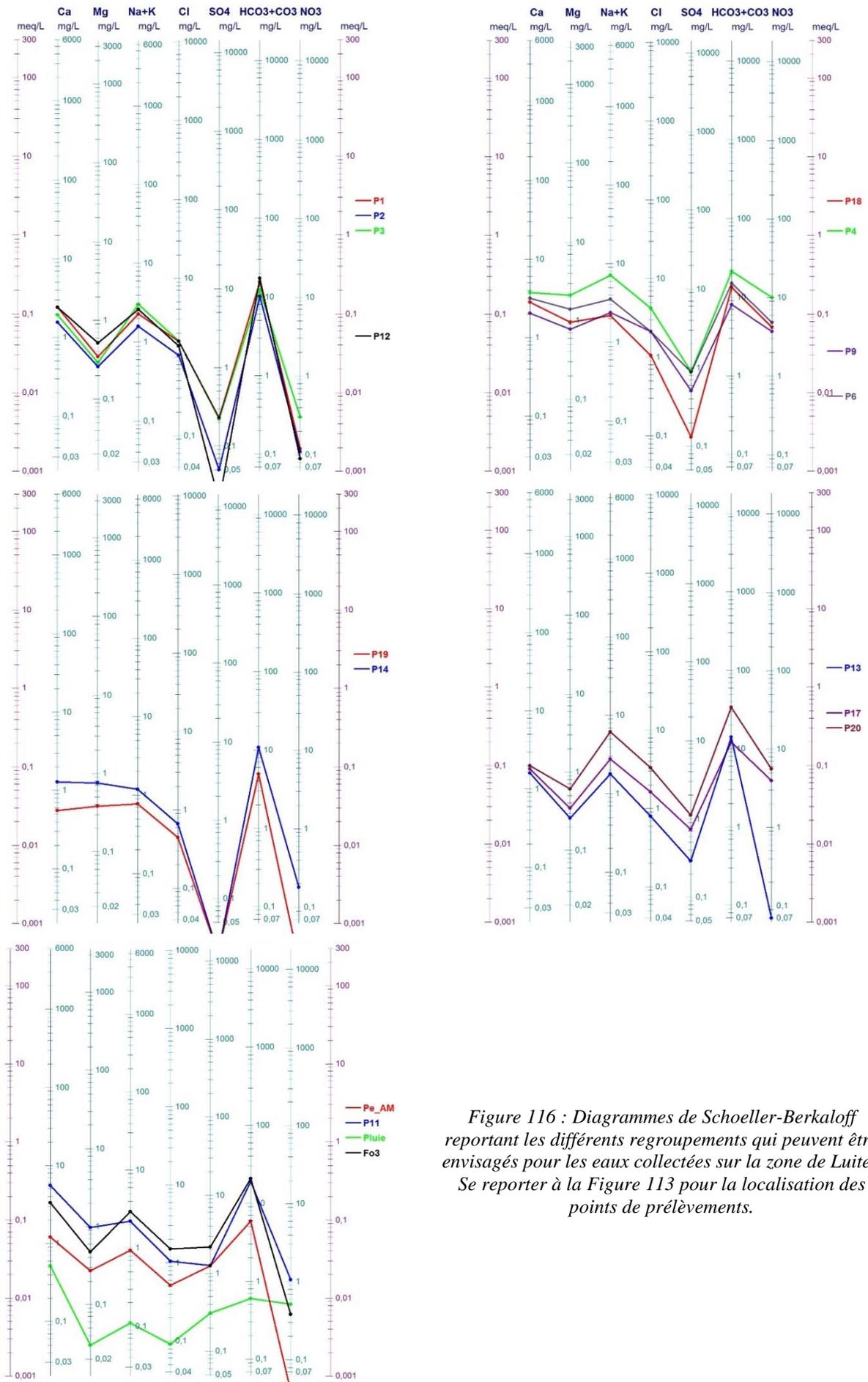


Figure 116 : Diagrammes de Schoeller-Berkaloff reportant les différents regroupements qui peuvent être envisagés pour les eaux collectées sur la zone de Luitel. Se reporter à la Figure 113 pour la localisation des points de prélèvements.

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.

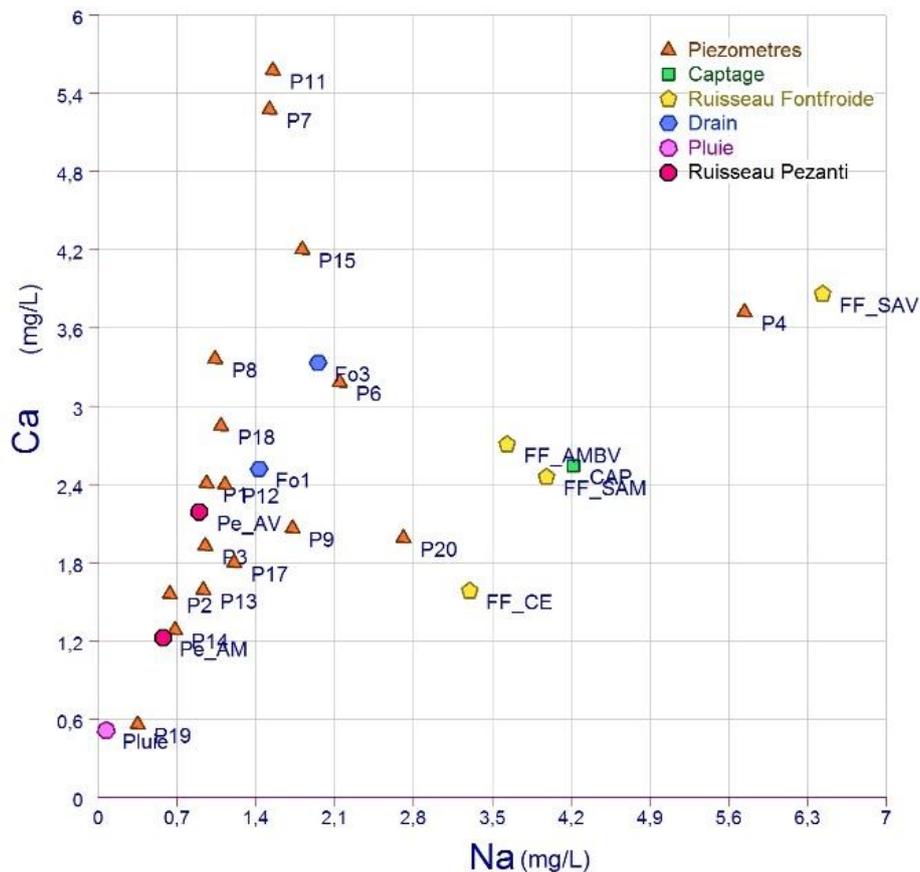


Figure 117 : Diagramme binaire $Ca=f(Na)$. Les concentrations sont exprimées en mg/L

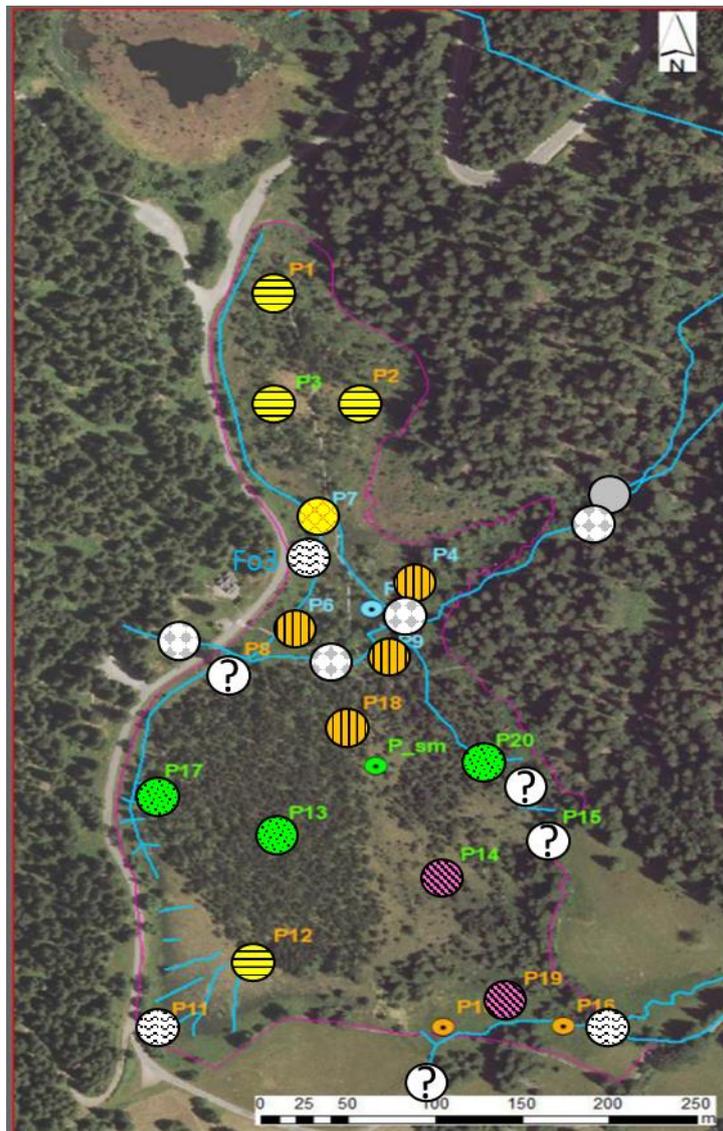


Figure 118 : Représentation des différents groupes hydrogéochimiques définis à partir des diagrammes de Schoeller-Berkaloff

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 suggèrent 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 $\delta^{18}\text{O}$ 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 $\delta^{18}\text{O}$ 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 recharge à plus basse altitude sont possibles pour les eaux des piézomètres en comparaison avec les eaux des ruisseaux.

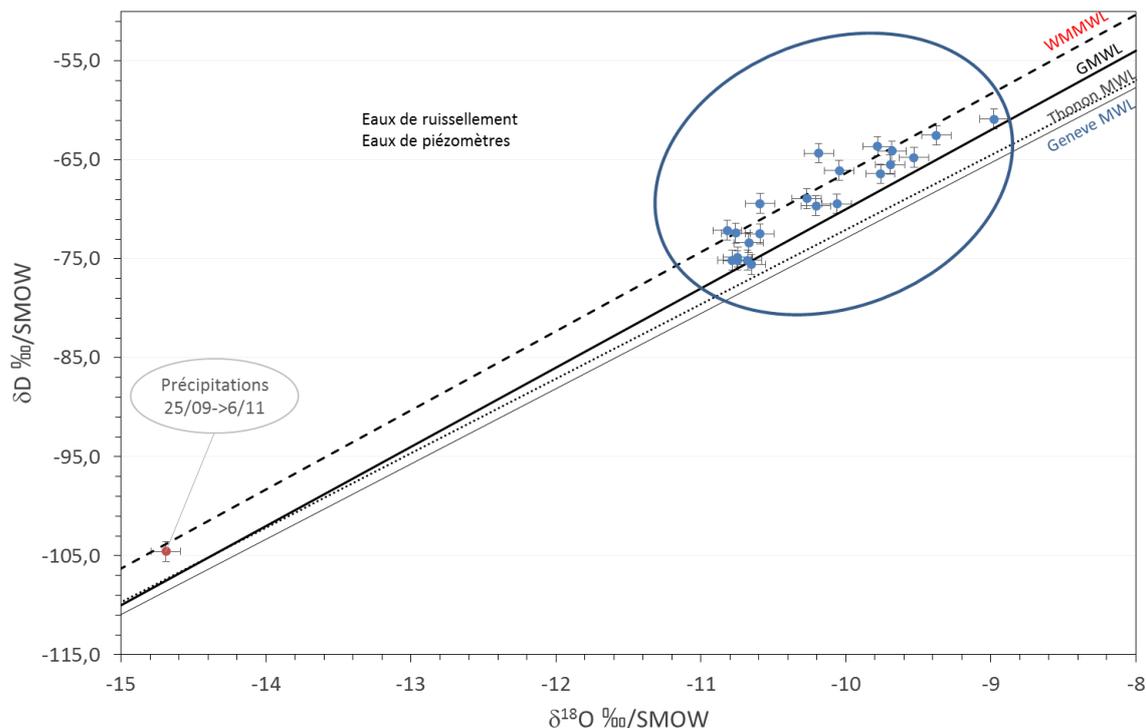


Figure 119 : Diagramme δD vs $\delta^{18}\text{O}$ reportant les données acquises sur les eaux collectées sur la zone du Luitel. La droite des eaux météoriques mondiales (WMMWL, trait plein épais noir), les droites des eaux météoriques locales de Thonon (trait pointillés, Thonon MWL, IAEA) et de Genève (trait plein fin, Geneve 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, p113) 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 géologique, des influences variés au niveau des tourbières du secteur et des processus de mélange potentiels.

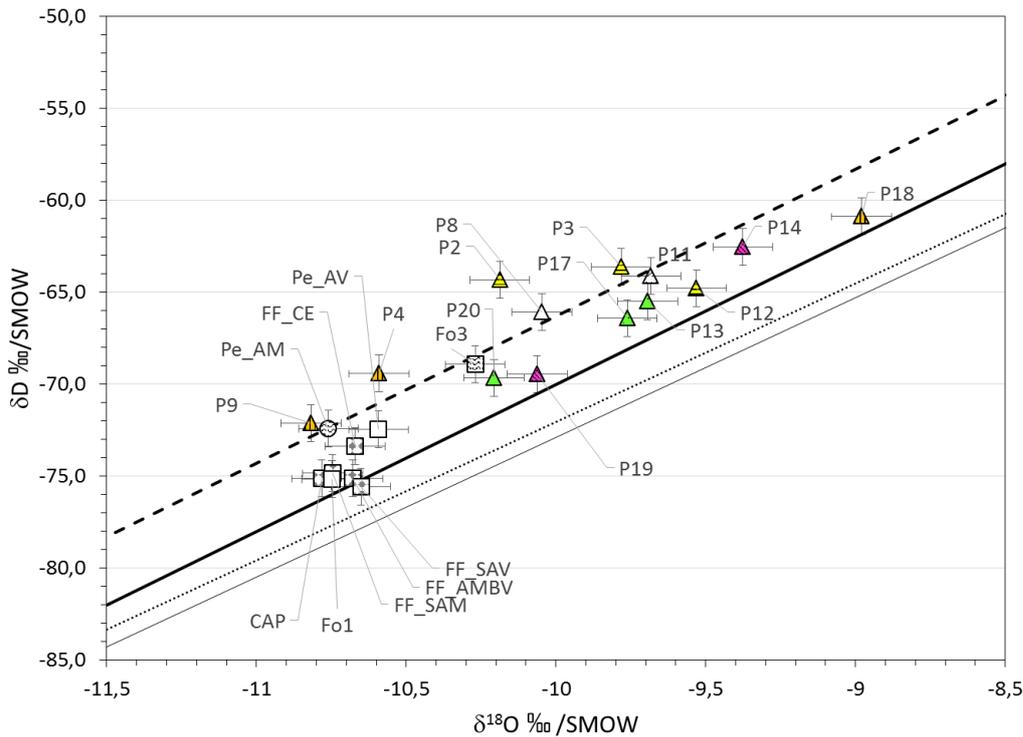


Figure 120 : Diagramme δD et $\delta^{18}O$ reportant le détail des données obtenues sur les eaux de ruissellement et souterraines du Luitel. Les symboles carrés représentent les cours d'eau, les drains et le captage, les triangles les eaux des piézomètres. Le remplissage des symboles est celui adopté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

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 supplémentaires 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 de 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.

3.2. Tourbière de Frasne (à compléter)

Travail prévu à intégrer

PARTIE IV

Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage

La question du rôle de soutien d'étiage des zones humides aux cours 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 sur la question 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, p42). 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 (à compléter)

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 travaux¹¹ et ¹² 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 QGIS¹³.

¹¹ <https://inpn.mnhn.fr/docs-web/docs/download/247392>

¹² <http://www.zones-humides.org/guide-de-la-m%C3%A9thode-nationale-d%C3%A9valuation-des-fonctions-des-zones-humides>

¹³ 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-ggis-methode-nationale-evaluation-fonctions-zones>

PARTIE IV – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage

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.

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 Frasne 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 Frasne, 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).

À titre d'exemple le Tableau 16 propose une série d'indicateurs envisageables.

En cours de construction

Voir Gayet et al., 2016 ; Forum Marais Atlantiques, 2014

Indicateurs de soutien d'étéage à l'échelle du site (complexe tourbeux)				
		Favorable Soutien d'étéage	Défavorable Soutien d'étéage	Effets
Typologie	Sdage ? Eunis ? autres ?	À définir	À définir	-
Climat	Pluviométrie	Importante	Faible	-
	ETP	Faible	Importante	Si important : espace disponible dans la ZH
Hydrosystème	Cours d'eau entrant	-	-	Recharge potentiel de la ZH par ESU
	Cours d'eau traversant	-	-	Ralentissement écoulements ESU (sinuosité)
	Lien avec eau libre (ex : lac)	-	-	Forte évaporation
	Lien avec eau souterraine	Recharge ESO	-	Recharge ZH par ESO
	Drains et fossés		Long terme	Ralentissement ruissellements (pluie)
	ZH annexes	Présence	Absence	Ralentissement écoulements ESO
Stockage	Surface ZH	Grande	Faible	-
	Volume	Grand	Faible	-
	Structure (épaisseur acrotelme)	Forte	Faible	
	Propriété hydrodynamiques (S, K) - partie sup. acrotelme	S et K forts	S et K faibles	
	Propriété hydrodynamiques (S, K) - partie sup. acrotelme	S et K forts	S et K faibles	
	Hydrogramme (piézomètres)	Fortes variations	Faibles variations	
	Pente du substratum	Faible	Forte	Ralentissement écoulements ZH
	Conduits souterrains	Absence	Présence	Accélération écoulements ZH
	Côte de l'exutoire	-	-	Si haute, ralentissement écoulements ZH et ESO
Restitution	Exutoire(s) : cours d'eau et/ou nappe Propriété hydrodynamiques du sol : S, K, pf Hydrogramme (cours d'eau) Côte de l'exutoire (surverse)			Détermination du niveau de surverse
Végétation	Couvert végétal	Fort	Faible	Ralentissement des écoulements ESU (rugosité), mais peu augmenter PETP
	Type de végétation	À définir	À définir	
Morphologie	Microtopographie de surface	Faible	Forte	Ralentissement des écoulements ESU
	Pente de surface	Faible	Forte	Ralentissement des écoulements ESU

Tableau 16 : Exemples d'indicateurs de soutien d'étéages de zones humides à l'échelle du site

2. Indicateurs à l'échelle du bassin versant (à compléter)

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)¹⁴. 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 Madres. 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 Querigut ». 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, 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 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 fort épisode pluvieux ;
- le rôle des eaux stockées et circulant dans l'arène granitique dans l'alimentation des zones humides et dans le soutien d'étiage.

¹⁴ ONF (2019) Étude du fonctionnement hydrologique des zones humides de tête de bassin versant de l'Aude, rapport phase 2, 109p.

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 17).

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

Tableau 17 : Caractéristiques des 2 couples de bassins versants

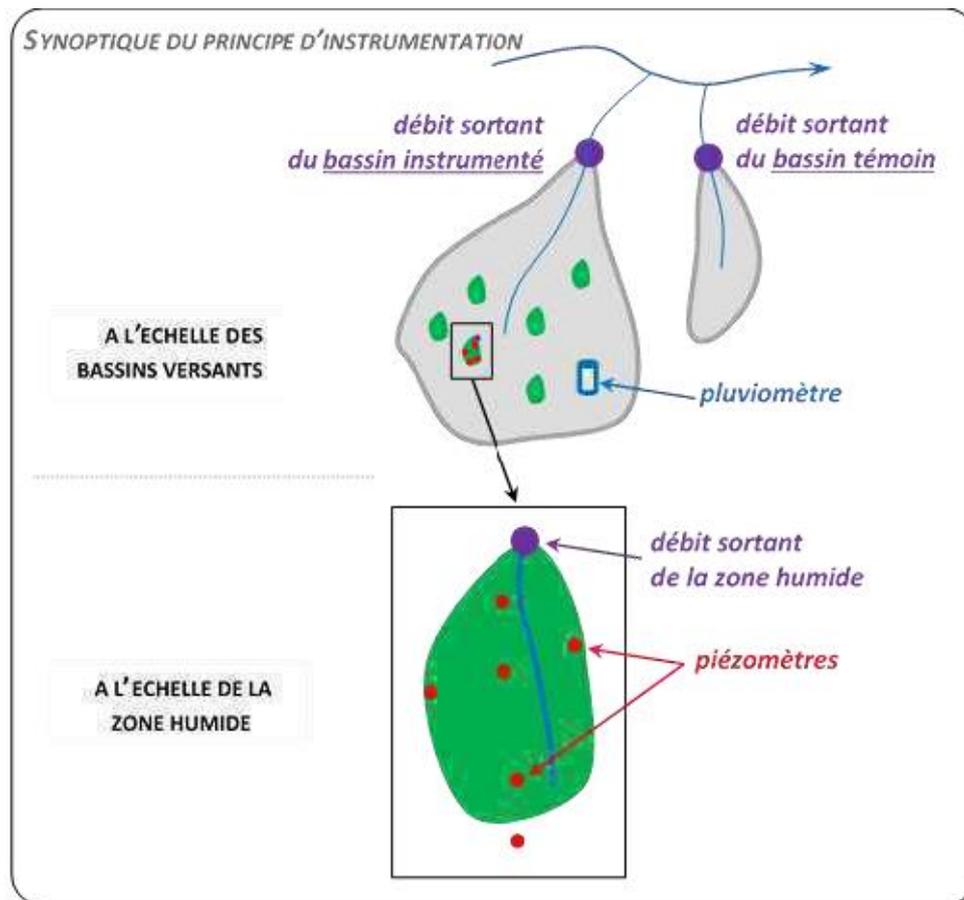


Figure 121 : Principe de l'instrumentation du bassin du Madres

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 bassin versant peu pourvu 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

PARTIE IV – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage

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 Madres 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.

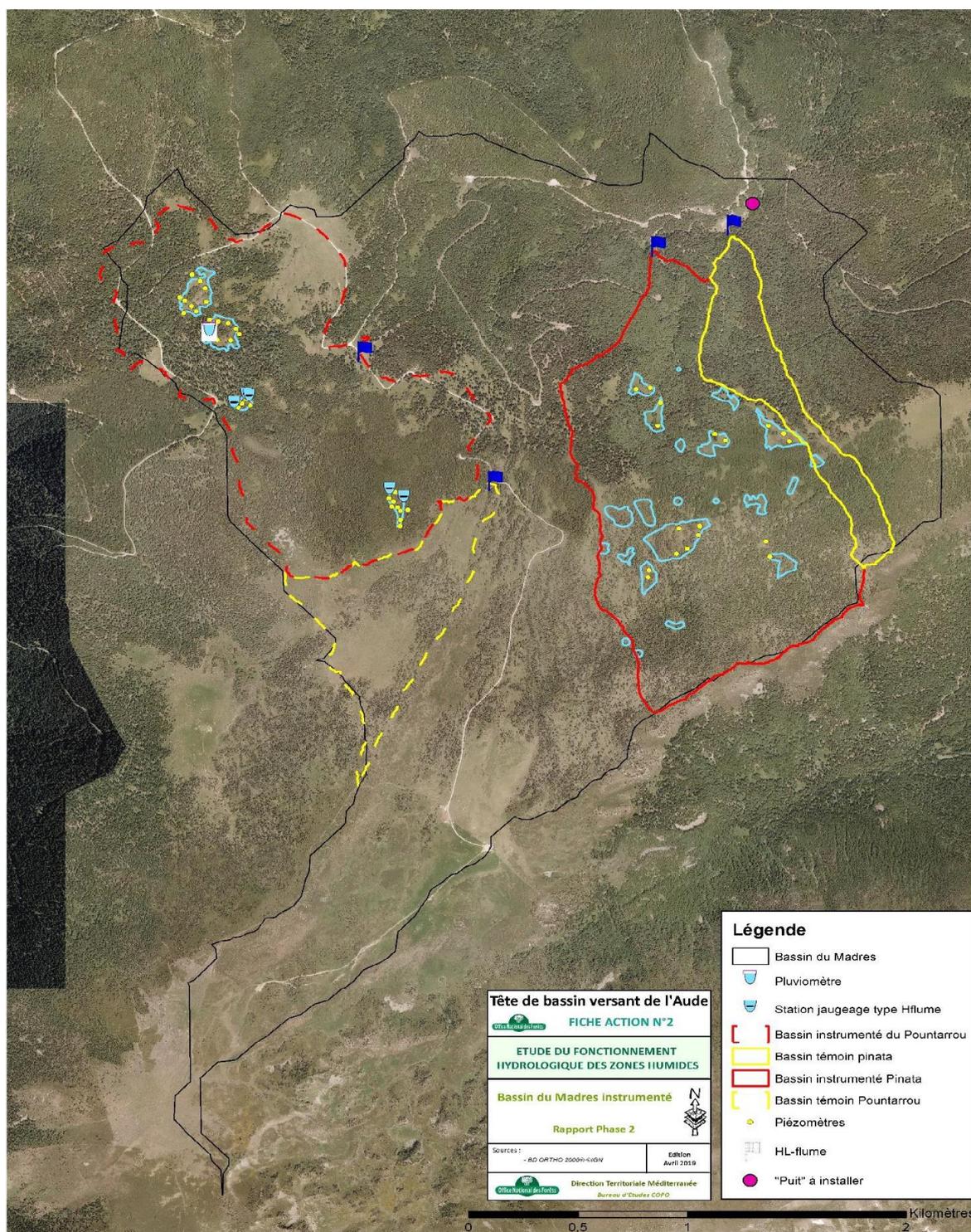


Figure 122 : Instrumentation du bassin du Madres

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, p127). De plus, si les résultats quantifiés du rôle de soutien d'étiage comparé des couples de bassin versant étudiés sont significatifs, il sera dès lors envisageable de développer une méthodologie de validation des indicateurs.

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 »¹⁵.

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... (Tableau 18).

- **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 forte pente) ;
- 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).

¹⁵ <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].

En cours de construction

Indicateurs de soutien d'étiage à l'échelle du bassin versant (complexes tourbeux)			
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)		
Couvert	Couvert végétal		
	Point de flétrissement		

Tableau 18 : 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 (à compléter)

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

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

1. Bilan du travail de la phase 2 (à compléter)

1.1. Avancement et taux de réalisation

La plupart des tâches prévues dans la phase 2 ont été réalisées ou démarrées (Tableau 19). Elles seront terminées pour certaines en phase 3 (volets géochimie et géophysique).

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	100%	-
Volet géophysique	50%	Frasne en cours (septembre 2019)
Volet pédologie	100%	
Volet géochimie	50%	Frasne et Luitel (dernière campagne à planifier 2020)
Première réflexion sur les indicateurs	50%	-
Livrables		
Rapport phase 1	100%	-
Rapport phase 2	75%	
Document de valorisation du travail bibliographique	0%	Fiche Zabir phase 1
MetaZabir	0%	

Tableau 19 : Taux de réalisation des tâches de la phase 1

1.1. Bilan : volet hydrologique (à compléter)

1.1.1. Analyse statistiques des données hydrologiques (Luitel et Frasne)

A intégrer

1.1.2. 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 cycles hydrologiques (3 étés). 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. 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.

Conclusion

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.

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.

1.1.3. Réseaux de neurones

À intégrer

1.1.4. Bilan global sur le volet hydrologie (à compléter)

Pour rappel, l'objectif de ce volet vise à établir un bilan hydrologique sur les sites d'étude afin de quantifier le soutien d'étiage. Pour ajuster ce bilan hydrologique il est 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 [cf. Volet pédologie] ;
- 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 sphaignes) [cf. Volet pédologie] ;
- de s'intéresser à la contribution des zones périphériques des tourbières [cf. Volet pédologie] ;
- de connaître spatialement l'épaisseur maximale de la zone non-saturée [cf. Volets pédologie/géophysique] ;
- de préciser le ruissellement du BV de Luitel (actuellement coefficient issue de la littérature).

1.2. Bilan : Volet géophysique (Luitel et Frasne)

Ce volet est étroitement lié avec le volet pédologie (Conclusion - §Bilan : volet pédologie (Luitel) – articulation avec le volet géophysique, p133). 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 Frasné, 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 géophysique.

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 Frasné grande surface et connaissances lacunaires.

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

1.3. 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'eaux. 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

Conclusion

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 gyttia) prélevé en 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. De plus, il serait dès lors possible d'envisager une modélisation à base physique.

1.4. Volet géochimie (à compléter)

A intégrer

Si les contrastes chimiques des eaux analysées sont suffisants, le volet géochimique permettra de mieux cerner l'origine des eaux alimentant le complexe tourbeux des sites d'étude et si possible la partition des différentes contributions

Traitement des données ions majeurs

Croisement des données ions majeurs et données isotopiques

Suivi des précipitations (prélèvements sur site sur un pas de temps le plus serré possible en fonction des interventions sur site par les différents acteurs)

Campagne d'échantillonnage supplémentaire dans un contexte hydrologique différent

A réfléchir - Mise en œuvre d'un traceur supplémentaire (ex 87Sr/86Sr) pour mise en évidence d'une influence du substratum et zonation BV?

A réfléchir – Mise en œuvre d'un traceur supplémentaire (ex 13C/12C) pour mise en évidence des apports inorganiques dissous en comparaison avec les différents niveaux de tourbe

Si les contrastes chimiques des eaux analysées sont suffisants, le volet géochimique permettra de mieux cerner l'origine des eaux alimentant le complexe tourbeux des sites d'étude et si possible la partition des différentes contributions.

Outre l'analyse des isotopes de l'eau et des ions majeurs, le suivi d'éléments traces ou d'autres isotopes (à déterminer, ex : terres rares) pourrait être un complément intéressant.

Des suivis en continu, ou au moins à plus grande fréquence, de certains éléments (ex : COD) pourraient être intéressants pour mieux cerner la dynamique du système. Ce type de suivi, bien que très pertinent, n'est pas prévu dans le budget du projet ZHTB.

Il est nécessaire de coordonner le travail de géochimie sur Frasne avec Guillaume Bertrand (UFC).

1.5. Bilan au Luitel

Le Tableau 20 présente les tâches effectuées au Luitel en phase 2 du projet ZHTB.

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 :
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 EVS-ISTHME, T. Jolly (09/2018)
Essai de modélisation soutien d'étiage : stage master EVS-EMSE, Y. Pascoletti (09/2018)
Analyse des données hydrologiques : Post-doc EMA, S. Pinel (06/2019)

Tableau 20 : Bilan des 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 :

- articulation volets géophysique/pédologie : stage master, T. Jolly (2019) – Géométrie et structure 3D de la tourbière du Luitel

Conclusion

- volet pédologie : analyse de la grande carotte (6m) – pollen, macrorestes, carbone total, C¹⁴.
- volet géochimie : stage de master LMV (commun à Frasne) – prélèvements pour analyse ions majeurs, isotopes de l'eau voire des éléments traces et autres isotopes (à déterminer).

1.6. Bilan Frasne

Le Tableau 21 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 :
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 des données hydrologiques : Post-doc EMA, S. Pinel et Stage de master EMA, H. Caldirak (06/2019)

Tableau 21 : 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 géophysique : analyse des données géophysiques (au besoin nouvelle campagne en hiver 2020), stage de Master
- volet géochimie : stage de master LMV (commun à Luitel) – prélèvements pour analyse ions majeurs, isotopes de l'eau voire des éléments traces et autres isotopes (à déterminer).

1.7. Bilan des stages et post-doc

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 des données hydrologiques : Post-doc EMA, S. Pinel (06/2019)
Frasne :
Analyse des données hydrologiques : 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 22 : 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 23 : Stages et post-doc prévus pour la phase 3 du projet ZHTB

Lien avec le projet soHUMID

Lien avec SNO tourbières (Guillaume Bertrand) : projet Critical Peat + doctorant + stages master (hydro et géochimie)

1.8. Bilan global (à compléter)

2. Mise en œuvre et objectifs de la phase 3 (à compléter)

2.1. Conduite des objectifs à terme

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

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

2.2. Objectifs de la phase 3

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

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

- critères de présence, de maintien et d'évolution des zones humides favorables au soutien d'étiage (ex : géomorphologique, géologique, climatique...);
 - enrichissement du concept d'espace de bon fonctionnement des zones humides.
- **Autres compétences potentielles à intégrer en phase 3 :**
 - analyse spatiale : modèles spatiaux prédictifs de répartition de zones humides (Université Jean Monnet de Saint-Etienne - UMR 5600 EVS)
 - aspects sociaux : perceptions, enjeux, besoins (ENS Lyon - UMR 5600 EVS)
 - indicateurs paysagers (ENP Blois, Zal)
 - indicateurs écologiques (Irstea)
 - quantification de services écosystémiques (Univ. Besançon et Orléans)
 - **Autres sites à intégrer en phase 3 :**
 - autres sites complémentaires (analyse de données, test des indicateurs simplifiés) ;
 - zones humides de l'Aude (lien accord cadre AE-RMC-ONF). Un accord cadre AE-RMC/ONF concernant l'étude des zones humides du bassin versant de l'Aude a été signé en 2017. Une articulation entre cette étude et le projet ZHTB est envisagée pour la phase 3. Toutefois, dès la phase 2 du projet ZHTB des échanges et des réunions de travail sont envisagées : 1) information sur le contexte, les spécificités et les problématiques des zones humides de l'Aude ; 2) assistance méthodologique à l'ONF pour l'étude de ces zones humides ; 3) visite de terrain.

Poursuite de l'acquisition de données et d'informations

- **Analyse et synthèse des données**
- **Poursuite des travaux de modélisation** (Stage de master EMSE - 2020?)
- **Élaboration d'indicateurs synthétiques d'évaluation du soutien d'étiage**
 - à l'échelle du site (Frasne et Luitel)
 - à l'échelle du bassin versant - approche géomatique multicritère, ZH BV Aude (Post-doc EVS-ISTHME - 2019/2020 ?)
- **Test et transférabilité des indicateurs**
 - sites présélectionnés en phase 1
 - ZH du BV de l'Aude
- **Restitution et valorisation**

Références Bibliographiques (à actualiser)

BIBLIO YVAN

- ACREMAN M.-C., 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. Evaluation économique des zones humides. 10p.
- AGENCE DE L'EAU LOIRE-BRETAGNE, 2002. Les fonctions des zones humides. 25p. AGENCE MTDA, 2017. Évaluation environnementale du SAGE Drac-Romanche. 213p.
- BISSARDON M., GUIBAL L., RAMEAU J.-C. (dir.), 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., MCINNES R.-J., 1994. Wetland hydrological vulnerability and the use of classification procedures: a Scottish case study. Journal of Environmental Management, 42, 403-414.
- 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. 167p.
- 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.

Références bibliographiques

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.

BIBLIO GUILLAUME (RN)

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.

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.

BIBLIO GUILLAUME

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

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.

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

BIBLIO VÉRONIQUE

Barbieri M., Boschetti T., Petitta M., Marco T., 2005 - Stable isotope (2H , 18O and $87\text{Sr}/86\text{Sr}$) 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.

Güter 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.

Références bibliographiques

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

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., Boulet 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.

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.

Références bibliographiques

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.

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.

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.

Références bibliographiques

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

Références bibliographiques

- Krueger J.P., Leifeld J., Glatzel S., Szidat S., Alewell C., 2015. Biogeochemical indicators of peatland degradation — a case study of a temperate bog in northern Germany. *Biogeosciences* 12, 2861–2871.
- Kruse J., Lennartz B., Leinweber P., 2008. A modified method for measuring saturated hydraulic conductivity and anisotropy of peat samples. *Wetlands* 29, 527–531.
- Kuhry P., Vitt D.H., 1996. Fossil carbon/nitrogen ratios as a measure of peat decomposition. *Ecology* 77, 271–275.
- Lang C., 2007. Étiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. Université de Metz, 375p.
- Laplace-Dolonde A., 2001. Fonctionnement hydrologique et diversité typologique ; approche écologiques et socio-économiques ; applications pour une stratégie de conservation et de gestion. Programme National de Recherche sur les Zones Humides, Ministère de l'Environnement, Agences de l'Eau, GIP Hydrosystèmes, BRGM, Université Lyon 2, p 12-34.
- Lewis C., Albertson J.D., Xu X., Kiely G., 2012. Spatial variability of hydraulic conductivity and bulk density along a blanket peatland hillslope. *Hydrol. Process.* 26, 1527–1537.
- Lishtvan, I.I., Kroll, N.T., 1975. Basic Properties of Peat and Methods for Their Determination. Nauka I Tekhnika, Minsk, Byelorusse.
- Lodenus 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., Urlich 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), p 589-3600.

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

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

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

Liste des figures et tableaux

Liste des figures

Figure 1 : Articulation interdisciplinaire du projet ZHTB (Phase 1, 2 et 3)	7
Figure 2 : Histoire de la formation du complexe tourbeux du Luitel depuis la fonte des glaciers (Desplanque, 2011)	11
Figure 3 : Localisation et emprise de la réserve naturelle du Luitel (Laurent et al., 2012)	13
Figure 4 : La tourbière du col et les sous-bassins versants (Pascoletti, 2018)	13
Figure 5 : Carte conductivités électriques (Pascoletti, 2018)	14
Figure 6. Géologie du Luitel (Barféty et al., 1972)	15
Figure 7. a) Carte des profils d'acquisitions géoradar (Garambois, 2008) b) Cartographie du socle minéral de la tourbière du Col du Luitel (Ravatin, 2017)	16
Figure 8. a) Points de prélèvements de tourbe (Hustache, 2004), b) Tableau des caractéristiques de la tourbe selon les points de prélèvements (Hustache 2004)	17
Figure 9. Diagramme ombrothermique du Luitel 2007 – 2016 (Ravatin, 2017)	17
Figure 10. Réseau hydrographique de la tourbière du Col du Luitel (Pascoletti, 2018)	18
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)	19
Figure 12. Espèces protégées sur la réserve de Luitel : a) <i>Carex limosa</i> , b) <i>Drosera rotundifolia</i> , c) <i>Scheuchzeria palustris</i>	20
Figure 13. Comparaison du comportement de piézomètre proche de fossé de drainage (P17) avec piézomètre éloigné de fossé de drainage (P3)	21
Figure 14. Instrumentation de la tourbière du Col du Luitel	22
Figure 15. Représentation schématique d'un piézomètre (Pascoletti, 2018)	23
Figure 16. Courbe de tarage du ruisseau de Fontfroide (Laurent, 2007)	25
Figure 17. Tableau trimestriel récapitulatif des données brutes disponibles et de leur disponibilité (rouge = pas de données, vert = disponible, jaune = données incomplètes)	25
Figure 18. Localisation de la tourbière de Frasne	27
Figure 19. 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, 2018)	28
Figure 20. Description pédologique du site d'étude (adapté de Briot, 2004)	29
Figure 21. Diagramme ombrothermique, mesures des températures et des précipitations pour la période novembre 2008 – décembre 2009 (Delarue, 2010)	29
Figure 22. Cartographie du réseau hydrologique de surface (Collin, 2018)	30
Figure 23. Emplacement des piézomètres (Collin, 2018)	32
Figure 24. Localisation des sondes installées sur des cours d'eau (Collin, 2018)	32

Liste des figures et tableaux

Figure 25. Tableau récapitulatif des données brutes disponibles et de leur disponibilité (rouge = pas de données, vert = disponible, orange = données manquantes)	33
Figure 26 : Représentation schématique du bilan théorique d'une tourbière	34
Figure 27 : 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	35
Figure 28 : représentation schématique du perceptron multicouche, ici à une couche de neurones cachés	36
Figure 29 : représentation schématique d'un réseau de neurones récurrent d'ordre r	36
Figure 30 : représentation schématique d'un approximateur universel.	37
Figure 31 : 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.	39
Figure 32 : Instrumentation hydrologique au Luitel.....	43
Figure 33 : Vue en plan des seuils jaugés installés au Luitel	44
Figure 34 : Données acquises avec les sondes au niveau des seuils amont et aval du ruisseau de Fontfroide	44
Figure 35 : Instrumentation sur la tourbière de Frasne	46
Figure 36 : Remplissage/vidage de la doline du Creux au lard.....	47
Figure 37. Organigramme des analyses statistiques	48
Figure 38. Exemple de courbe des débits classés (Kong a Siou, 2011)	49
Figure 39. Autocorrélogramme d'un signal de débit (Kong a Siou, 2011)	50
Figure 40. Exemple de corrélogramme croisé pluie-débit (Kong a Siou, 2011)	51
Figure 41. Exemple de données relevées présentant a) un fort degré de bruit (données de hauteur de neige), b) des incohérences (hauteurs piézométriques du piézomètre de la station météorologique), c) des lacunes (données de hauteur d'eau FF1)	53
Figure 42 : apparition de la réalisation du critère de construction de pluies hybrides.	53
Figure 43. Traitement de l'évapotranspiration	54
Figure 44. Traitement des données de débits.....	54
Figure 45. Traitement des hauteurs du piézomètre météorologique.....	55
Figure 46. Description statistique des pluies journalières	56
Figure 47. Description statistique des données d'évaporation journalières	56
Figure 48. Description statistique des débits journaliers de FF1 et RDL (septembre 2014- novembre 2018)	57
Figure 49. 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).....	58
Figure 50. Carte des niveaux piézométriques construite à partir des niveaux relevés le 25.06.2018 (Pascoletti, 2018).....	58
Figure 51. Description statistique des battements de nappe journaliers relevés par le piézomètre de la station météorologique	59
Figure 52. Autocorrélogramme du signal de pluie	60
Figure 53. Spectre des précipitations journalières a) échelle logarithmique b) échelle linéaire.....	60

Figure 54. Autocorrélogramme du signal de débits issus de la sonde FF1	61
Figure 55. a) spectre des débits journaliers (échelle logarithmique) b) spectre des débits journaliers (échelle linéaire).....	62
Figure 56. Autocorrélogramme du niveau piézométrique au piézomètre de la station météorologique.....	62
Figure 57. 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)	63
Figure 58. Autocorrélogramme du signal d'évapotranspiration	64
Figure 59. a) spectre des cumuls journaliers d'évapotranspiration (échelle logarithmique) b) spectre des cumuls journaliers d'évapotranspiration (échelle linéaire).....	64
Figure 60. Corrélogramme croisé pluie-débits FF1 (les lignes horizontales en pointillés représentent les seuils de décorrélation théoriques), période novembre 2009- novembre 2018.....	65
Figure 61. a) fonction de transfert en échelle logarithmique, b) fonction de transfert en échelles linéaire..	65
Figure 62. Corrélogramme croisé pluie-piézomètre de la station météorologique (les lignes horizontales en pointillés représentent les seuils de décorrélation théoriques), période juillet 2006- décembre 2018.	66
Figure 63. Graphe des fréquences des débits FF1 journaliers sur la période novembre 2009-décembre 2018	67
Figure 64. Répartitions des jours d'été sur la période novembre 2009- décembre 2018 : a) annuellement, b) mensuellement.....	67
Figure 65. Étude de la saisonnalité des temps de réponse et effet mémoire du ruisseau de Fontfroide	68
Figure 66. Analyse du coefficient d'écoulement pour les ruisseaux de Fontfroide et du lac: a) série temporelles; b) Analyse de la saisonnalité	69
Figure 67. Analyse comparatives entre les sondes FF1 et FFAv: a) débits b) température, c) conductivité ..	70
Figure 68. Analyse comparatives entre les sondes FFAM et FFAv: a) débits b) température, c) conductivité.	70
Figure 69. Comparaison entre la sonde FF1 et la sonde RDL a) débits, b) température, c) conductivité.....	71
Figure 70 : Trois réservoirs pour la modélisation des flux	74
Figure 71 : Schéma de synthèse du modèle conceptuel : flux et réservoirs	74
Figure 72 : Modèle complet réalisé avec le logiciel Vensim.....	75
Figure 73 : Modèle d'écoulement des fluides dans un réservoir poreux (Dewandel et al., 2002)	75
Figure 74 : Instrumentation de la tourbière du Col du Luitel.....	76
Figure 75 : Carte piézométrique de la tourbière du Col du Luitel (construite à partir des niveaux relevés le 25.06.2018).....	76
Figure 76 : Débits participant au soutien d'été	77
Figure 77 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2014 :.....	78
Figure 78 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2015.....	78
Figure 79 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2016.....	79
Figure 80 : Débits moyens journaliers de Fontfroide et de soutien d'été, été 2016 (agrandissement de la partie encadrée de la figure précédente).....	79

Liste des figures et tableaux

Figure 81. Données utilisées pour modélisations à base de réseaux de neurones (Pluie avec neige est aussi dénommée pluie hybride dans le texte).....	82
Figure 82. Comparaison de l'évapotranspiration virtuelle avec l'évaporation mesurée, et l'évaporation fournie par le modèle SAFRAN-ISBA	82
Figure 83. Répartition des ensembles pour la modélisation (vert = apprentissage, bleu = arrêt, jaune = test)	83
Figure 84. Architecture du réseau choisi pour modéliser le débit de Fontfroide	84
Figure 85. Débits de Fontfroide : simulés versus observés	84
Figure 86. Architecture du réseau choisi pour modéliser le piézomètre P3	85
Figure 87. Niveaux piézométriques de P3: simulés versus observés	85
Figure 88 : Principaux avantages et inconvénients des 2 principales méthodes géophysiques (ERT et GPR) mises en œuvre sur les tourbières	88
Figure 89 : Dispositif d'acquisition de données avec un GPR.....	89
Figure 90 : Topographie du fond (profils GPR 2007)	90
Figure 91 : Profils GPR 2007 et 2018	90
Figure 92 : Premiers résultats sur le profil P2 (GPR 2007) ou T1 (GPR 2018)	91
Figure 93 : Caractérisation des interfaces à l'aide des carottes pédologiques (profil P6 – GPR 2007 ou T6 – GPR 2018)	91
Figure 94 : Données géophysiques sur la tourbière de Frasne	92
Figure 95 : Prospection ERT du Creux au Lard (Bichet, 2015)	93
Figure 96 : Profils géophysiques prévus sur Frasne	93
Figure 97 : Profils test réalisés en janvier 2019.....	94
Figure 98 : Premiers résultats et validation à l'aide des sondages à la perche.....	94
Figure 99 : Paramètres hydrophysiques généraux pour une tourbière haute à sphaignes (WASTIAUX.C, 2008)	97
Figure 100 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrologique supposé d'une tourbière de tête de bassin versant	97
Figure 101 : Contexte géographique des tourbières du Luitel.....	98
Figure 102 : Principe de fonctionnement du carottier Russe (Guiter et al. 2013)	100
Figure 103 : Matériels de prélèvement et de stockage du sédiment (25/04/2018)	100
Figure 104 : Zone sud de la tourbière du col – prairie à Molinies bleues (Cubizolle, 2018)	101
Figure 105 : Présentation des écosystèmes du Luitel (exemples)	103
Figure 106 : Stratigraphie des points de prélèvements au carottier Russe – Tourbière du col – RNN du Lac Luitel	104
Figure 107 : Collection de cartes des faciès édaphiques de la tourbière du col.	105
Figure 108 : Synthèse des « zones réservoirs » susceptibles d'assurer un étiage	107
Figure 109 : Hypothèses sur les secteurs contribuant au faible soutien d'étiage.....	107
Figure 110 : Coupe paléo stratigraphique simplifiée du transect P6-Point S4 – tourbière du col.....	109
Figure 111 : Extrait de la carte géologique au 1/50000 ^{ème} . La zone humide de Luitel est localisée par le triangle rouge.....	111

Figure 112 : Carte simplifiée de la réserve naturelle du Lac Luitel (Desplanque, 2001, publié dans Guiter et al. 2015).....	111
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. Source : F. Paran.....	111
Figure 114 : Digramme de Piper reportant les abondances relatives des espèces ioniques majeures : cations (triangle de gauche) et anions (triangles de droites)	114
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.....	115
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.	116
Figure 117 : Diagramme binaire Ca=f(Na). Les concentrations sont exprimées en mg/L.....	117
Figure 118 : Représentation des différents groupes hydrogéochimiques définis à partir des diagrammes de Schoeller-Berkaloff	118
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, Geneve MWL, Halder et al., 2013), la droite des eaux météorique de la partie occidentale du bassin méditerranéen (tirets, Celle et al., 2000) sont reportées à titres informatif.	119
Figure 120 : Diagramme δD et $\delta^{18}O$ reportant le détail des données obtenues sur les eaux de ruissellement et sous-terraines 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.....	120
Figure 121 : Principe de l'instrumentation du bassin du Madres	125
Figure 122 : Instrumentation du bassin du Madres	126
Figure 123 : Lac tourbière de Luitel (décembre 2016)	129
Figure 124 : Tourbière vivante de Frasne (mars 2017)	129

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 : Présentation rapide du site de Luitel : éléments de synthèse.....	12
Tableau 4. Paramètres mesurés par la station et capteurs correspondant (Pascoletti, 2018).....	23
Tableau 5. Caractéristiques des piézomètres (adapté de Hustache, 2004)	24
Tableau 6. Caractéristiques des sondes installées sur les cours d'eaux de la réserve de Luitel	24
Tableau 7 : Présentation rapide du site de Frasne : éléments de synthèse.....	26
Tableau 8. 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. 56	
Tableau 9. 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.....	57
Tableau 10. Matrice de corrélation entre les hauteurs des piézomètres.....	59
Tableau 11. Tableau des indicateurs statistiques liés aux piézomètres suivis continuellement (PM et P20_Diver sont considérés comme défailants, P20_Solinst présente une courte profondeur temporelle (octobre 2017- novembre 2018))	69
Tableau 12 : Comparaison des moyennes des débits de Fontfroide et de soutien d'étiage par période.....	78
Tableau 13 : Débits moyens annuels et module interannuel de Fontfroide.....	80
Tableau 14 : Justificatif du plan d'échantillonnage de la tourbière du col Luitel.....	99
Tableau 15 : Enregistrement des précipitations sur la zone humide du Luitel entre le 29 septembre et le 7 novembre 2018 (Date et hauteur de précipitation)	112
Tableau 16 : Exemples d'indicateurs de soutien d'étiages de zones humides à l'échelle du site.....	123
Tableau 17 : Caractéristiques des 2 couples de bassins versants	125
Tableau 18 : Exemples d'indicateurs de soutien d'étiages de zones humides à l'échelle du bassin versant	128
Tableau 19 : Taux de réalisation des tâches de la phase 1.....	131
Tableau 20 : Bilan des tâches effectuées au Luitel en phase 2 du projet ZHTB	135
Tableau 21 : Bilan des tâches effectuées à Frasne en phase 2 du projet ZHTB	136
Tableau 22 : Bilan des stages et post-doc de la phase 2 du projet ZHTB	137
Tableau 23 : Stages et post-doc prévus pour la phase 3 du projet ZHTB.....	137

Table des matières complète

Fiche signalétique (à actualiser)	I
Table des matières synthétique	III
Résumé (à actualiser)	V
Acronymes, sigles et abréviations (à actualiser)	VII
Préambule (à actualiser)	IX
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	10
1. Présentation des sites d'étude (à finaliser)	11
1.1. <i>Tourbière de Luitel</i>	12
1.1.1. Présentation rapide du site de Luitel	12
1.1.2. Situation géographique et typologie	12
1.1.2.1. Situation géographique	12
1.1.2.2. Typologie	14
1.1.3. Géologie	15
1.1.3.1. Généralités	15
1.1.3.2. Géomorphologie	16
1.1.3.3. Pédologie	16
1.1.4. Climatologie	17
1.1.5. Hydrologie	18
1.1.6. Habitats	19
1.1.7. Socio-économie	20
1.1.8. Risques	20
1.1.9. Suivi de la tourbière	22
1.1.9.1. Données météorologiques	22
1.1.9.2. Données piézométriques	23
1.1.9.3. Données sur les cours d'eau	24
1.1.9.4. Disponibilité des données	25
1.2. <i>Tourbière de Frasne</i>	26
1.2.1. Présentation rapide du site de Frasne	26
1.2.2. Situation géographique et typologie	26

Table des matières complète

1.2.3. Géologie.....	27
1.2.3.1. Généralités	27
1.2.3.2. Géomorphologie	28
1.2.3.3. Pédologie.....	28
1.2.4. Climatologie.....	29
1.2.5. Hydrologie	29
1.2.6. Habitats	30
1.2.7. Socio-économie	30
1.2.8. Risques.....	31
1.2.9. Suivi de la tourbière	31
2. Compléments bibliographiques	34
2.1. <i>Point sur l'ETP</i>	34
2.2. <i>Réseaux de neurones</i>	35
2.2.1. Généralités	35
2.2.1.1. Le neurone	35
2.2.1.2. Réseaux de neurones	35
2.2.1.2.1. Réseaux statiques.....	36
2.2.1.2.2. Réseaux dynamiques ou récurrents.....	36
2.2.1.2.3. Choix du type de réseau : bruit de sortie ou bruit d'état.....	37
2.2.2. Propriétés fondamentales des réseaux de neurones.....	37
2.2.2.1. L'approximation universelle	37
2.2.2.2. La parcimonie	38
2.2.3. Apprentissage des réseaux de neurones	38
2.2.3.1. Minimisation de la fonction de coût	38
2.2.3.2. Le surajustement.....	38
2.2.3.2.1. Estimation de l'erreur de généralisation : la validation croisée..	38
2.2.3.2.2. L'arrêt précoce	39
2.2.3.2.3. La sélection de variables	39
2.2.4. Applications à l'hydrologie.....	40
PARTIE II – Volet Hydrologie	41
1. Partage de données et suivis existants (à compléter)	42
1.1. <i>Tourbière de Luitel</i>	42
1.2. <i>Tourbière de Frasne</i>	42
1.3. <i>Autres projets en lien</i>	42
2. Instrumentation et mesures pour le suivi hydrologique	43
2.1. <i>Tourbière de Luitel</i> (à compléter).....	43
2.2. <i>Tourbière de Frasne</i> (à compléter)	46
3. Analyse statistique des données hydrologiques	48
3.1. <i>Tourbière de Luitel</i>	48
3.1.1. Principe.....	48
3.1.2. Objectifs.....	48
3.1.3. Matériel et méthode(s)	48
3.1.3.1. Indicateurs statistiques hydrologique : le coefficient d'écoulement	48
3.1.3.2. Étude des débits classés.....	49
3.1.3.3. Analyse temporelle	49
3.1.3.3.1. Corrélogramme simple.....	49
3.1.3.3.2. Corrélogramme croisé.....	50
3.1.3.4. Analyse fréquentielle	51
3.1.3.4.1. Spectre simple.....	51
3.1.3.4.2. Fonction de transfert	52
3.1.3.5. Méthode de prétraitement des signaux.....	52
3.1.3.5.1. Introduction	52
3.1.3.5.2. Méthodes de filtrage et complétion de données.....	52
3.1.4. Présentation des premiers résultats	53

3.1.4.1.	Description des traitements faits sur les données brutes.....	53
3.1.4.2.	Description statistiques descriptives.....	55
3.1.4.2.1.	Pluie.....	55
3.1.4.2.2.	Evapotranspiration.....	55
3.1.4.2.3.	Débits.....	57
3.1.4.2.4.	Piézomètres.....	57
3.1.4.3.	Analyse simple.....	59
3.1.4.3.1.	Pluie.....	59
3.1.4.3.2.	Débits.....	61
3.1.4.3.3.	Piézomètres.....	62
3.1.4.3.4.	Evapotranspiration.....	63
3.1.4.4.	Analyses croisées.....	64
3.1.4.4.1.	Pluie-débits FF1.....	64
3.1.4.4.2.	Pluie-piézomètres.....	66
3.1.5.	Premières conclusions.....	66
3.1.5.1.	Débits/période d'étéages.....	66
3.1.5.2.	Saisonnalité des index d'analyse corrélatoire.....	67
3.1.5.3.	Coefficient d'écoulement.....	68
3.1.5.3.1.	Analyse comparative.....	68
3.1.5.3.2.	Saisonnalité.....	68
3.1.5.3.3.	Analyse de la nappe.....	69
3.1.6.	Comparaison entre sondes installées sur le ruisseau de Fontfroide.....	69
3.1.6.1.	Comparaison des sondes FF1 et FFAv.....	69
3.1.6.2.	Comparaison des FFAm et FFAv.....	70
3.1.6.3.	Comparaison des FF1 et RDL.....	71
3.2.	<i>Tourbière de Frasne (à compléter)</i>	71
4.	Modélisation du rôle de soutien d'étéage.....	72
4.1.	<i>Modèles réservoirs – modélisation du soutien d'étéage au Luitel</i>	72
4.1.1.	Fondements du modèle conceptuel pour la modélisation du soutien d'étéage.....	72
4.1.2.	Mise en œuvre et validation du modèle.....	73
4.1.3.	Résultats : une première quantification du soutien d'étéage au Luitel.....	77
4.1.1.	Discussion.....	79
4.1.2.	Conclusion.....	81
4.2.	<i>Réseaux de neurones</i>	82
4.2.1.	Objectifs.....	82
4.2.2.	Données.....	82
4.2.2.1.	Méthode de sélection des modèles.....	83
4.2.2.1.1.	Simulations effectuées.....	83
4.2.2.1.2.	Complexité et Architecture.....	83
4.2.2.1.3.	Sélection des ensembles d'apprentissage, d'arrêt précoce, test et validation croisée.....	83
4.2.3.	Présentation des modèles choisis.....	83
4.2.3.1.	Modélisation du ruisseau de Fontfroide.....	83
4.2.3.2.	Modélisation de piézomètres.....	85
4.2.4.	Perspectives pour la phase 3.....	85
PARTIE III – Volets géophysique, pédologie, géochimie	87	
1.	Volet géophysique.....	88
1.1.	<i>Éléments bibliographiques</i>	88
1.2.	<i>Matériel et méthode</i>	88
1.3.	<i>Tourbière de Luitel</i>	90
1.3.1.	Protocole d'acquisition de données géophysique.....	90
1.3.2.	Premiers résultats.....	91
1.4.	<i>Tourbière de Frasne</i>	91
1.4.1.	Protocole d'acquisition de données géophysique.....	92

Table des matières complète

1.4.2. Premiers résultats	94
1.5. <i>Conclusion et perspectives</i>	95
2. Volet pédologie	96
2.1. <i>Caractérisation du fonctionnement hydrogéomorphologique de la Tourbière de Luitel</i>	96
2.1.1. Notions clés : fonctionnement hydrogéomorphologique des tourbières de têtes de bassins	96
2.1.2. Éléments géographiques d'importance du site de Luitel	98
2.1.3. Matériel et méthode	99
2.1.3.1. Mesures in situ et échantillonnages	99
2.1.3.2. Analyses en laboratoires : mesures physiques	101
2.1.3.3. Vue en plan et vue en coupe de la stratigraphie de la tourbière du col	102
2.1.4. Résultats	102
2.1.4.1. Texture et stratigraphie	102
2.1.4.2. Les faciès pédologiques à partir des groupements végétaux simplifiés	102
2.1.5. Discussion	106
2.1.5.1. Interprétation des résultats	106
2.1.5.2. La question du soutien d'étiage	106
2.1.6. Conclusion et perspective	108
3. Volet géochimie	110
3.1. <i>Tourbière de Luitel</i>	110
3.1.1. Contexte	110
3.1.2. Campagne d'échantillonnage	110
3.1.3. Les traceurs géochimiques utilisés	112
3.1.3.1. Éléments majeurs	112
3.1.3.2. Les isotopes de l'eau	112
3.1.4. Les méthodes analytiques	113
3.1.4.1. Les mesures de terrain	113
3.1.4.2. Les ions majeurs	113
3.1.4.3. Les isotopes de l'eau	113
3.1.5. Discussion autour des résultats	113
3.1.5.1. pH et conductivité	113
3.1.5.2. Concentrations en éléments majeurs	114
3.1.5.3. Les isotopes de l'eau	119
3.1.6. Conclusion et perspectives	120
3.2. <i>Tourbière de Frasne (à compléter)</i>	120
PARTIE IV – Indicateurs du potentiel de soutien d'étiage	121
1. Indicateurs à l'échelle du site (à compléter)	121
2. Indicateurs à l'échelle du bassin versant (à compléter)	124
2.1. <i>Zones humides du haut bassin-versant de l'Aude</i>	124
2.2. <i>Volet géomatique : indicateurs du potentiel de soutien d'étiage des zones humides à l'échelle du bassin versant</i>	127
CONCLUSION (à compléter)	131
1. Bilan du travail de la phase 2 (à compléter)	131
1.1. <i>Avancement et taux de réalisation</i>	131
1.1. <i>Bilan : volet hydrologique (à compléter)</i>	131
1.1.1. Analyse statistiques des données hydrologiques (Luitel et Frasne)	131
1.1.2. Modèles réservoirs (Luitel)	131
1.1.3. Réseaux de neurones	132
1.1.4. Bilan global sur le volet hydrologie (à compléter)	132
1.2. <i>Bilan : Volet géophysique (Luitel et Frasne)</i>	132
1.3. <i>Bilan : volet pédologique (Luitel) – articulation avec le volet géophysique</i>	133
1.4. <i>Volet géochimie (à compléter)</i>	134
1.5. <i>Bilan au Luitel</i>	135

1.6. Bilan Frasnè	136
1.7. Bilan des stages et post-doc	136
1.8. Bilan global (à compléter)	137
2. Mise en œuvre et objectifs de la phase 3 (à compléter)	138
2.1. Conduite des objectifs à terme	138
2.2. Objectifs de la phase 3	138
Références Bibliographiques (à actualiser)	141
Contexte, définitions et typologies	144
Bilan et rôle hydrologique	148
Liste des figures et tableaux	157
Liste des figures	157
Liste des tableaux	162
Table des matières complète	163
Tables des matières des Annexes (à actualiser)	169

Tables des matières des Annexes (à actualiser)

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 Zabr	23
A2.1. Fiche de synthèse Zabr - Phase 1 (2016-2017)	24
A2.2. Fiche de synthèse Zabr - Phase 2 (2017-2019)	26
Annexe 3 : Compte-rendu de terrains et de réunions	27
A3.1. Réunion de démarrage phase 1 : 3 mars 2016	27
A3.2. Réunion technique CEN Savoie : 19 avril 2016	32
A3.3. Comité technique - 14 avril 2017	35
A3.4. Comité de pilotage : 26 juin 2017	39
A3.5. Réunion-Visite de terrain- tourbière de Montselgues : 12 juillet 2016	51
A3.6. Réunion-Visite de terrain – Tourbière de Luitel : 12 décembre 2016	56
A3.7. Réunion-Visite de terrain – Plateau de Gavot : 7 mars 2017	71
A3.8. Réunion-Visite de terrain – Marais de Vaux : 23 mars 2017	87
A3.9. Réunion-Visite de terrain- Tourbière de Frasné : 29 mars 2017	101
A3.10. Réunion-Visite de terrain- Tourbière de Luitel : 26 octobre 2017	118
A3.11. Réunion-Visite de terrain- Tourbière de Frasné : 9 novembre 2017	135
Annexe 4 : Critères de sélection des sites de zones humides	155
Annexe 5 : Personnes impliquées ou contactées (ZHTB phases 1, 2 et 3)	156
A5.1. Comité de pilotage	156
A5.2. Sites d'études	156
A5.3. Autres sites complémentaires potentiels	157
A5.4. Chercheurs de l'équipe projet	157
Annexe 6 : Comité de pilotage	158
Annexe 7 : Poster du projet	166
A7.1. Poster du projet	166
A7.2 : Présentation type phase 1	167
Annexe 8 : Typologies de zones humides	177
A8.1. Typologie de zones humides applicables aux Sdage et aux Sage	178
A8.2. Classification des zones humides de Ramsar	179
A8.3. Système hiérarchique de description des habitats de zones humides MedWet	180
A8.4. Comparaison des classifications de zones humides	181
Annexe 9 : Solutions analytiques et séparation des contributions	182



INTÉGRER TOUS LES LOGOS